

A 5 0

LA COMMUTATION DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES

LA COMMUTATION

DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES

1 / GENERALITES SUR LA COMMUTATION DANS LES CONVERTISSEURS

1-1/ Définitions relatives à la commutation.

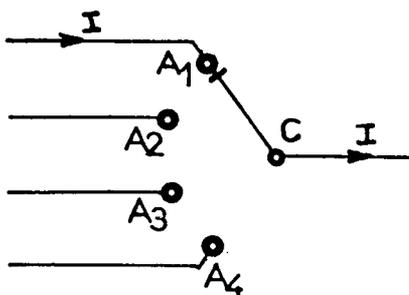
Le fonctionnement d'un convertisseur statique se décompose en une succession de séquences élémentaires. A chaque séquence élémentaire correspond un réseau électrique maillé différent du précédent, obtenu par la modification de l'interconnexion des différentes branches actives .

Dans le chapitre sur les structures de base des convertisseurs, nous avons vu comment, à partir d'un cahier des charges déterminé, on peut établir la configuration du circuit correspondant à chacune des séquences élémentaires . Nous avons simplement posé comme conditions essentielles d'enchaînement des séquences que la continuité du courant dans les branches définies comme des sources de courant, ainsi que celle de la tension aux bornes des branches définies comme des sources de tension soient respectées, ces grandeurs étant les variables d'état du système.

Nous sommes maintenant amenés à analyser le processus qui permet effectivement ces modifications successives du réseau, sans contrainte excessive sur les éléments du dispositif et dans les meilleures conditions de rapidité .

Ce processus fait appel à un **commutateur**, "appareil destiné à substituer une portion de circuit à une autre ou à modifier successivement les connexions d'un ou plusieurs circuits" .

Le fonctionnement du commutateur met en jeu un ensemble complexe de phénomènes que l'on regroupe sous le terme général de *COMMUTATION* .



La figure 1 représente le schéma de principe d'un commutateur à quatre positions. Le commutateur a pour fonction de connecter la branche du circuit associée au "contact mobile" C à un et un seul des "contacts fixes" A_1, A_2, A_3, A_4 associés aux autres branches .

La commutation est alors définie comme le passage du contact mobile d'un contact fixe à un autre .

Figure 1: commutateur à 4 positions.

En conséquence, si l'on s'intéresse au processus qui entoure une seule commutation, le nombre de positions du commutateur n'intervient pas dans la commutation. Chaque commutation ne concerne que trois branches du circuit général : la branche liée au point C et les deux branches qui vont échanger leur connexion avec C.

Nous devons d'autre part remarquer que les branches du circuit reliées aux différents contacts du commutateur sont soumises aux règles d'interconnexion des sources. Il en résulte que les branches reliées aux contacts fixes ne peuvent être que des branches tensions, puisqu'elles peuvent être ouvertes. La branche reliée au contact mobile C est forcément une branche courant, puisqu'on ne peut relier entre elles que deux branches de nature différentes. Tout cela bien entendu dans l'hypothèse de sources parfaites.

Pratiquement, dans les convertisseurs statiques, le commutateur est réalisé par un groupement en étoile d'interrupteurs électroniques suivant le schéma de la figure 2. Nous parlerons alors de voies plutôt que de positions et de pôles plutôt que de contacts. Ce "**commutateur électronique**" permet de réaliser effectivement la fonction commutateur à condition de respecter la logique suivante :

- entre deux commutations, un seul interrupteur est passant.
- la commutation implique le changement d'état simultané et complémentaire de deux interrupteurs et deux seulement.

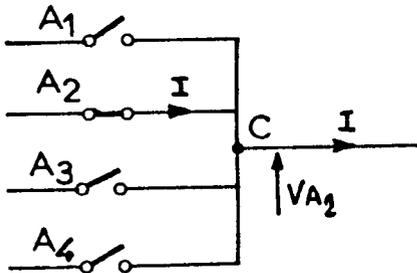


Figure 2 :
commutateur électronique
à quatre voies

1-2/ La cellule élémentaire de commutation.

Les remarques précédentes nous amènent, pour étudier le processus général de la commutation, à ne considérer qu'une cellule élémentaire à deux voies que l'on "isole" de la structure globale du convertisseur. Cette cellule est représentée sur la figure 3.

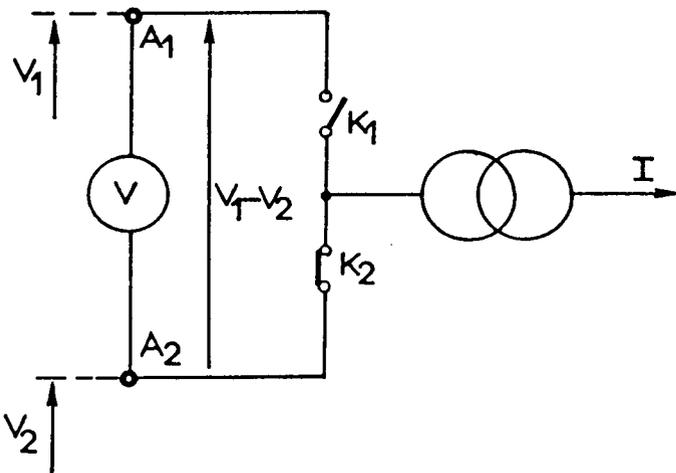


Figure 3 : La cellule élémentaire
de commutation

La source de tension V symbolise la différence de potentiel $V_1 - V_2$ imposée entre les deux pôles A_1 et A_2 par les branches tension qui leur sont associées. La source de courant I est représentative du courant maillon dans la branche connectée au point C , en étoile avec les interrupteurs K_1 et K_2 concernés par la commutation.

Cette cellule permet, en fonction des contraintes électriques qui leur sont imposées avant, pendant et après la commutation, l'analyse du mode de fonctionnement des deux interrupteurs et leur caractérisation.

A titre d'exemple, la figure 4 représente quelques structures de base de convertisseurs sur lesquelles les interrupteurs ont été regroupés pour bien faire apparaître les cellules de commutation élémentaires.

En conclusion, la commutation est fondamentalement liée au fonctionnement de deux interrupteurs (ouverture et fermeture ou, dit autrement, amorçage et blocage). Elle présente donc un **aspect local** relatif aux modes de fonctionnement d'un interrupteur et à la manière dont son basculement peut ou doit s'effectuer.

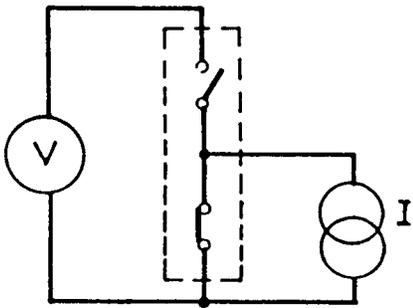
Mais la commutation présente aussi un **aspect système** lié au passage d'une séquence de fonctionnement du circuit à une autre. Ce passage doit se faire de telle manière que les règles fondamentales sur les interconnexions des sources soient respectées (ne jamais ouvrir une source de courant, ne jamais court-circuiter une source de tension...). Ces règles imposent en retour des contraintes sur le mode de fonctionnement des interrupteurs si bien que l'aspect local et l'aspect système doivent être étroitement associés dans l'analyse du processus général d'une commutation.

2/ ASPECT LOCAL DE LA COMMUTATION

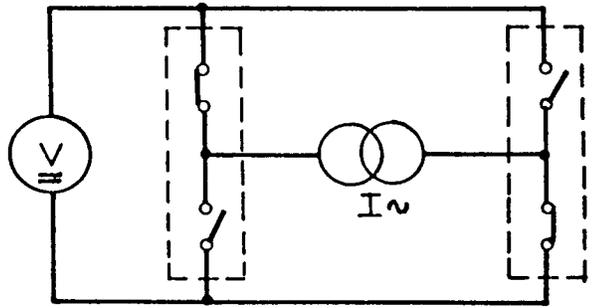
C'est par une extension de langage, sans doute impropre, que l'on parle de la commutation d'un interrupteur, en qualifiant ainsi les phénomènes liés à son changement d'état d'un point de vue strictement local, c'est à dire limité au seul dipôle constitué par le modèle électrique, plus ou moins complexe, de l'interrupteur.

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les caractéristiques statiques des interrupteurs, leurs caractéristiques dynamiques ainsi que les règles qui lient ces deux types de caractéristiques. Ces règles font justement apparaître la dépendance du fonctionnement d'un interrupteur vis à vis de son environnement. En d'autres termes, elles font le lien entre l'aspect local et l'aspect système de la commutation.

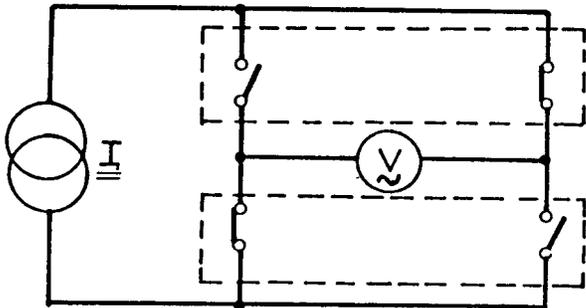
Rappelons les résultats essentiels établis précédemment.



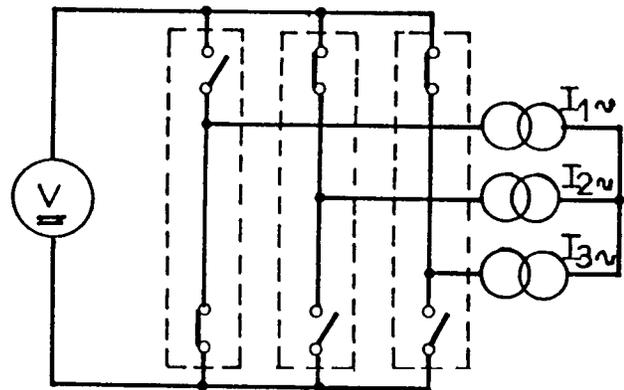
Le hacheur



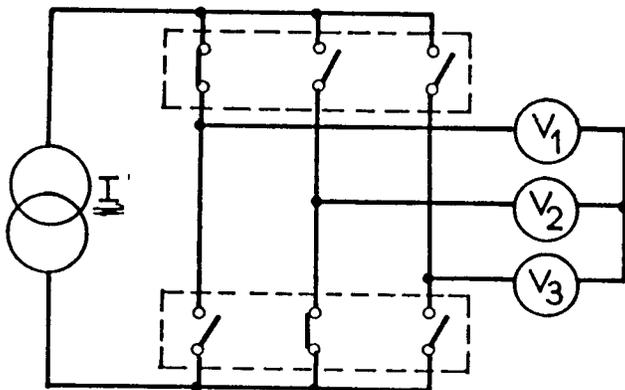
L'onduleur de tension monophasé



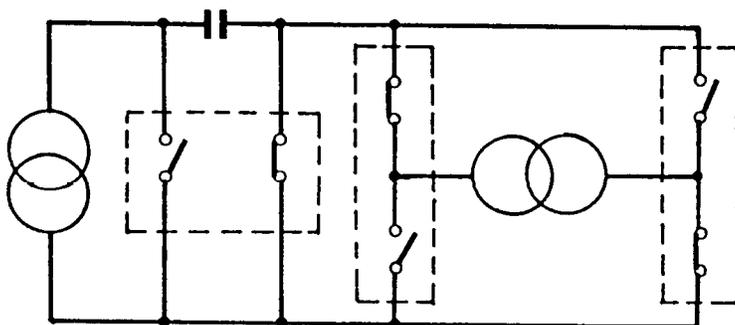
L'onduleur de courant monophasé



L'onduleur de tension triphasé



L'onduleur de courant triphasé



Convertisseur à stockage capacitif

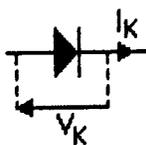
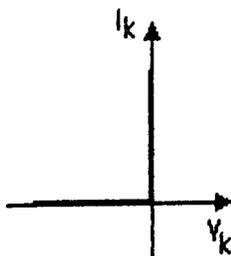
Figure 4 :

Exemples de structures classiques faisant apparaitre les cellules élémentaires de commutation.

2-1/ Régime statique

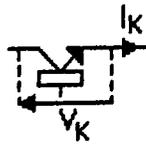
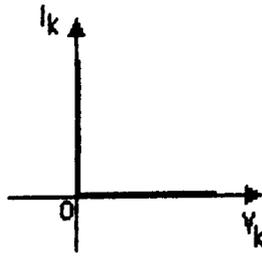
La caractéristique statique est une propriété intrinsèque de l'interrupteur.

Les figures 6 à 8 représentent à titre d'exemple les caractéristiques statiques idéalisées de la diode, du transistor et du thyristor.



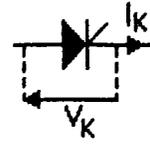
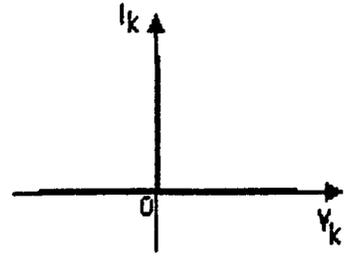
DIODE

Figure 6



TRANSISTOR

Figure 7



THYRISTOR

Figure 8

L'analyse de chaque séquence élémentaire de fonctionnement d'un convertisseur permet de connaître toutes les valeurs de V_k et I_k relatives à un interrupteur et d'en déduire la caractéristique statique qu'il doit posséder (de savoir en particulier si l'interrupteur peut être uni ou bidirectionnel en tension ou en courant.) mais ne suffit pas à l'identifier complètement.

2-2/ Régime dynamique - Mode de Commutation .

C'est le passage de l'état passant à l'état bloqué ou inversement, ce qui correspond donc dans le plan $I_k(V_k)$ au passage du point de fonctionnement de l'interrupteur d'un demi axe à un demi axe perpendiculaire.

Tant pour l'amorçage que pour le blocage, deux modes de changement d'état (ou modes de commutation) des interrupteurs sont à distinguer: **la commutation commandée** et **la commutation spontanée**

2-2-1/ La commutation commandée d'un interrupteur.

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

Si les points de fonctionnement statique imposés par la séquence précédant la commutation et la

séquence suivante se trouvent sur deux demi-axes de mêmes signes. cette commutation ne peut être que commandée.

2-2-2/ La commutation spontanée d'un interrupteur.

Elle est identifiable dans son principe à celle d'une simple jonction P-N (Diode). Elle ne dépend que du circuit électrique extérieur.

Si les points de fonctionnement statique imposés par la séquence précédant la commutation et la séquence suivante se trouvent sur deux demi-axes de signes contraires, cette commutation ne peut être que spontanée.

2-2-3/ Le cycle de fonctionnement d'un interrupteur.

Il représente, d'une part, l'ensemble des points de fonctionnement de l'interrupteur mais aussi, d'autre part, la chronologie de parcours de ces divers points, faisant ainsi apparaître les mécanismes de commutation associés. La connaissance de son cycle de fonctionnement permet de caractériser complètement un interrupteur.

Exemple: Les figures 9, 10 et 11 représentent les cycles de fonctionnement (idéalisés) de la diode, du transistor et du thyristor.

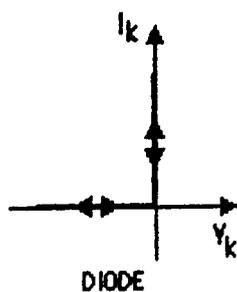


Figure 9

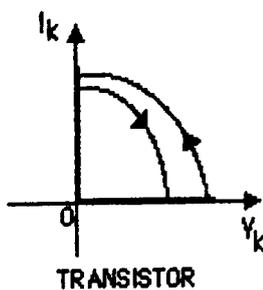


Figure 10

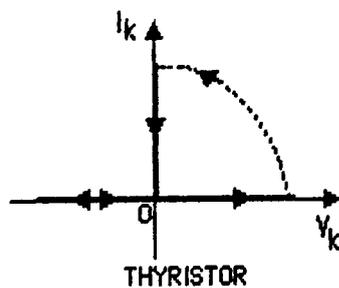


Figure 11

3/ ASPECT SYSTEME DE LA COMMUTATION

L'aspect local de la commutation se limite à l'étude des caractéristiques propres d'un interrupteur au blocage et à l'amorçage. L'aspect système concerne la manière dont doivent effectivement fonctionner les deux interrupteurs associés dans une même cellule élémentaire pour que la commutation s'effectue correctement, compte tenu des contraintes électriques imposées par le circuit du convertisseur.

Dans un premier temps nous supposons parfaites les sources de courant et de tension. Nous pourrons ainsi dégager les règles générales de la commutation. Nous pourrons ensuite seulement étudier leur possibilité d'application à des conditions plus réelles.

3-1/ Loi fondamentale de la commutation. La Commutation naturelle.

Considérons la cellule élémentaire de commutation de la figure 12. Avec les conventions arbitraires de signe définies sur cette figure, nous pouvons écrire en permanence :

$$(1) \quad v_{k1} + v_{k2} = V_1 - V_2 = V$$

$$(2) \quad i_{k1} - i_{k2} = I$$

(V et I sont des grandeurs invariables à l'échelle de la durée de la commutation)

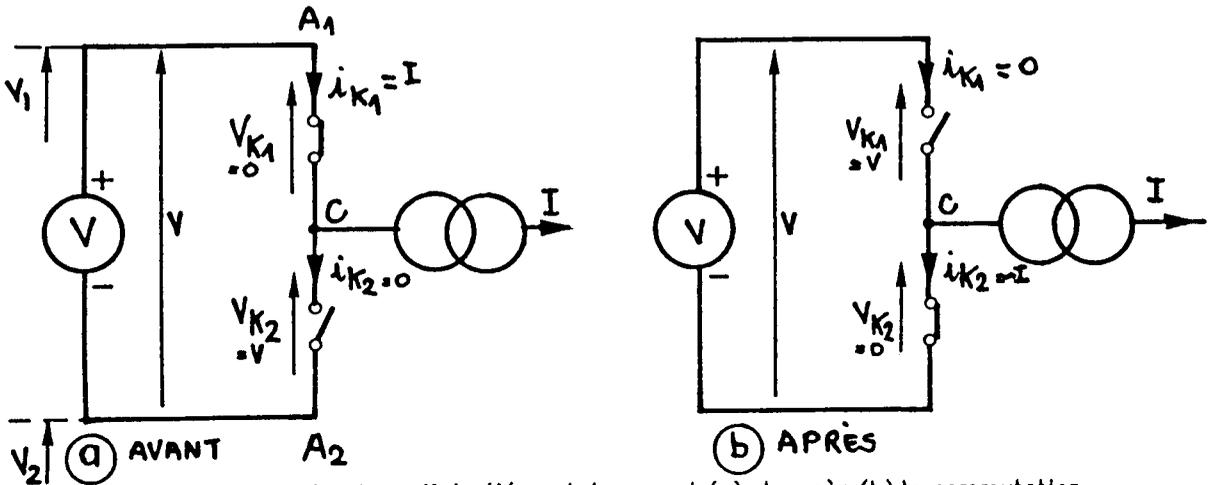


Figure 12 : La cellule élémentaire avant (a) et après (b) la commutation.

Avant et après la commutation les états des deux interrupteurs sont complémentaires, soit par exemple (figure 12a et 12b):

Avant: K_1 passant, K_2 bloqué, soit : ($v_{k1} = 0$, $i_{k1} = I$, $v_{k2} = V$, $i_{k2} = 0$)

Après: K_2 passant, K_1 bloqué, soit : ($v_{k1} = V$, $i_{k1} = 0$, $v_{k2} = 0$, $i_{k2} = -I$)

Ce qui définit, sur leurs caractéristiques statiques, les points de fonctionnement correspondants représentés sur la figure 13 en supposant que $V > 0$ et $I > 0$.

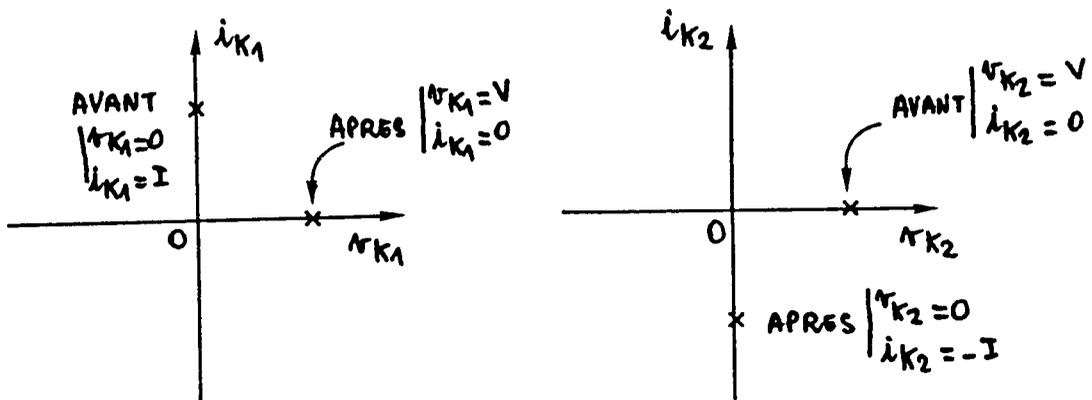


Figure 13 : points de fonctionnement statiques des interrupteurs immédiatement avant et après la commutation

Pendant la commutation, le point de fonctionnement de chaque interrupteur doit se déplacer sur sa propre caractéristique dynamique, d'une manière simultanée, de façon que les relations (1) et (2) soient continuellement vérifiées. Si tel n'était pas le cas, il y aurait risque de court-circuit côté source de tension ou d'ouverture du circuit de la source de courant, ce qui est à proscrire. A priori cela semble poser un problème de synchronisation entre leurs fonctionnements respectifs. En réalité le problème est naturellement résolu grâce aux propriétés des interrupteurs électroniques. En effet, la figure 13 montre à l'évidence que les caractéristiques dynamiques des deux interrupteurs se situent dans deux quadrants adjacents et ceci quel que soit les signes respectifs de V et de I . L'un de ces deux quadrants correspond à deux demi-axes de même signe (Ici le quadrant I correspondant à K_1). L'interrupteur correspondant doit donc obéir à un mode de commutation de type commandé. Le deuxième quadrant a forcément deux demi axes de signes contraires (ici le quadrant IV correspondant à K_2). Le deuxième interrupteur doit par contre obéir à un mode de commutation du type spontané.

C'est donc en fait la commande de l'un des interrupteurs, soit à l'amorçage, soit au blocage (nous verrons plus loin en fonction de quels critères) qui provoque la commutation. Les caractéristiques dynamiques des deux interrupteurs restent liées par les conditions (1) et (2). Comme le second interrupteur subit un changement d'état spontané qui oblige son point de fonctionnement à suivre les axes (figure 14), le point de fonctionnement de l'interrupteur commandé se déplace simultanément dans le plan $I_k(V_k)$ suivant une caractéristique dynamique quasi rectangulaire.

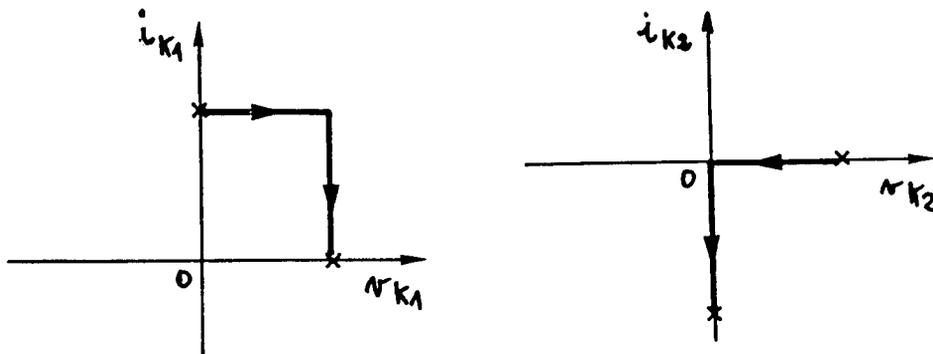


Figure 14 : caractéristiques dynamiques des deux interrupteurs

Nous pouvons déjà remarquer que les pertes énergétiques associées à la commutation concernent essentiellement celui des deux interrupteurs qui fonctionne en mode commandé. Le second, fonctionnant en mode spontané, est le siège d'un minimum de pertes.

Une telle commutation, lorsqu'elle sera effectivement possible compte tenu de la nature réelle des sources, sera qualifiée de **naturelle**.

Nous pouvons alors énoncer la **loi fondamentale de la commutation naturelle**:

Dans une cellule élémentaire de commutation d'un convertisseur statique, la COMMUTATION NATURELLE est provoquée par le changement d'état COMMANDE de l'un des interrupteurs (amorçage ou blocage selon le cas) entraînant le changement d'état SPONTANÉ de l'autre.

Il reste maintenant à différencier, de manière systématique, les deux modes de commutation possibles:

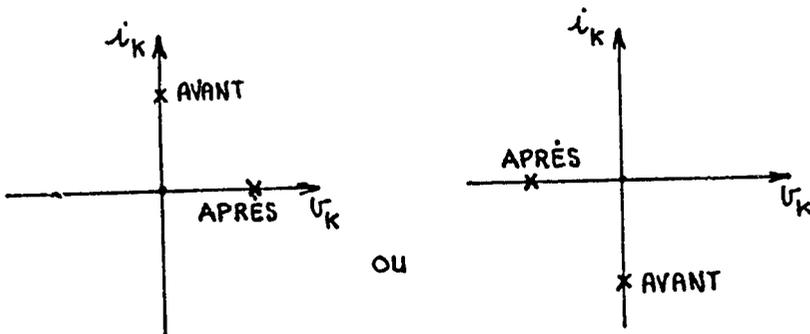
- Commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert ou
- Commutation par commande au blocage de l'interrupteur fermé .

Pour chaque cas particulier, la détermination des points de fonctionnement des deux interrupteurs sur leur caractéristique $I_k(V_k)$, avant et après la commutation, avec les signes REELS de la d.d.p. V et du courant I , permet d'effectuer cette distinction . Il suffit même de limiter l'analyse à un seul interrupteur puisqu'ils fonctionnent de manière complémentaire .

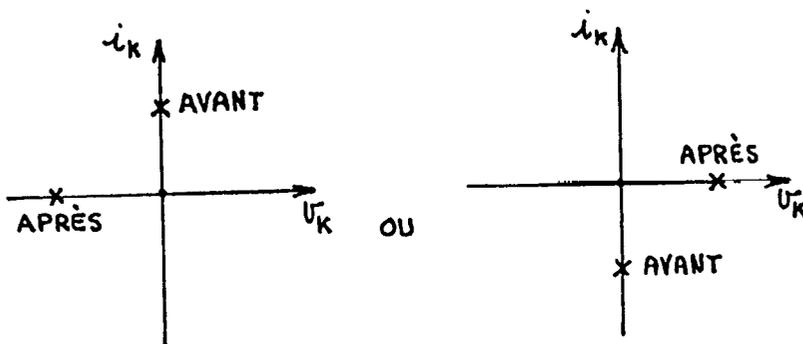
Nous pourrions par exemple édicter la règle suivante:

On considère l'interrupteur fermé avant la commutation : si le courant qui le traverse est de même signe que la d.d.p. à ses bornes après la commutation, celle-ci s'effectue par commande au blocage de cet interrupteur . Si ces deux grandeurs sont de signes contraires la commande à l'amorçage de l' autre interrupteur est nécessaire .

La figure 15 illustre ces deux possibilités .



Premier cas : Le signe de la tension après l'ouverture est le même que le signe du courant avant : l'interrupteur doit être commandé au blocage.



Deuxième cas : Le signe de la tension après l'ouverture est contraire du signe du courant avant : l'interrupteur doit être commandé à l'amorçage.

Figure 15

Mais il est sans doute plus intéressant de rattacher le mode de commutation à l'analyse du fonctionnement du convertisseur et aux formes d'ondes qui en découlent . Celles-ci déterminent en effet d'une part le signe du courant I et d'autre part le potentiel du nœud de commutation C considéré .

Lorsque la commutation entraîne un **accroissement du potentiel du point C**, nous parlerons d'une "**commutation positive**".

Lorsque la commutation entraîne une **diminution du potentiel du point C**, nous parlerons d'une "**commutation négative**".

Considérons alors la figure 16 . Un accroissement du potentiel du point C (commutation positive) correspond forcément à la fermeture de K_1 et à l'ouverture de K_2 . Si le courant I est positif, l'interrupteur K_1 est donc commandé à l'amorçage . Mais si I est négatif, K_2 est commandé au blocage.

D'où la règle:

- Si la commutation et le courant I sont de même signe, il y a commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert .

- Si la commutation et le courant I sont de signes contraires, il y a commutation par commande au blocage de l'interrupteur fermé .

Remarquons toutefois que l'application de cette règle nécessite un respect absolu des conventions de signe utilisées . En particulier, le sens du courant est compté positif dans la branche courant lorsqu'il vient du point C .

3-2/ Remarques: Cas particuliers.

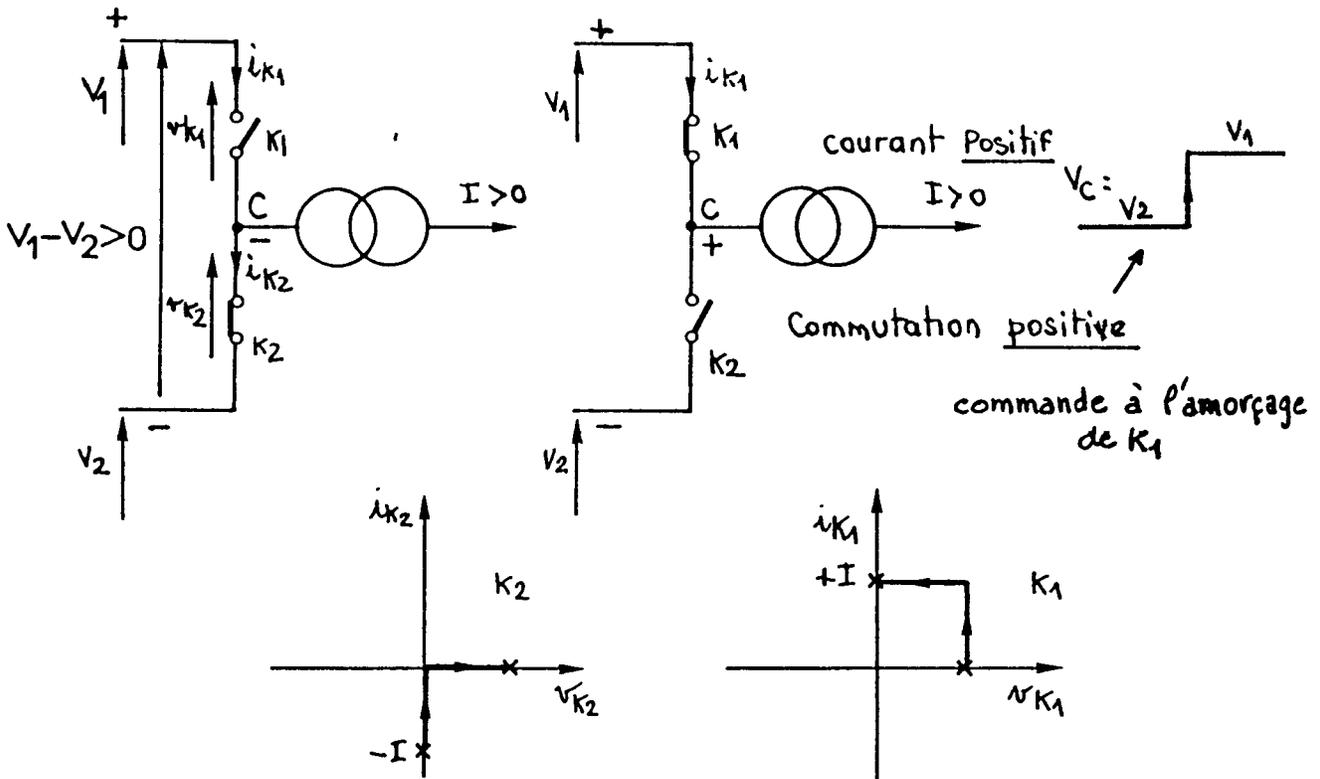
a/ Dans le cas de sources réversibles, lorsque l'une des grandeurs V ou I passe par 0, il y a possibilité d'amorçage ou de blocage spontané d'un interrupteur, entraînant le basculement simultané et spontané de l'autre . La commutation se fait alors sans commande, elle est liée à l'évolution naturelle d'une grandeur électrique du circuit . Nous parlerons alors de **commutation naturelle libre** .

Exemples : Le commutateur à diodes utilisé en logique . Les redresseurs à diodes .

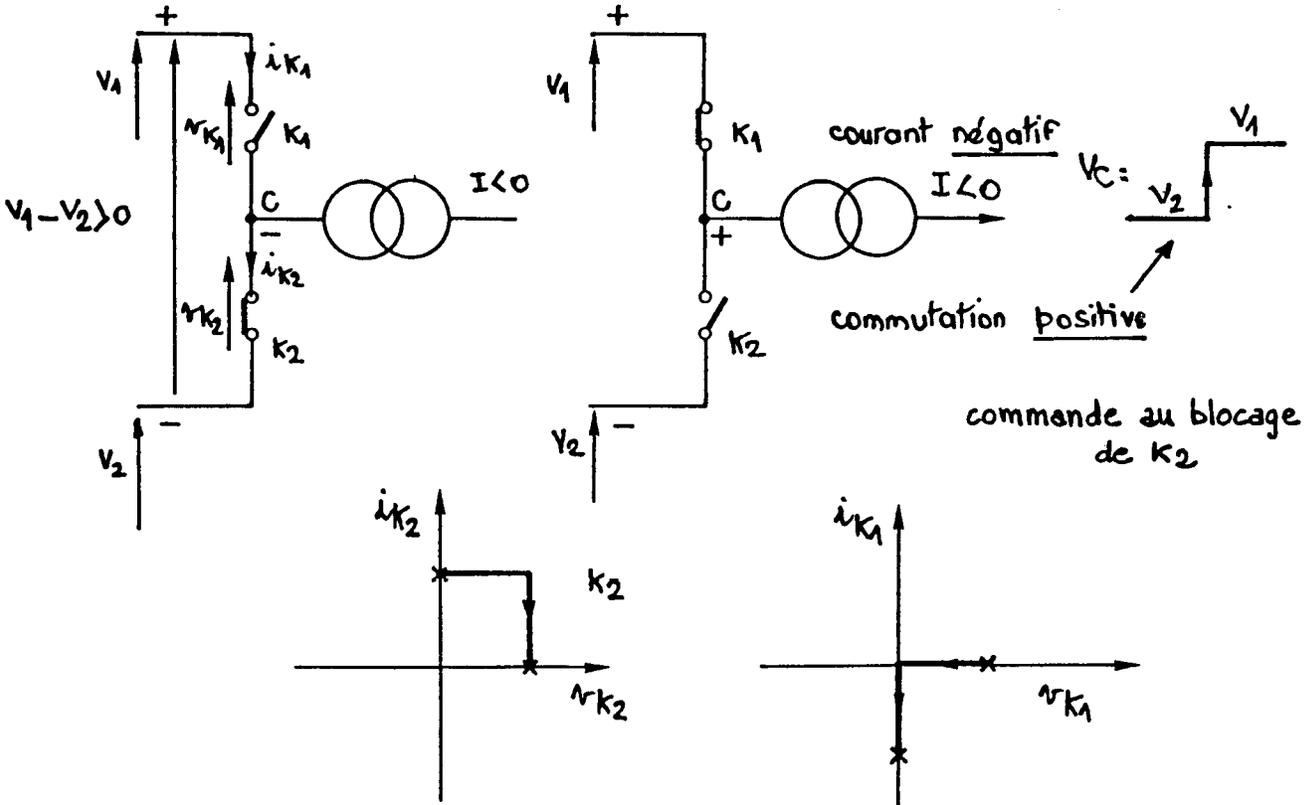
b/ Un interrupteur peut dans certains cas fonctionner seul dans une branche du circuit . Mais il n'y a pas alors à proprement parler commutation .

Exemples :

- L' interrupteur s'ouvre spontanément au passage par zéro du courant (gradateurs) .
- L'interrupteur commandé ferme un circuit initialement passif (charge d'un condensateur) .



Premier cas: commutation et courant sont de même signe, l'interrupteur ouvert doit être commandé à l'amorçage.



Deuxième cas: commutation et courant sont de signes contraires, l'interrupteur fermé doit être commandé au blocage.

Figure 16

3-3/ Synthèse des interrupteurs de la cellule de commutation

Les règles établies ci-dessus permettent, pour une commutation donnée, connaissant le signe de la d.d.p. V et le sens du courant i , de déterminer lequel des deux interrupteurs doit être commandé et si il doit être commandé à l'amorçage ou au blocage .

Le fonctionnement d'un convertisseur étant un fonctionnement cyclique, il est indispensable de connaître toutes les commutations susceptibles d'être imposées à la cellule au cours d'un cycle complet . L'étude de ces différentes commutations permet d'en déduire le cycle dynamique de chaque interrupteur: l'identification et le choix de l'interrupteur le mieux adapté en découle . Nous avons ainsi effectué la synthèse des interrupteurs de la cellule .

Nous allons tout d'abord appliquer cette méthode à plusieurs cas de fonctionnements cycliques élémentaires qui sont ceux que l'on rencontre dans les structures de base des convertisseurs . Ce sont des fonctionnements "à cycle unique" . Nous envisagerons ensuite le cas de fonctionnements plus complexes, dans lesquels le convertisseur peut imposer plusieurs modes de fonctionnement à une même cellule, donc des cycles différents .

3-3-1/ Fonctionnement à cycle unique

De nombreux convertisseurs ont un fonctionnement cyclique simple, dans lequel il y a alternance des commutations :

- Dans le cas d'une cellule à deux voies, pour revenir à l'état initial après la commutation $K_1 \rightarrow K_2$, il faut effectuer la commutation $K_2 \rightarrow K_1$ avec les nouvelles conditions de signe de V et i que le convertisseur a entre-temps imposé .

- Dans le cas de cellules à plus de deux voies, les commutations se succèdent cycliquement ($K_1 \rightarrow K_2$, $K_2 \rightarrow K_3$, $K_3 \rightarrow K_4$, ..., $K_n \rightarrow K_1$) avec des conditions identiques .

Analysons les divers cas possibles .

3-3-1-1/ Premier Cas: V et i ne changent pas de signe entre deux commutations

Dans ces conditions les deux interrupteurs sont unidirectionnels en tension et en courant et les deux commutations successives sont forcément de signes contraires : si la première est positive, la seconde est négative ou inversement . Par contre le courant garde le même signe pour les deux commutations .

Il y a donc deux modes de commutation différents : commande à l'amorçage de l'interrupteur bloqué pour l'une des commutations et commande au blocage de l'interrupteur passant pour l'autre . C'est le même interrupteur qui est commandé à chaque commutation . Le second interrupteur est à amorçage et blocage spontanés .

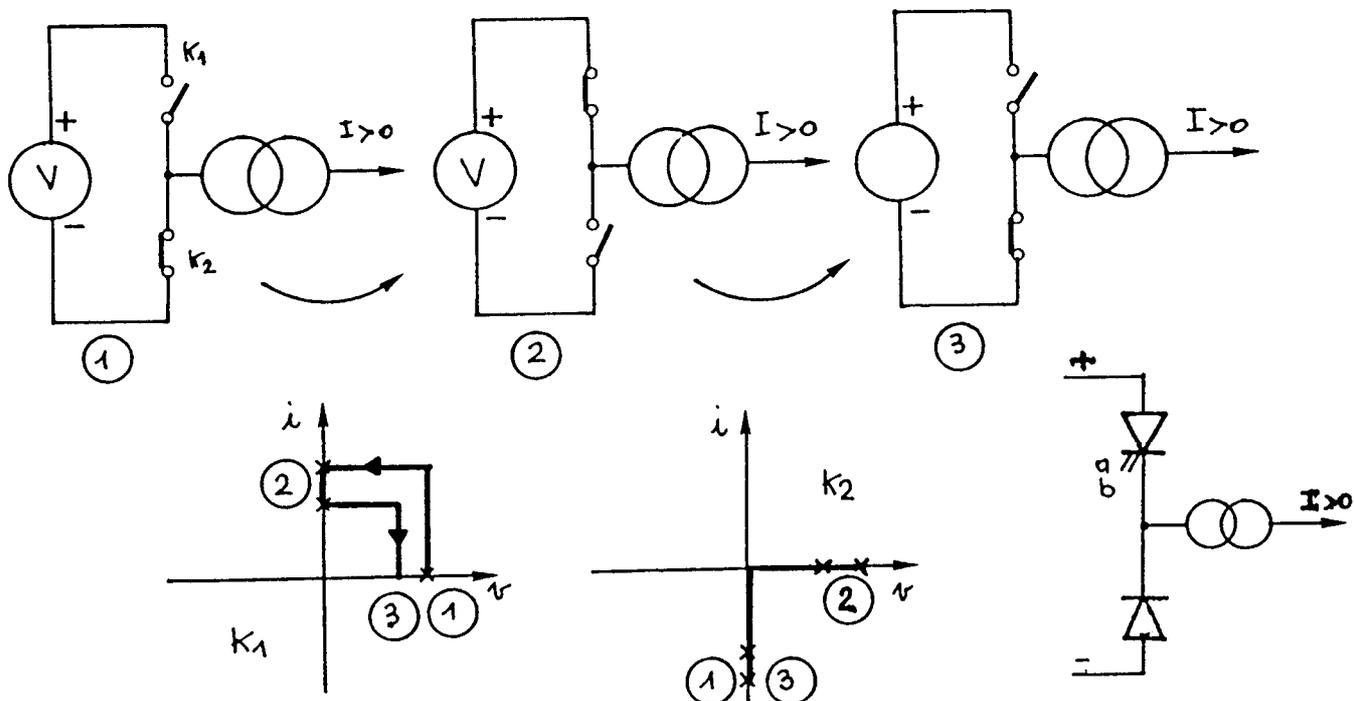


Figure 17 : commutations sans changement de signe de V et de I .

La figure 17 illustre ce premier cas. Avec les conventions de signe de la figure, nous avons :

- 1^{ère} commutation: K_1 commandé à l'amorçage, K_2 blocage spontané .
- 2^{ème} commutation : K_1 commandé au blocage, K_2 amorçage spontané .

Ce premier cas associe donc un interrupteur unidirectionnel commandé à l'amorçage et au blocage (par exemple le transistor) et un autre interrupteur unidirectionnel à amorçage et blocage spontanés (diode) .

Nous pouvons dire que la structure du commutateur est asymétrique (les deux interrupteurs sont de natures différentes) .

Exemple d'application : le hacheur dévolteur non réversible .

3-3-1-2/ Deuxième cas: le sens du courant change entre deux commutations

La d.d.p. V est unidirectionnelle . La source de courant est bidirectionnelle, son courant est alternatif et il se produit une commutation lors de chaque demi-période .

Les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant .

Supposons que la première commutation soit positive (fermeture de l'interrupteur relié au point de plus haut potentiel) . Si le courant est alors positif, il y a commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert (soit K_1 sur la figure 18) .

La commutation suivante sera donc negative (fermeture de l'interrupteur relié au point de plus bas potentiel) . Le courant I , qui a changé de sens, est alors negatif, il y a à nouveau commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert (maintenant K_2) .

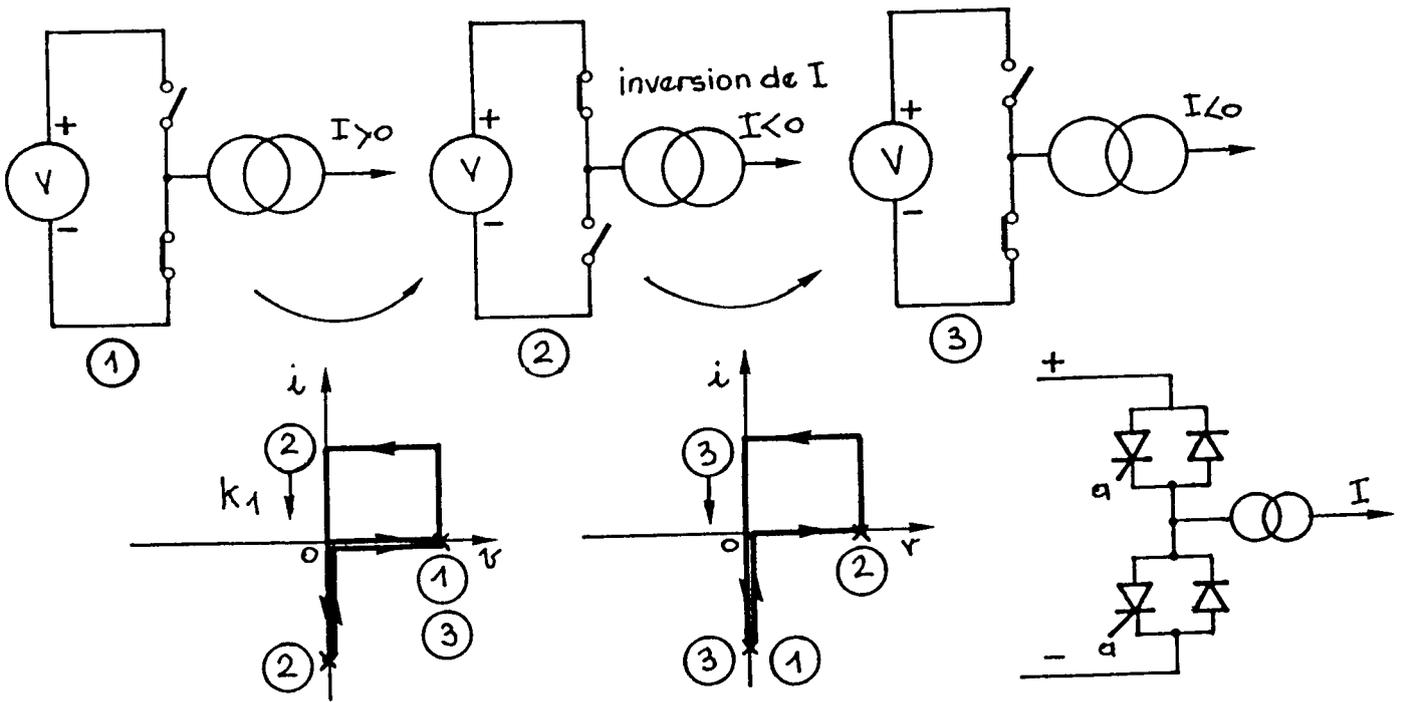


Figure 18 : le courant change de sens entre chaque commutation

En conséquence, les deux interrupteurs sont tous deux commandés à l'amorçage et à blocage spontané. Ils sont du même type (thyristor-diode), ce que confirment bien les deux cycles de la figure 18.

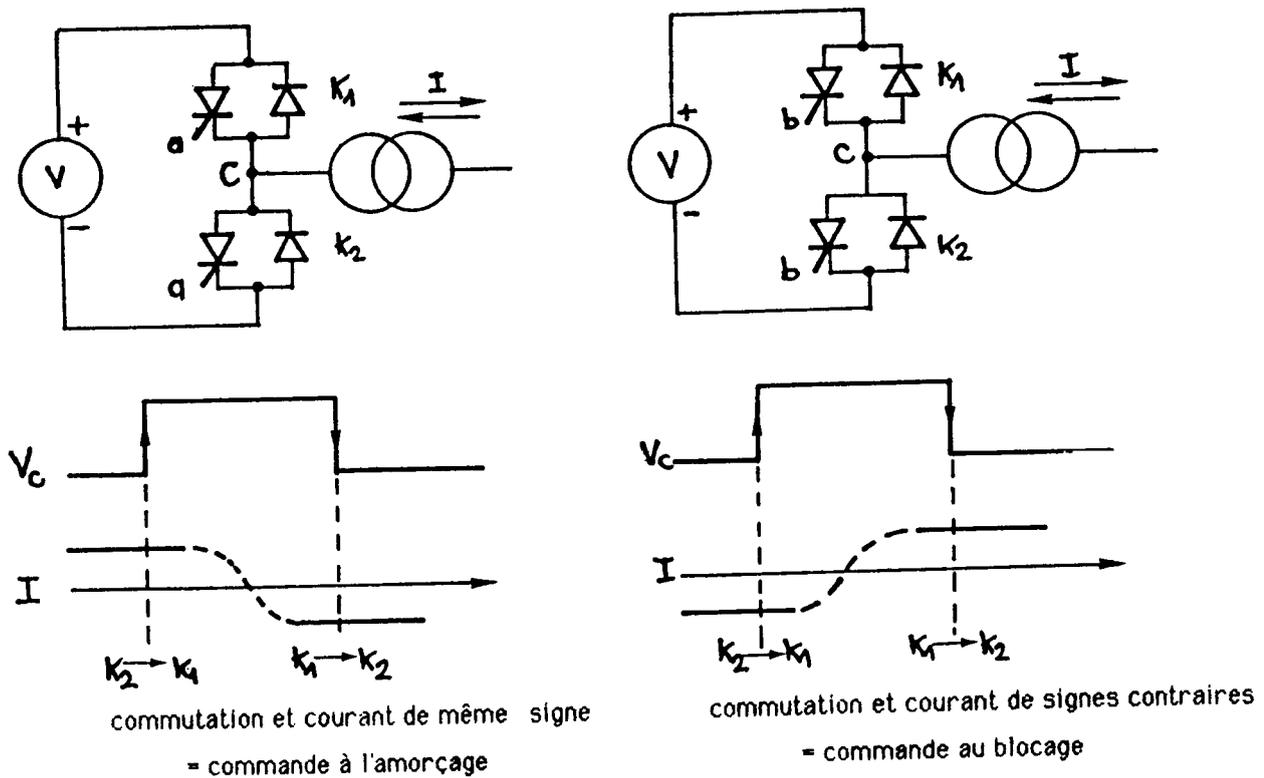


Figure 19