

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.

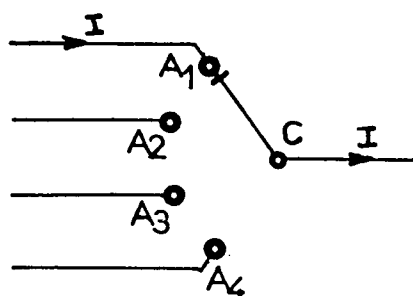
Le fonctionnement d'un convertisseur statique se décompose en une succession de séquences élémentaires. A chaque séquence élémentaire correspond un réseau électrique maillé différent du précédent, obtenu par la modification de l'interconnexion des différentes branches actives .

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" A1, A2, A3, A4 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.

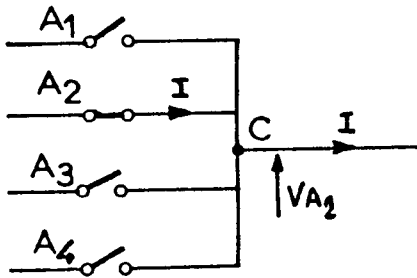


Figure 2 :
commutateur électronique
à quatre voies

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.

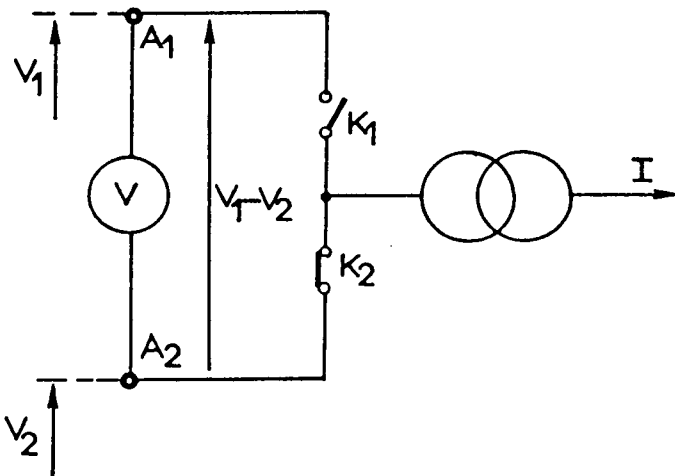


Figure 3 : La cellule élémentaire
de commutation

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.

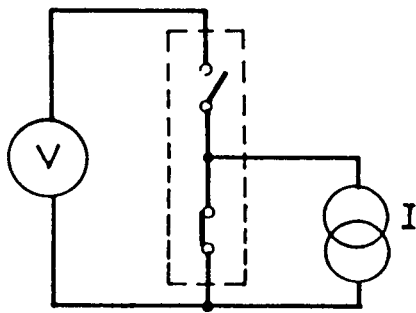
Mais la commutation présente aussi un **aspect système** lié au passage d'une séquence de fonctionnement du circuit à une autre. Ce passage doit se faire de telle manière que les règles fondamentales sur les interconnexions des sources soient respectées (ne jamais ouvrir une source de courant, ne jamais 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

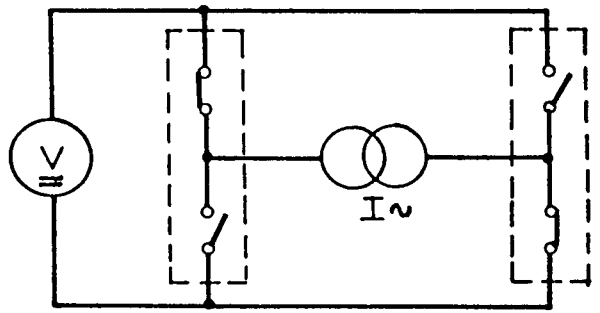
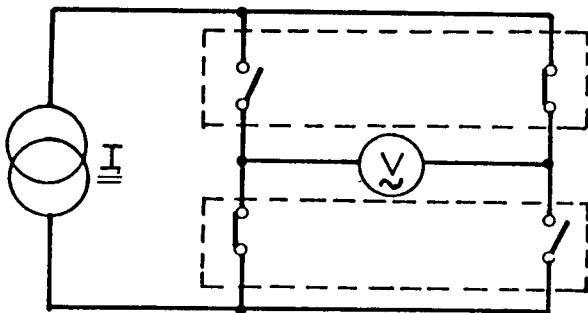
C'est par une extension de langage, sans doute impropre, que l'on parle de la commutation d'un interrupteur, en qualifiant ainsi les phénomènes liés à son changement d'état d'un point de vue strictement local, c'est à dire limité au seul dipôle constitué par le modèle électrique, plus ou moins complexe,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

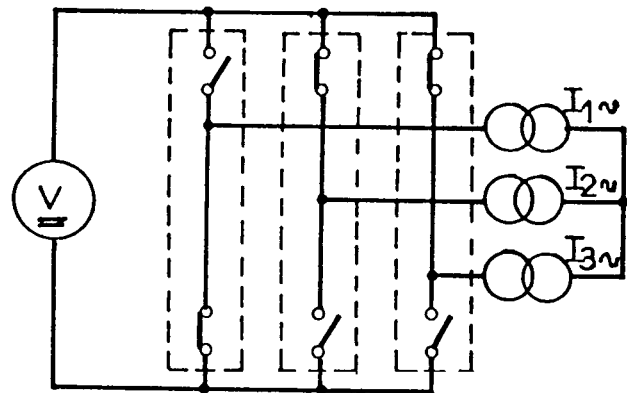
Rappelons les résultats essentiels établis précédemment.



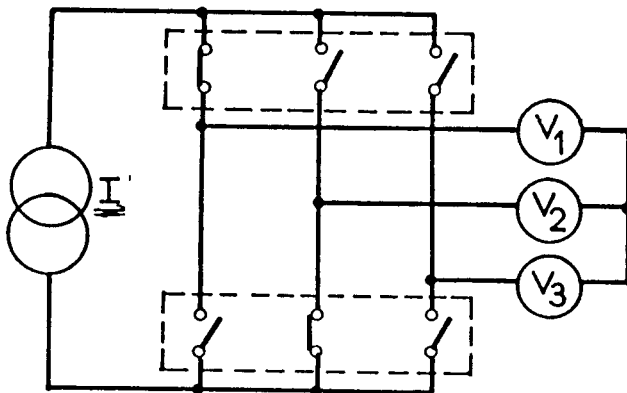
Le hacheur

L'onduleur de tension
monophasé

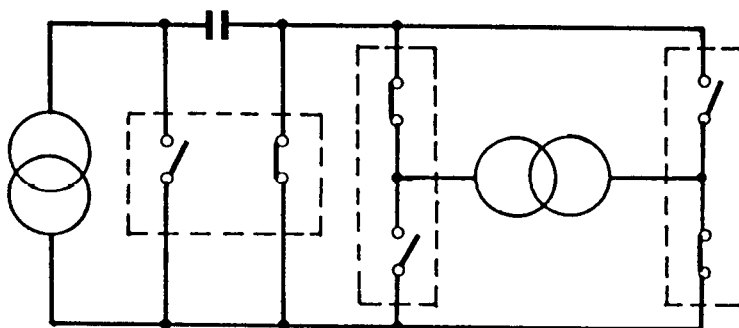
L'onduleur de courant monophasé



L'onduleur de tension triphasé



L'onduleur de courant triphasé



Convertisseur à stockage capacitif

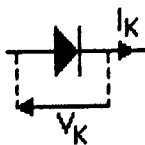
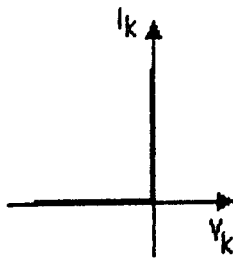
Figure 4 :

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

2-1/ Régime statique

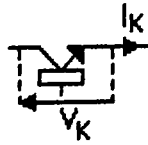
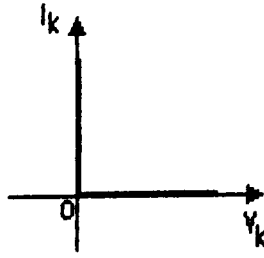
La caractéristique statique est une propriété intrinsèque de l'interrupteur.

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



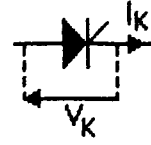
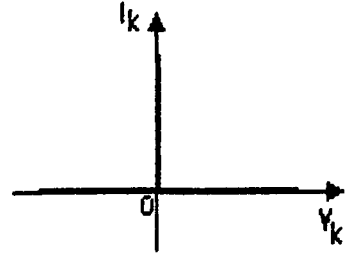
DIODE

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.

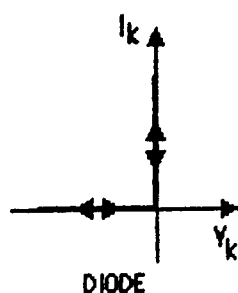


Figure 9

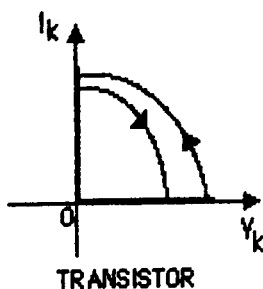


Figure 10

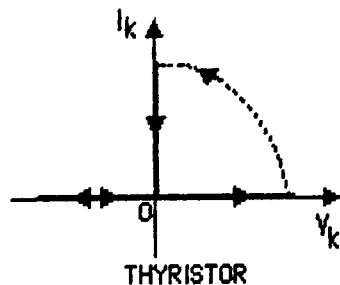


Figure 11

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)

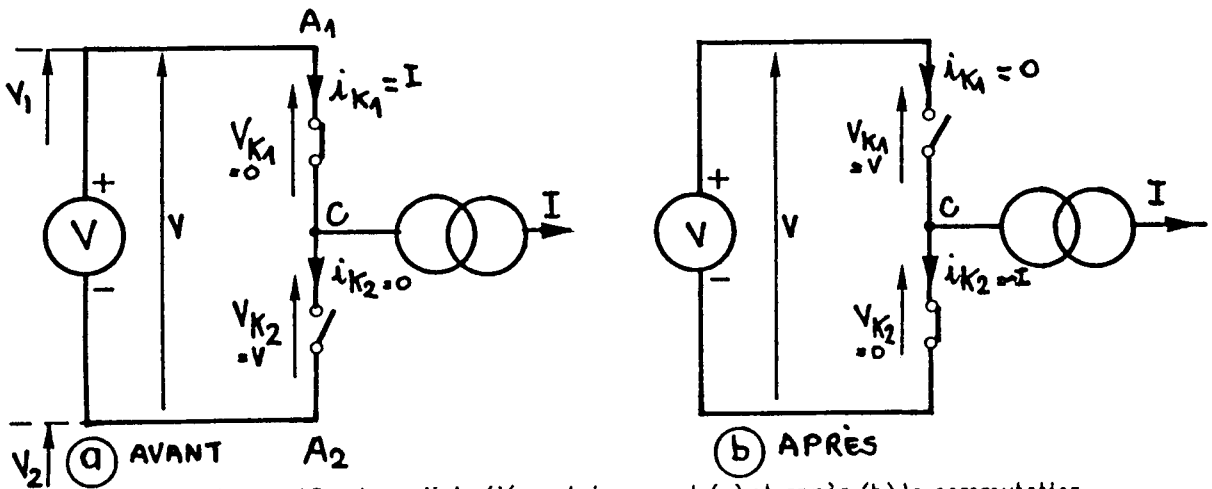


Figure 12 : La cellule élémentaire avant (a) et après (b) la commutation.

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 $I > 0$.

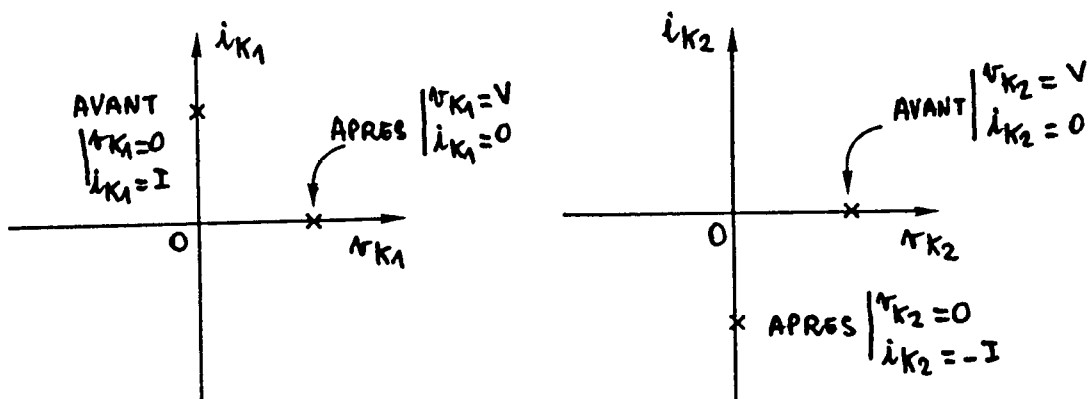


Figure 13 : points de fonctionnement statiques des interrupteurs immédiatement avant et après la commutation

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.

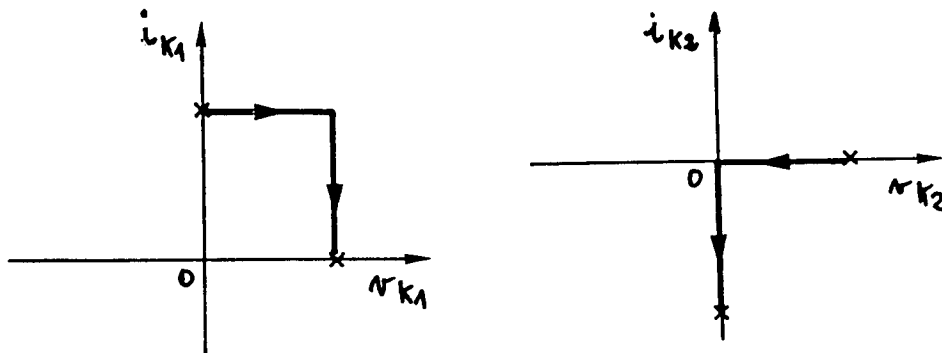


Figure 14 : caractéristiques dynamiques des deux interrupteurs

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 :

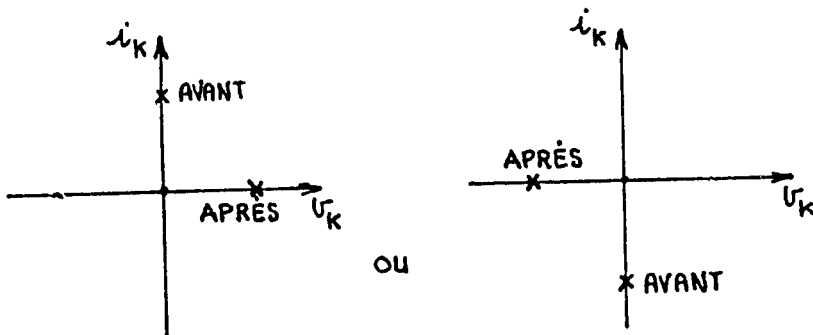
- Commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert ou
- Commutation par commande au blocage de l'interrupteur fermé .

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 .

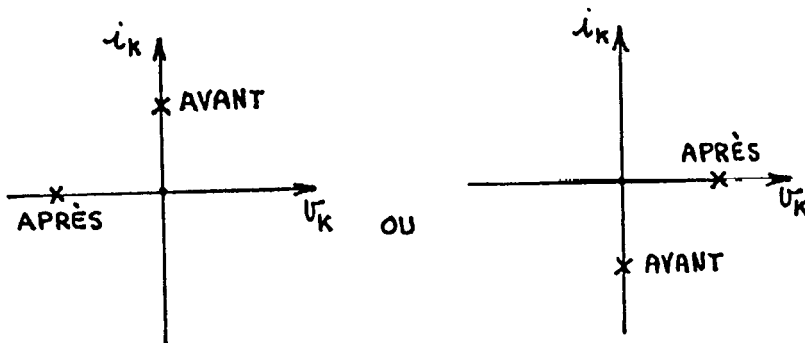
Nous pourrions par exemple édicter la règle suivante :

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.

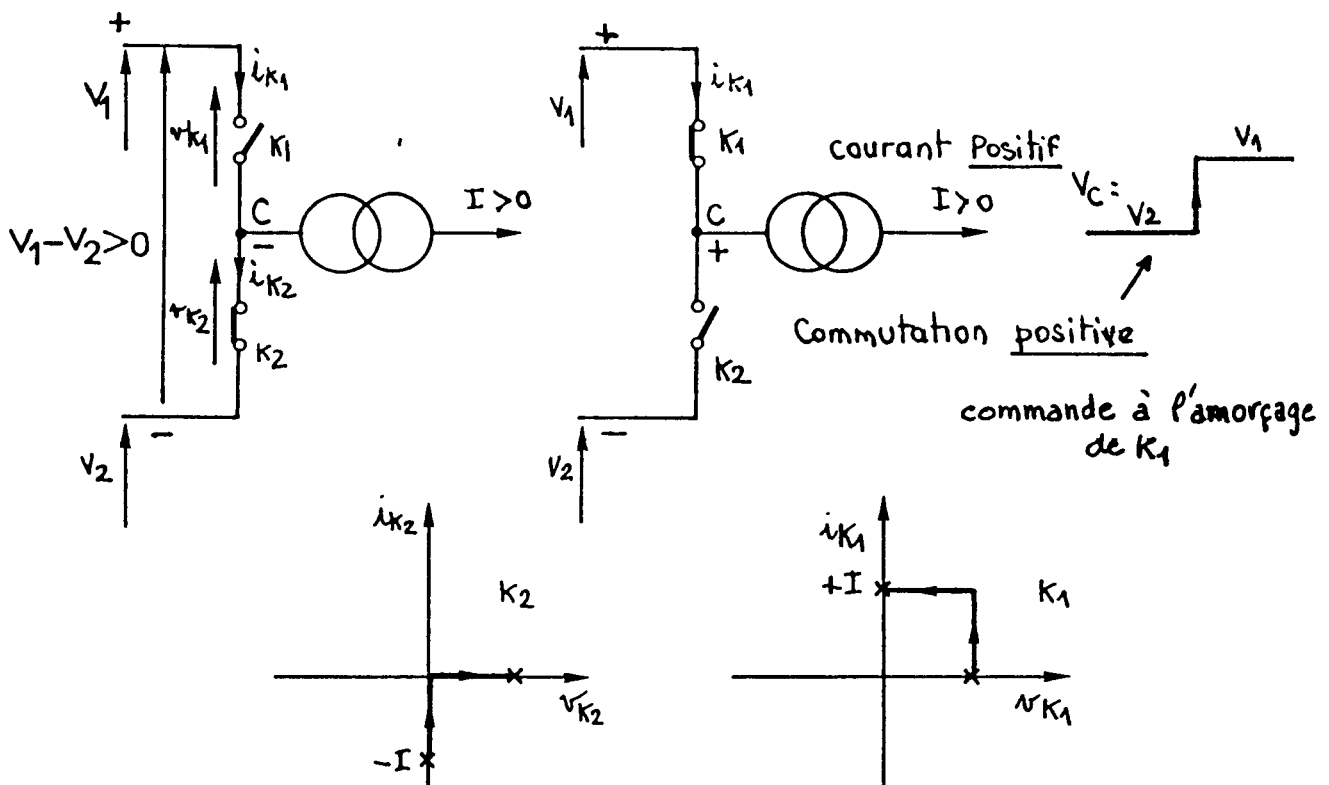
a/ Dans le cas de sources réversibles, lorsque l'une des grandeurs V ou I passe par 0, il y a possibilité d'amorçage ou de blocage spontané d'un interrupteur, entraînant le basculement simultané et spontané de l'autre . La commutation se fait alors sans commande, elle est liée à l'évolution naturelle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

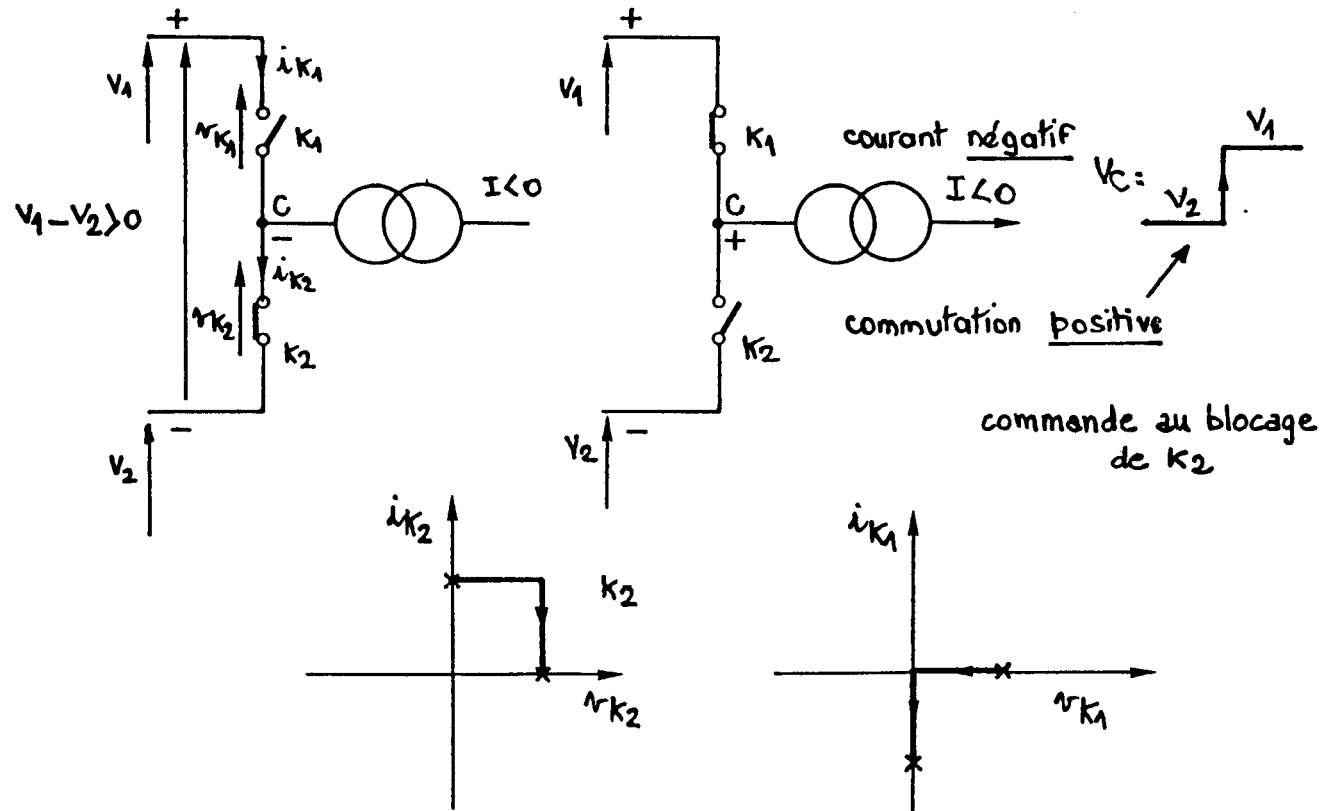
b/ Un interrupteur peut dans certains cas fonctionner seul dans une branche du circuit . Mais il n'y a pas alors à proprement parler commutation .

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.

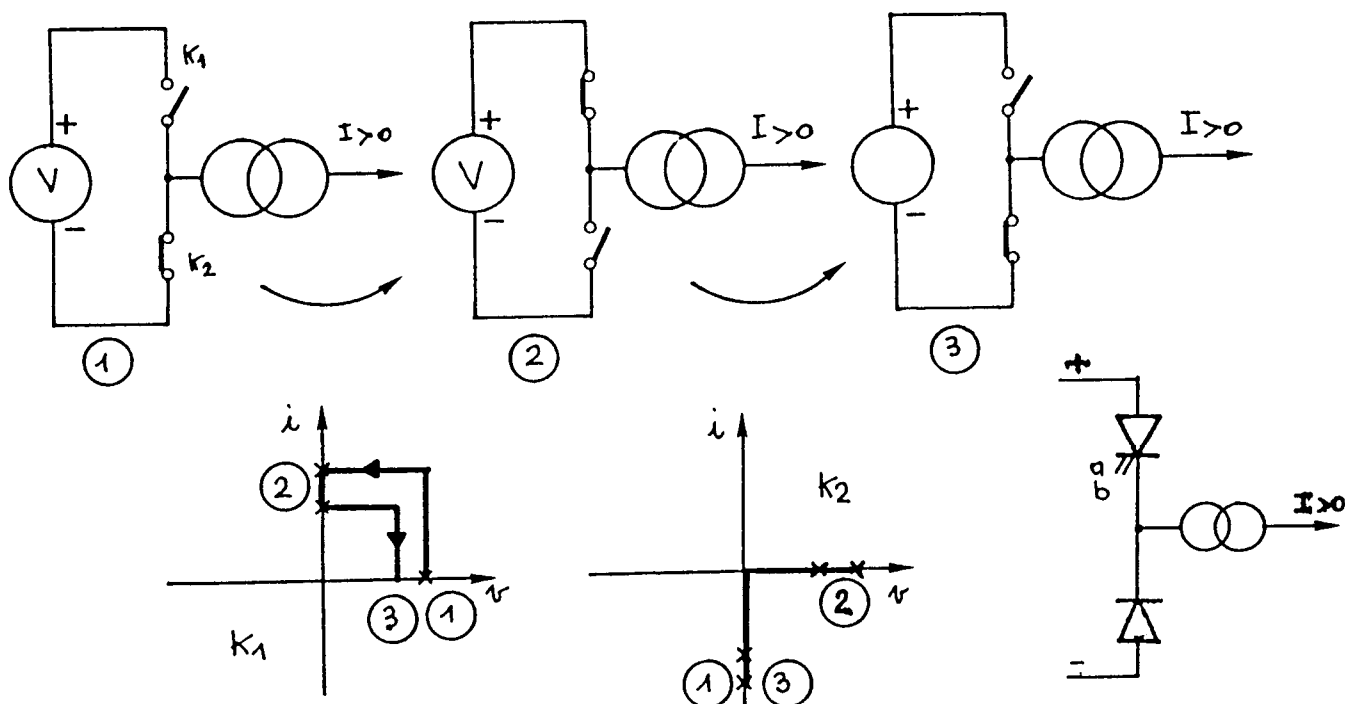


Figure 17 : commutations sans changement de signe de V et de I .

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

- 1ère commutation: K_1 commandé à l'amorçage, K_2 blocage spontané.
- 2ème 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 négative (fermeture de l'interrupteur relié au point de plus bas potentiel). Le courant I , qui a changé de sens, est alors négatif, il y a à nouveau commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert (maintenant K_2).

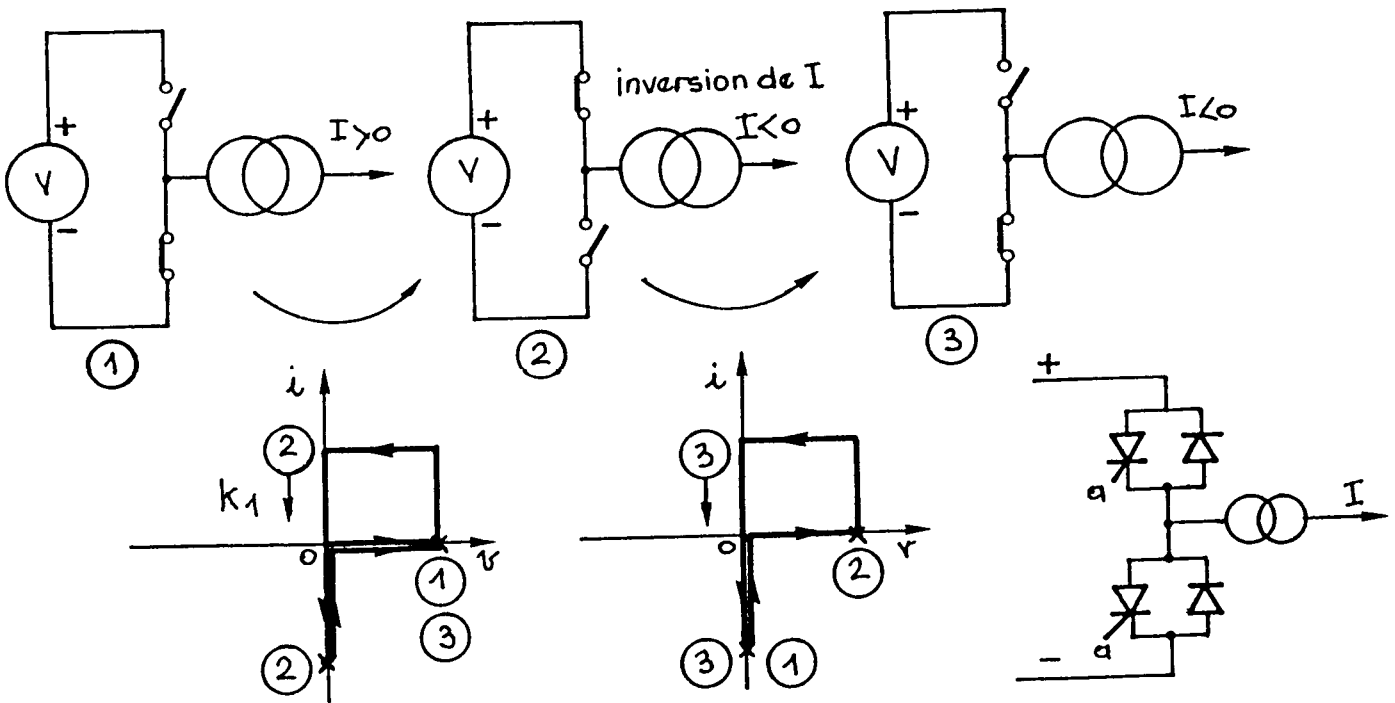


Figure 18 : le courant change de sens entre chaque commutation

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.

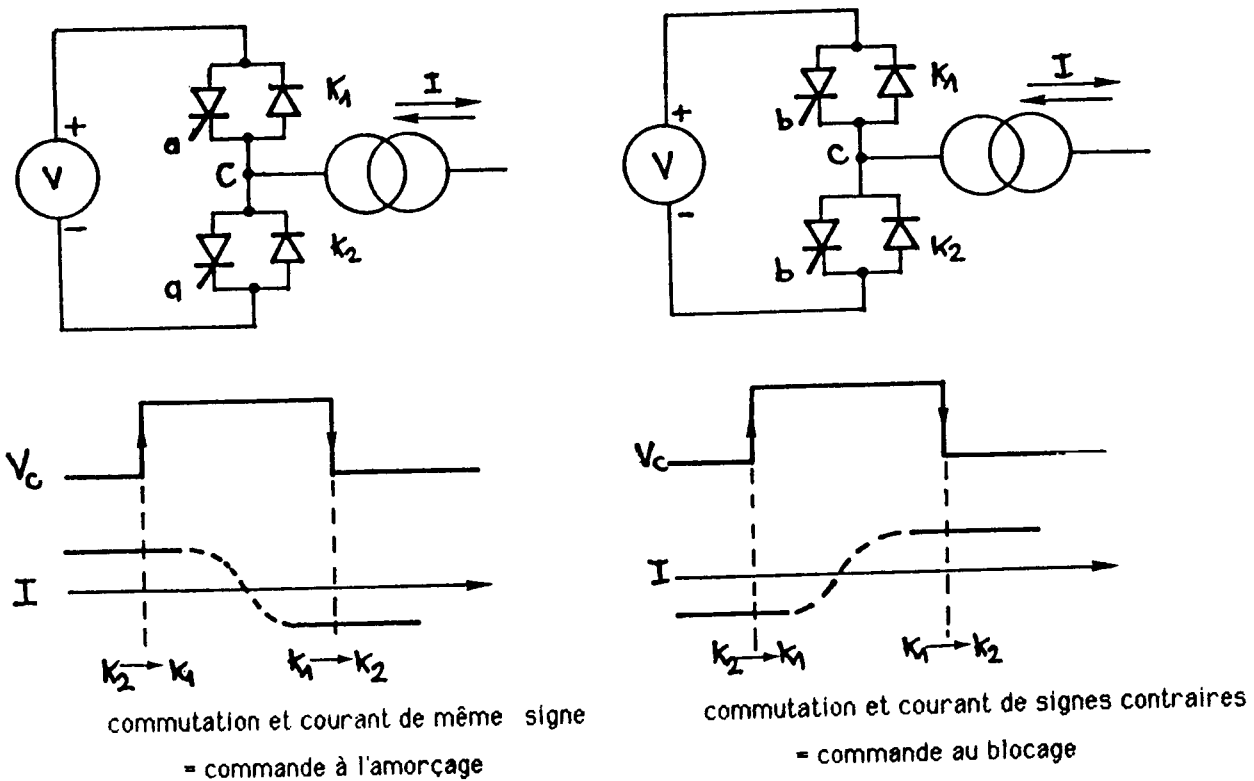


Figure 19

Dans l'exemple choisi, il y a concordance des signes de la commutation et du courant. Mais commutation et courant peuvent être de signes contraires. Il est facile de voir qu'alors les interrupteurs sont tous deux unidirectionnels en tension, bidirectionnels en courant, à blocage commandé et amorçage spontané (thyristor dual).

La figure 19 résume les deux possibilités avec les symboles conventionnels des interrupteurs ainsi identifiés (interrupteur commandé avec diode anti-parallèle).

Exemples d'application : les onduleurs de tension. L'onduleur série.

3-3-1-3/ Troisième cas : le signe de V change entre deux commutations

Le courant garde le même sens. La d.d.p. V est alternative et il se produit une commutation à chaque demi-période. Les deux interrupteurs sont donc unidirectionnels en courant et bidirectionnels en tension.

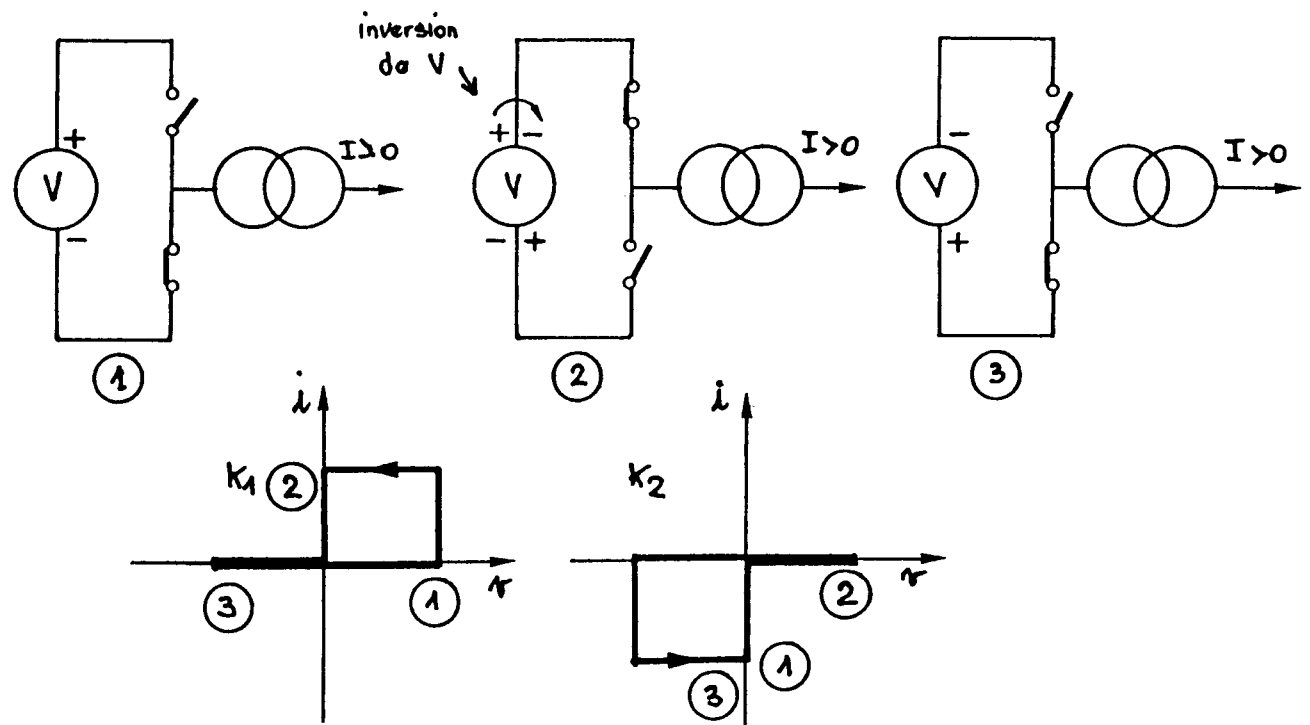


Figure 20 : la tension change de signe entre chaque commutation.

Supposons le courant positif. Si la première commutation est elle-même positive, (fermeture de l'interrupteur relié au point de plus haut potentiel), il y a commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert (soit K_1 sur la figure 20).

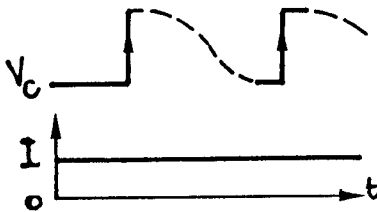
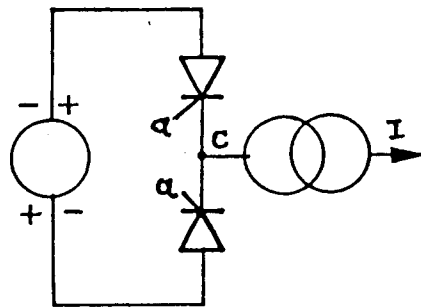
Le signe de la tension ayant changé, la commutation suivante sera à nouveau positive. Il y a donc à nouveau commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert (soit K_2).

En conséquence, les deux interrupteurs sont tous deux commandés à l'amorçage et à blocage spontané. Ils sont du même type (thyristor), ce que confirment bien les deux cycles de la figure 20.

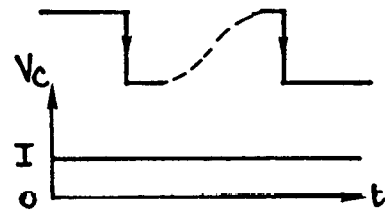
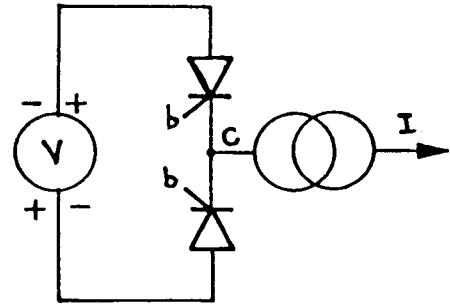
Si nous nous plaçons dans le cas où commutation et courant sont de signes contraires, les interrupteurs, toujours unidirectionnels en courant et bidirectionnels en tension, sont par contre à blocage commandé et amorçage spontané.

La figure 21 résume les deux possibilités avec les symboles conventionnels des interrupteurs ainsi identifiés.

Exemples d'application: les commutateurs de courant monophasés, l'onduleur parallèle.



commutation et courant de même signe
→ commande à l'amorçage



commutation et courant de signes contraires
→ commande au blocage

Figure 21

3-3-1-4/ Quatrième cas : cellule de commutation polyphasée

La cellule de commutation élémentaire comporte n voies donc n interrupteurs groupés suivant le schéma de la figure 22. Les n tensions V_j , supposées sinusoïdales, de période T , forment un système polyphasé. Le courant I est unidirectionnel. Les commutations successives ($K_1 \rightarrow K_2$, $K_2 \rightarrow K_3$, $K_3 \rightarrow K_4$, ..., $K_n \rightarrow K_1$) se produisent de manière périodique, avec une période T/n . Si l'ordre de succession des tensions V_j est le même que l'ordre de fonctionnement des interrupteurs K_j , toutes les commutations seront de même signe. Le signe du courant étant toujours le même, le mode de commutation est donc toujours le même et les interrupteurs sont tous identiques.

La figure 22 correspond au cas de commutations positives et d'un courant positif. Le cycle d'un interrupteur K_j permet d'identifier un thyristor (amorçage commandé, blocage spontané).

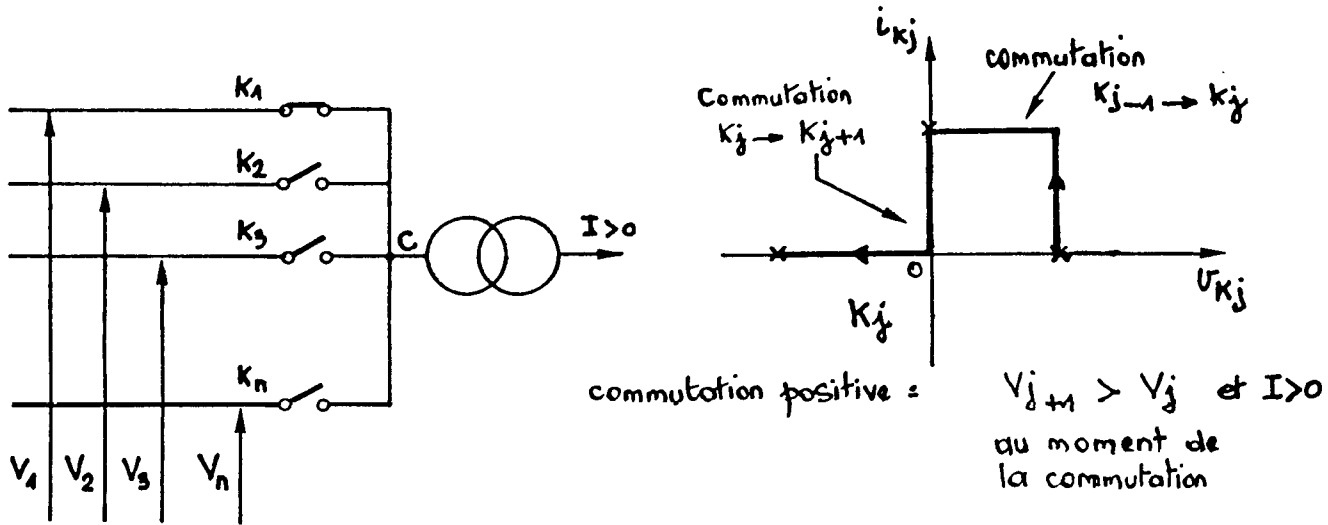


Figure 22 : Cellule polyphasée

D'une manière générale, les interrupteurs K sont :

- commandés à l'amorçage et à blocage spontané si le courant est positif et la commutation positive ($V_{j+1} > V_j$) ou bien si le courant est négatif et la commutation négative ($V_{j+1} < V_j$).
- commandés au blocage et à amorçage spontané si le courant est positif et la commutation négative ($V_{j+1} < V_j$) ou bien si le courant est négatif et la commutation positive ($V_{j+1} > V_j$).

La figure 23 illustre le cas d'une cellule triphasée associée à un système de tension triphasé, avec un courant toujours positif.

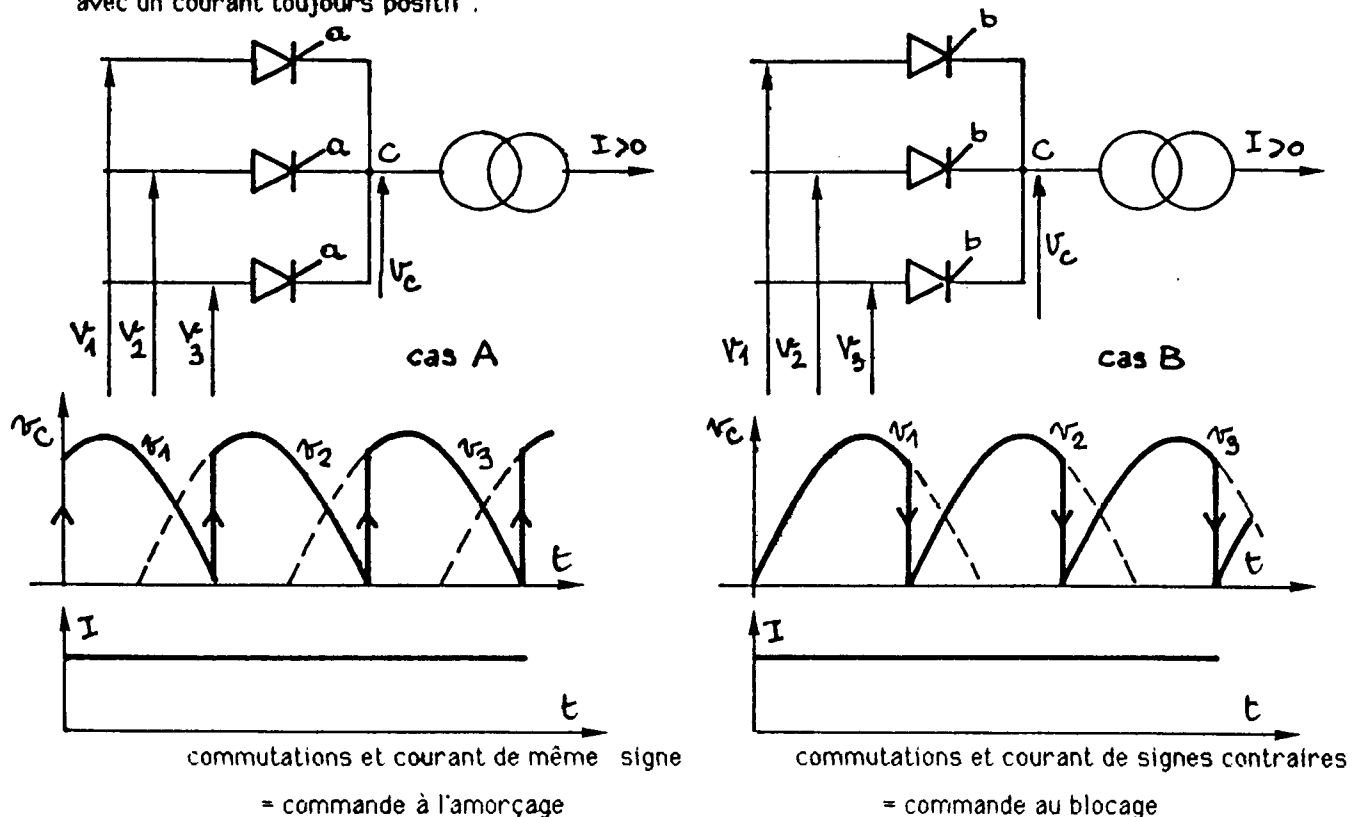


Figure 23

Dans le cas A, les commutations sont toutes positives (discontinuités positives du potentiel du point C). Les interrupteurs sont commandés à l'amorçage et à blocage spontané. D'autre part ils sont unidirectionnels en courant et bidirectionnels en tension (à l'état bloqué, la d.d.p. aux bornes de K1 par exemple est $V_I - V_J$ qui peut être positive ou négative). L'élément réel correspondant est le THYRISTOR.

Dans le cas B, les commutations sont toutes négatives (discontinuités négatives du potentiel du point C), les interrupteurs sont commandés au blocage et à amorçage spontané. D'autre part, ils sont toujours unidirectionnels en courant et bidirectionnels en tension. Nous verrons plus loin les difficultés que soulève ce mode particulier de commutation.

3-3-2/ Fonctionnement à plusieurs cycles. Cellule réversible.

Les cas précédents correspondent tous à un fonctionnement régulier et cyclique de la cellule de commutation, dans lequel le cycle dynamique des interrupteurs reste toujours le même. Cela s'applique à de nombreux convertisseurs d'utilisation courante et de fonctionnement simple.

Toutefois, pour des convertisseurs de fonctionnement plus élaboré, la cellule élémentaire ne se trouve pas de manière permanente dans des conditions correspondant à un et à un seul des cas étudiés ci-dessus.

Il en sera ainsi chaque fois que l'une des grandeurs, courant I ou tension V , supposée de signe constant dans les quatre cas précédents, est en fait susceptible de changer de signe périodiquement, mais avec une période bien plus grande que celle des commutations de la cellule. Lorsque le signe de cette grandeur est positif, la cellule fonctionne suivant l'un des cycles élémentaires déjà étudié et le cycle dynamique imposé aux interrupteurs de la cellule permet une première caractérisation de ces derniers. Lorsque le signe de cette grandeur devient négatif, le cycle élémentaire n'est plus le même, le mode de commutation est modifié, ce qui entraîne une caractérisation différente des interrupteurs.

La cellule est alors une cellule "réversible", dans la mesure où la valeur moyenne de la puissance électrique qui transite par le pôle C change alors de signe.

En conséquence, les interrupteurs de la cellule doivent chacun être capables de fonctionner suivant l'un ou l'autre des cycles dynamiques imposés, donc avec des caractéristiques statiques et dynamiques différentes suivant le cas. L'aspect local de la commutation prend ici une grande importance car on est amené à concevoir des interrupteurs complexes, association d'interrupteurs simples ou interrupteurs "modulables" à partir d'une logique de commande élaborée.

Décrivons un exemple simple.

Considérons une cellule élémentaire de commutation à deux voies à laquelle le fonctionnement du convertisseur impose les conditions suivantes :

- Dans un premier temps, il y a fonctionnement cyclique de la cellule avec signe constant de V et I , par exemple positif. La structure de la cellule correspondante est celle de la figure 24a ; C'est un commutateur asymétrique associant un interrupteur K1 commandé à l'amorçage et au blocage et un interrupteur K2 à amorçage et blocage spontanés.

-Dans un deuxième temps, le sens du courant I de la source de courant est inversé. D'où une nouvelle structure de la cellule représentée figure 24b, inverse de la précédente.

Un interrupteur (K_1 par exemple) doit donc pouvoir décrire l'un ou l'autre des cycles de la figure 24c. Dans ce cas particulier, où les deux cycles de fonctionnement se situent dans des quadrants différents, le problème est résolu par la mise en parallèle de deux interrupteurs suivant le schéma de la figure 24d.

Application: Hacheur dévolteur réversible en courant, onduleur de tension à modulation $\pm E$.

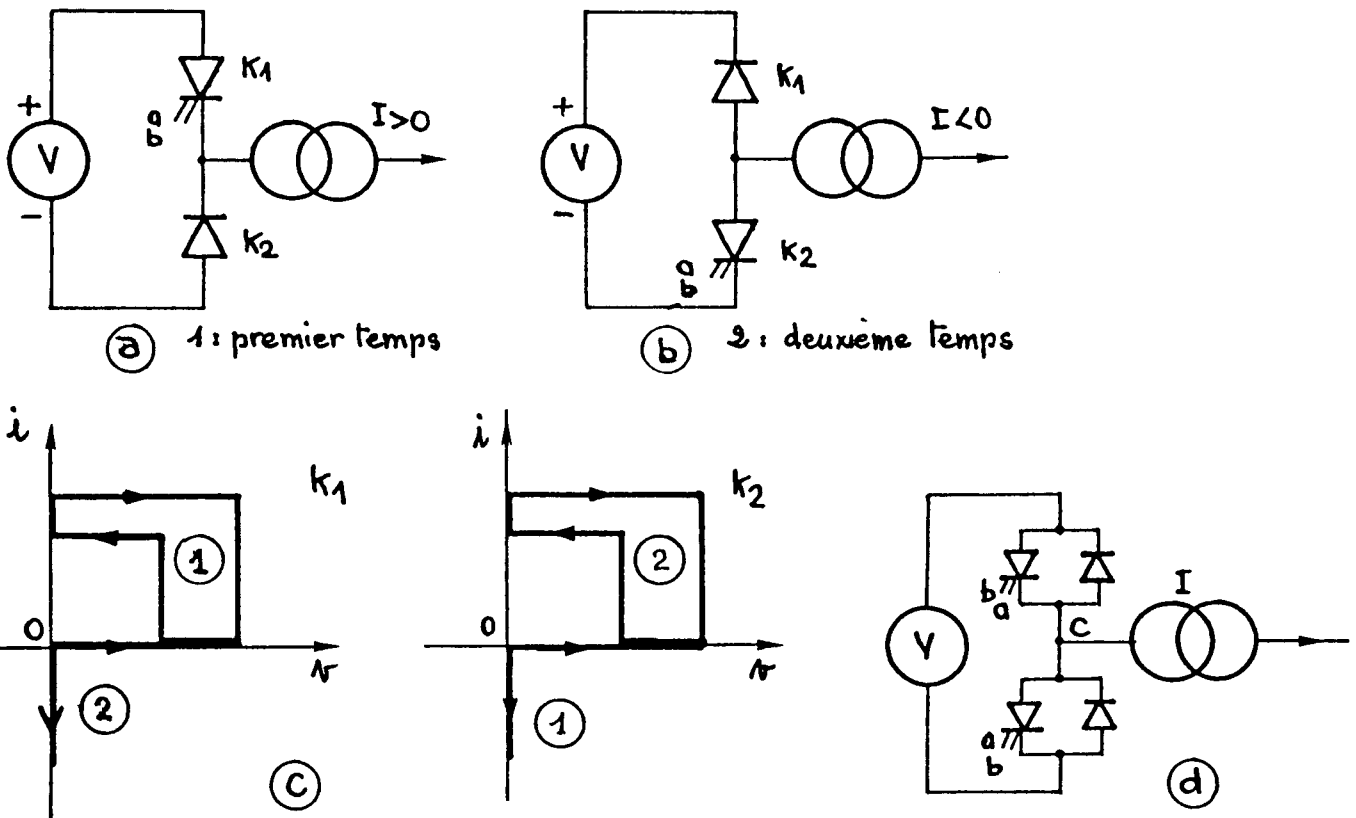


Figure 24 : Cellule de commutation asymétrique réversible en courant.

3-4/ La commutation forcée en commande au blocage.

Tout ce qui précède suppose l'existence d'interrupteurs commandés à l'amorçage ou au blocage.

Or la commande au blocage souffre par rapport à la commande à l'amorçage d'un certain retard technologique: l'interrupteur à commande au blocage (transistor, G.T.O.) est encore loin de couvrir un domaine de puissance aussi étendu que celui de la commande à l'amorçage (thyristor).

Comment effectuer une commutation du domaine de la commande au blocage lorsque, compte tenu des courants ou tensions mis en jeu, l'interrupteur nécessaire n'existe pas ou s'avère inaccessible

(prix élevé, mauvaise disponibilité) ? Il faut alors imaginer une modification de la structure de la cellule de commutation permettant, au prix d'éléments auxiliaires et d'un temps de commutation plus élevé, d'effectuer cette commutation avec des interrupteurs à commande à l'amorçage. Ce mode de commutation particulier s'appelle COMMUTATION FORCEE .

Le principe de base est le suivant .

Comme on ne peut pas provoquer l'ouverture de l'interrupteur par sa commande, on va provoquer son blocage spontané . Le schéma de principe élémentaire est celui de la figure 25 .

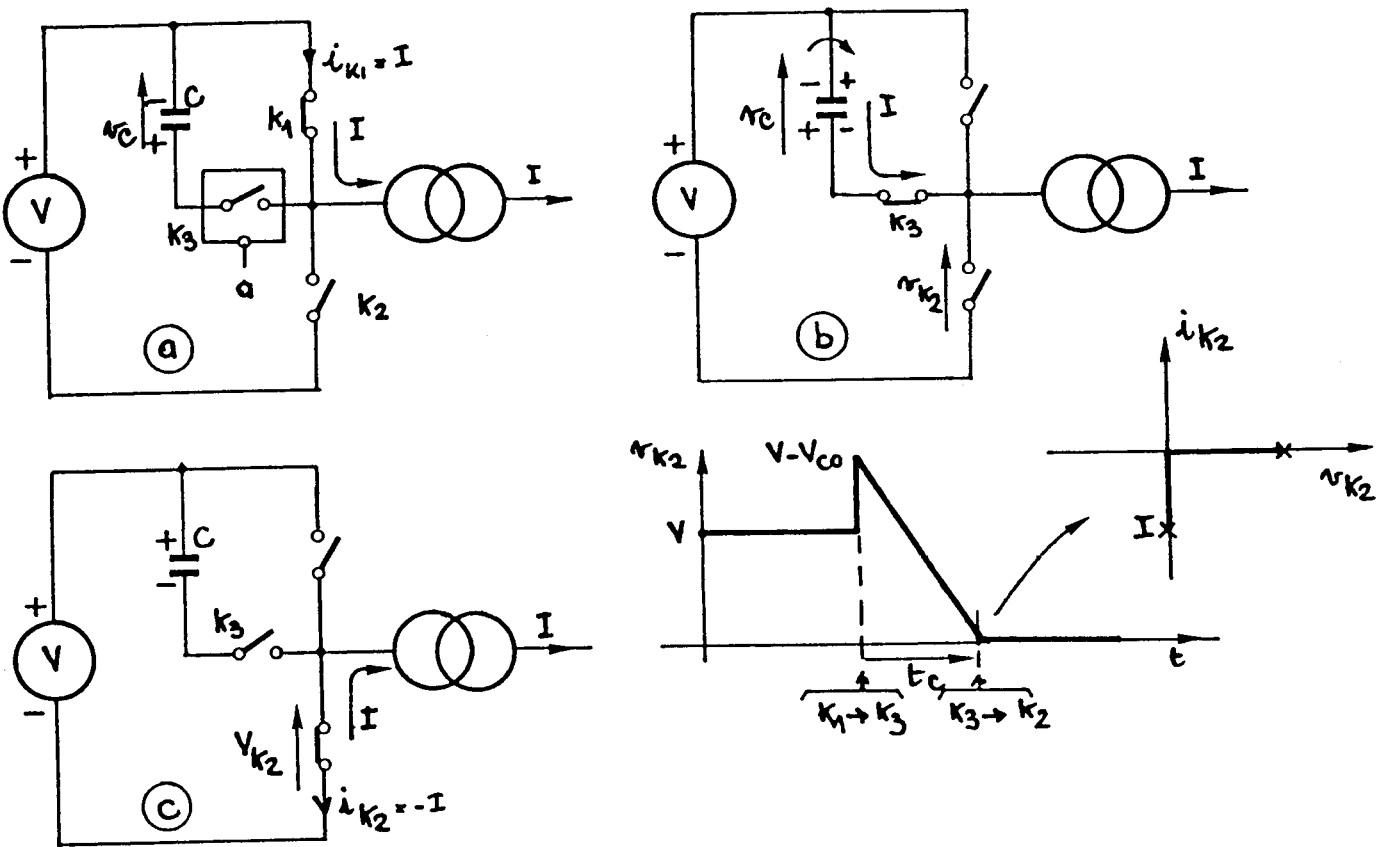


Figure 25 : principe de la commutation forcée

Le circuit auxiliaire de commutation forcée est constitué d'un interrupteur K_3 commandé à l'amorçage et d'un condensateur C préalablement chargé avec une tension V_{C0} d'amplitude et de polarité telles que la commutation $K_1 \rightarrow K_3$ soit possible par commande à l'amorçage de K_3 (figure 25a) . Cette commutation naturelle quasi-instantanée effectuée, l'interrupteur K_1 se bloque spontanément et la continuité du courant I est assurée par le condensateur C (figure 25b) . La d.d.p. aux bornes de K_2 est alors :

$$V_{K2} = V - V_{C0} - \frac{1}{C} t, \text{ fonction linéaire et croissante du temps .}$$

Quand $V_{K2} = 0$, soit au bout d'un temps $t_c = (V - V_{C0})C/I$, l'interrupteur K_2 s'amorce

spontanément, ce qui entraîne le blocage spontané de K_3 (figure 25c). Il y a commutation naturelle libre de K_2 et de K_3 .

Le circuit de la figure 25 est un circuit élémentaire de principe. La mise en œuvre de la commutation forcée entraîne l'utilisation d'éléments supplémentaires liés à la nécessité de mise en condition du condensateur avant chaque commutation, avec de nombreuses variantes. De cette présentation simplifiée nous pouvons toutefois tirer les remarques suivantes :

- La commutation forcée entraîne une complexité plus grande du circuit de la cellule de commutation et de son mécanisme de fonctionnement. Cette complexité peut avoir une influence non négligeable sur le fonctionnement du système dans son ensemble (temps de commutation considérablement accru, séquences supplémentaires de charge du condensateur).

- Elle entraîne aussi des contraintes spécifiques liées à la présence du condensateur (tensions aux bornes des interrupteurs, par exemple surtension aux bornes de K_2).

- Les interrupteurs utilisés sont, soit des thyristors (amorçage commandé, blocage spontané), soit des diodes (amorçage spontané, blocage spontané).

4/ INFLUENCE DE LA NATURE REELLE DES SOURCES.

4-1/ Position du problème

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé les sources de tension et de courant parfaites, ce qui nous a permis d'affirmer que les deux interrupteur K_1 et K_2 de la cellule élémentaire de commutation sont soumis en permanence aux relations :

$$V_{K1} + V_{K2} = V_1 - V_2 \quad \text{et} \quad I_{K1} - I_{K2} = I$$

$(V_1 - V_2)$ et I étant à l'échelle de la commutation des grandeurs constantes ou du moins lentement variables.

Dans ces conditions (très théoriques!), la durée de la commutation ne dépend que des interrupteurs et les contraintes en tension $V_{K\max}$ et courant $I_{K\max}$ auxquelles sont soumis les interrupteurs correspondent aux valeurs maximales de $(V_1 - V_2)$ et I . Mais une source de tension ne peut pas être considérée comme parfaite si elle présente une impédance interne inductive, aussi faible soit-elle. Dans ces conditions en effet, elle n'impose plus un potentiel V , mais un potentiel $v = V - L di/dt$ (figure 26a), le terme $L di/dt$, positif ou négatif, pouvant présenter une amplitude élevée en régime transitoire rapide de courant, ce qui est le cas recherché pendant la commutation.

De même une source de courant ne peut pas être considérée comme parfaite si elle possède une impédance interne capacitive. Le courant qu'elle fournit est alors: $i = I - C dv/dt$ (figure 26b). Le terme $C dv/dt$ ne peut être négligé que si C est faible et v lentement variable.

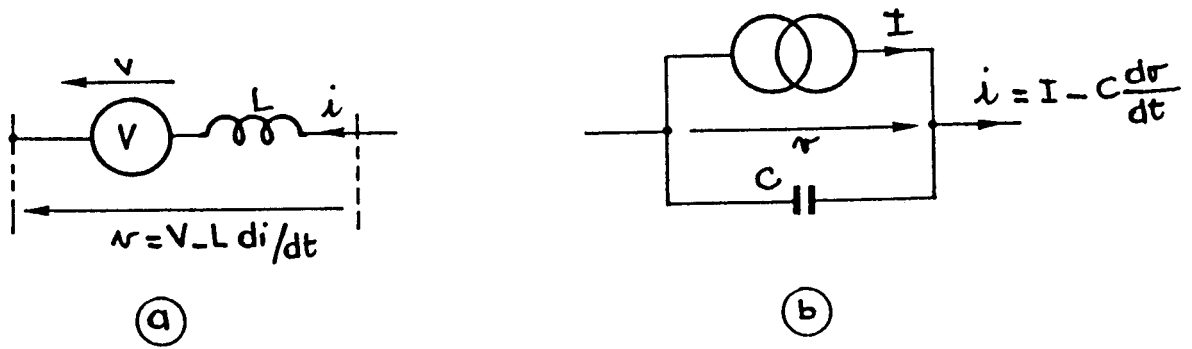


Figure 26 : sources de tension et de courant imparfaites.

C'est le premier cas que l'on rencontre le plus souvent dans les convertisseurs statiques : Les récepteurs et générateurs dont ils contrôlent les échanges d'énergie sont généralement de caractère inductif (machines électriques, réseaux de distribution, lignes d'alimentation, . . .). Dans ces conditions, l'identification de certaines sources à des sources de tension est une hypothèse souvent grossière, valable en régime lentement variable, mais non en régime de commutation .

Dans la cellule de commutation idéale que nous avons étudiée jusqu'ici, la commutation provoquait des variations brutales du courant dans les sources de tension, qui ne dépendaient que de la "rapidité" des deux interrupteurs électroniques . La possibilité d'existence d'un terme inductif dans les deux branches tension du commutateur modifie considérablement le problème : la commutation ne peut plus être supposée quasi-instantanée, la somme des tensions aux bornes des interrupteurs n'est plus imposée .

Nous devons donc procéder à une nouvelle étude de la commutation dans les conditions qui sont celles de la figure 27, où chaque branche tension présente une inductance propre l . Cette inductance se trouve alors placée entre un point de potentiel imposé et un point A de la cellule .

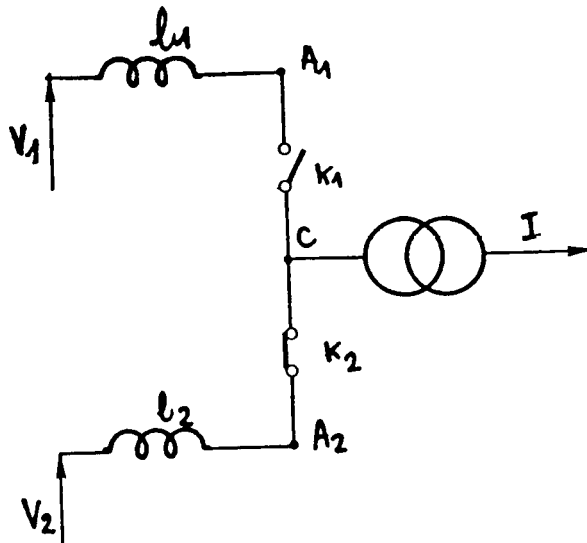


Figure 27 : cellule de commutation avec sources de tension "inductives"

La règle établie au § 3-1, relative au mode de commutation de la cellule par commande à l'amorçage ou par commande au blocage, a été obtenue en considérant l'état initial des deux interrupteurs avant la commutation et leur nouvel état lorsque celle-ci est effectivement terminée. Cette règle est toujours valable : elle précise le seul mode de commande qui puisse être envisagé pour les interrupteurs de la cellule dans les conditions qu'impose le circuit. Mais il nous faut maintenant étudier si la présence d'inductances permet effectivement la commutation dans les deux modes de commande envisageables.

4-2/ Commande à l'amorçage avec sources de tension inductives.

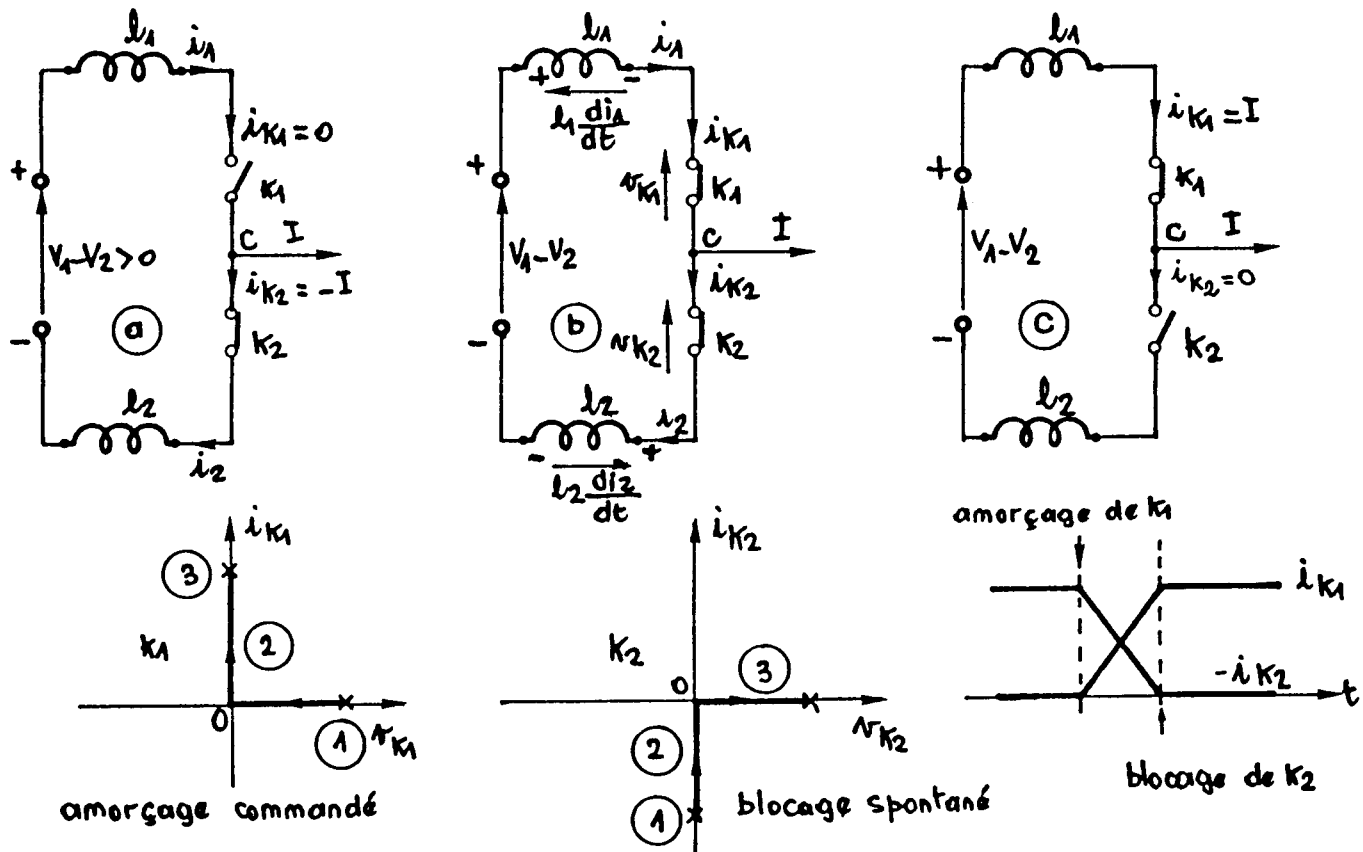


Figure 28 : commutation à l'amorçage avec des branches tension inductives.

Initialement l'interrupteur K_1 est bloqué, K_2 passant. Les polarités de la source de courant I et de la d.d.p. ($V_1 - V_2$) sont telles que commutation et courant ont même signe, par exemple $V = V_1 - V_2 > 0$, $I > 0$ (figure 28a). La commutation naturelle, si elle est possible, ne peut se faire que par commande à l'amorçage de K_1 .

L'amorçage de K_1 entraîne son basculement à l'état passant, mais les inductances s'opposant à une variation rapide de i_1 et i_2 , la conséquence immédiate est seulement l'effondrement de la tension aux bornes de K_1 , qui passe quasi-instantanément de l'état ($v_{k1}=V$, $i_{k1}=0$) à l'état ($v_{k1}=0$, $i_{k1}=0$). Les interrupteurs K_1 et K_2 se trouvent alors tous deux simultanément à l'état passant, ce qui correspond à la mise en court-circuit des voies 1 et 2 (figure 28b). On peut alors écrire:

$$V_1 - l_1 \frac{di_1}{dt} - V_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} = 0$$

$$i_{k1} - i_{k2} = I \quad \frac{di_{k1}}{dt} = \frac{di_1}{dt} \quad \frac{di_{k1}}{dt} = \frac{di_1}{dt}$$

$$\text{d'où} \quad \frac{di_{k1}}{dt} = \frac{di_{k2}}{dt} = (V_1 - V_2) / (l_1 + l_2) \quad \text{avec } (V_1 - V_2) > 0$$

Le courant i_{k1} s'établit en augmentant d'autant plus lentement que $(l_1 + l_2)$ est plus élevée. Simultanément, le courant i_{k2} tend vers zéro. La commutation est terminée dès lors que le passage par zéro de i_{k2} entraîne le blocage spontané de K_2 (figure 29c).

La commutation à l'amorçage dans le cas de sources de tension inductives est donc tout à fait possible, mais elle entraîne les conséquences suivantes :

- La durée de la commutation est directement liée à l'importance des inductances l (problème temporel du transfert de l'énergie électromagnétique des inductances). Si ce temps de commutation est élevé, il peut être nécessaire de l'introduire systématiquement comme une séquence particulière de fonctionnement du convertisseur (ce qui revient à tenir compte des inductances l au moins pendant les commutations).

- Le potentiel du point C pendant la commutation est $v_C = (V_1 + V_2)/2$.

Remarques:

- L'amplitude des di/dt du courant dans les interrupteurs au moment de la commutation est limitée par les inductances l : aussi, lorsque les sources de tension sont quasiment parfaites et la commutation très rapide, des "*inductances de commutation*" sont placées en série avec les interrupteurs et réduisent les contraintes dynamiques, au prix il est vrai d'un temps de commutation plus important. Les pertes à l'amorçage de l'interrupteur commandé sont de plus très fortement réduites (la figure 28 montre que la caractéristique dynamique de K_1 suit les axes). On peut parler de *commutation douce*.

- Ce type de commutation est souvent appelé: "*commutation naturelle avec empiètement*" pour tenir compte du fait que la commutation n'est pas instantanée et que, pendant toute sa durée, les deux interrupteurs de la cellule conduisent simultanément.

-Dans le cas d'une cellule à plus de deux voies, on peut rencontrer, si la durée de commutation est très importante, des *empiètements multiples* : des commutations successives se chevauchent entraînant la conduction simultanée de plusieurs interrupteurs.

4-3/ Commande au blocage avec sources de tension inductives.

Considérons la cellule élémentaire de la figure 29. Initialement l'interrupteur K_1 est bloqué, K_2 passant. Les polarités du courant I et de la d.d.p. (V_1-V_2) sont telles que commutation et courant sont de signes contraires, par exemple $V_1-V_2 > 0, I < 0$. La commutation naturelle, si elle est possible, ne peut se faire que par la commande au blocage de K_2 .

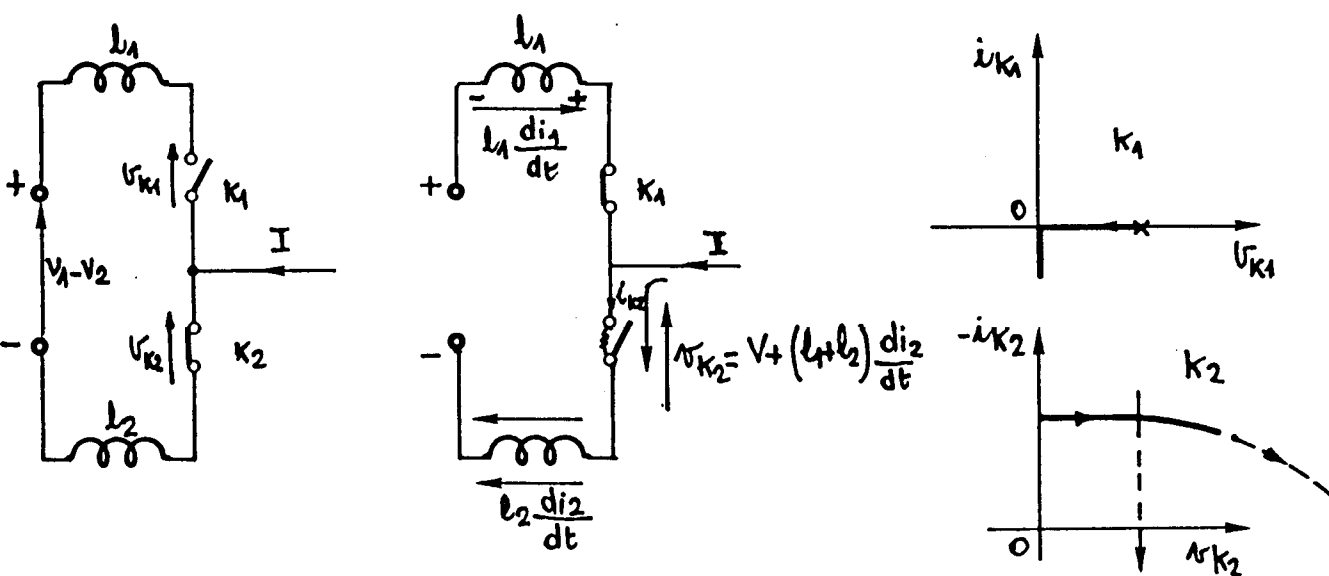


Figure 29 : commande au blocage avec des branches tension inductives.

I étant supposé constant, ou du moins lentement variable, les inductances L ne jouent aucun rôle tant que K_1 reste bloqué. La commande au blocage de K_2 entraîne une augmentation extrêmement rapide de la tension à ses bornes, accompagnée de l'effondrement quasi-instantané de la tension V_{K1} . Dès que $V_{K1} = 0$, il y a amorçage spontané de K_1 . Mais la continuité du courant I est toujours assurée par K_2 dont le blocage est lié au passage par zéro du courant i_{K2} . Le problème est alors celui de l'ouverture d'un circuit inductif, ouverture qui ne peut se faire qu'au prix d'une surtension incontrôlable aux bornes de l'interrupteur K_2 que traduit le cycle hypothétique de la figure 29. Un tel fonctionnement est d'une manière générale inadmissible pour un interrupteur électronique.

Nous pouvons en conclure que la commutation naturelle avec commande à l'ouverture est

impossible si les sources de tension sont inductives, et ceci malheureusement même pour de faibles valeurs des inductances .

Quelles sont alors les solutions qui peuvent être envisagées chaque fois que les règles imposent une commande au blocage ?

Elles sont de deux types .

4-3-1/ Découplage de la cellule de commutation

Cette solution est envisageable lorsque les propriétés de la source sont effectivement très proches de celles d'une source de tension parfaite et qu'il s'agit donc d'éviter les surtensions dues à la présence de faibles inductances "parasites" dans les branches des interrupteurs .

C'est le cas des sources de tension continue telles que les batteries d'accumulateurs (faible inductance interne et conducteurs de liaison), ou même la sortie d'un filtre L-C (condensateur chimique = faibles performances transitoires) (figures 30a et 30b) .

C'est aussi le cas de sources alternatives capacitatives (circuit résonnant parallèle - figure 30c)

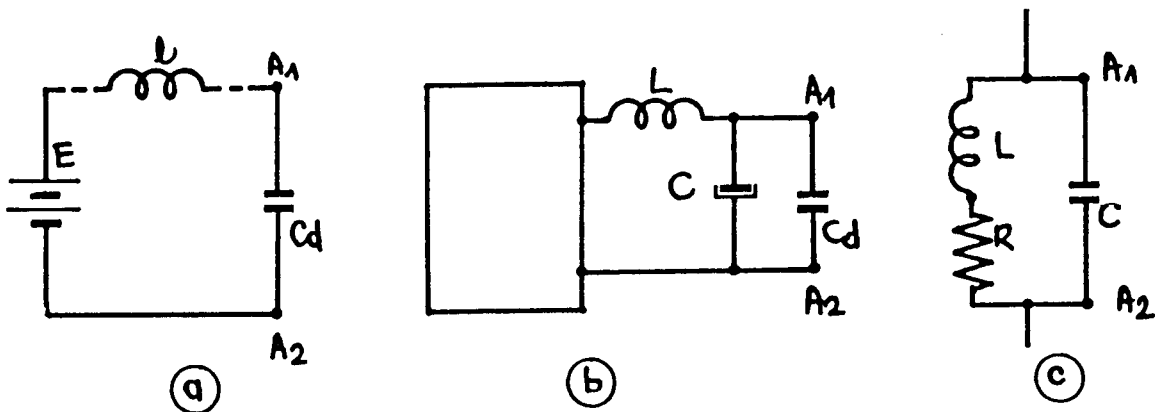


Figure 30 : sources de tension presque parfaites

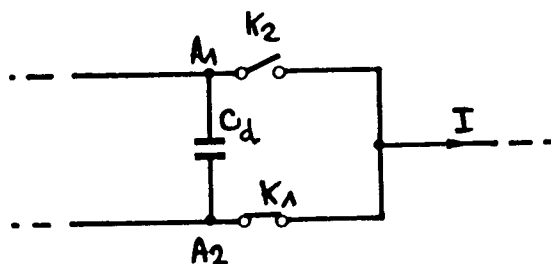


Figure 31: découplage de la cellule

Un condensateur est alors placé directement et au plus près entre les bornes A_1 et A_2 de la cellule (figure 31). A l'ouverture de l'interrupteur commandé au blocage, le condensateur assure la continuité immédiate du courant installé dans l'inductance L . Il n'y a plus ouverture d'un circuit inductif et la surtension qui apparaît cependant aux bornes du condensateur (donc aux bornes de l'interrupteur) peut être limitée à des valeurs acceptables .

Les interrupteurs sont alors amenés à fonctionner dans des conditions qui sont celles de la commutation naturelle .

Mais la commande à l'ouverture présente des difficultés certaines et sera toujours beaucoup

plus difficile à maîtriser dans sa mise en œuvre que la commande à la fermeture . Le nombre de cas où elle est facilement applicable est limité et les contraintes sur l'interrupteur commandé sont importantes.

4-3-2/ Circuits de commutation forcée

La solution du découplage ne peut pas être utilisée dès lors que la présence des condensateurs modifie les propriétés et le comportement intrinsèques des sources (phénomènes de résonance, déphasage...), surtout si les inductances ne sont pas à proprement parler des inductances parasites mais font partie intégrante de la structure physique des sources (machines électriques) . Cela englobe pratiquement tout le domaine des sources alternatives d'origine inductive qui sont en toute rigueur des sources de courant (dipôle avec inductance série) .

La commutation par commande au blocage étant impossible, on est donc amené à modifier la structure de la cellule élémentaire de manière à réaliser effectivement la fonction désirée en permettant l'évolution rapide des courants dans les inductances, tout en limitant les surtensions .

On a alors recours à un circuit annexe de **commutation forcée** .

La structure élémentaire, représentée sur la figure 32, est la même que celle du S 3-4, établie dans le cas de sources de tensions parfaites : un condensateur C initialement chargé à la tension V_{C0} avec la polarité indiquée, en série avec un interrupteur K_3 commandé à l'amorçage, est placé en parallèle sur l'interrupteur K_1 dont on veut effectuer le blocage . L'amorçage de K_3 provoque l'ouverture spontanée de K_1 et le condensateur C assure la continuité du courant I . L'interrupteur K_2 voit alors la tension à ses bornes évoluer en fonction du temps suivant la relation :

$$V_{K2} = V - V_C = V - V_{C0} - I/Ct$$

Quand $V_{K2}=0$, l'interrupteur K_2 s'amorce spontanément . Mais cet amorçage ne provoque pas le blocage spontané de K_3 , ce qui est le cas lorsque l'on suppose les sources de tension parfaites. En effet, ce blocage est lié au passage par zéro du courant dans le condensateur C, lequel est lié au courant dans l'inductance I : suivant le point où se referme la source de courant I, nous avons soit $i_C = i_1$, soit $i_C = i_1 + I$. L'évolution du courant i_1 est imposée par la maille V, L, C qui constitue un circuit du second ordre .

Si l'on suppose l'amortissement de ce circuit négligeable, le courant I et la tension V constants (variation très lente devant le temps de commutation) et compte tenu de la condition initiale $V_C = V$, le courant i_C est solution de l'équation différentielle :

$$LC \frac{d^2 i_C}{dt^2} = i_C \quad \text{avec la condition initiale } i_{C0} = I, \text{ soit:}$$

$$i_C = I \cos \omega t \quad \text{avec } LC\omega^2 = 1$$

Le courant i_C s'annule après un quart de la période propre du circuit oscillant (figure 32) .

L'interrupteur K_3 se bloque

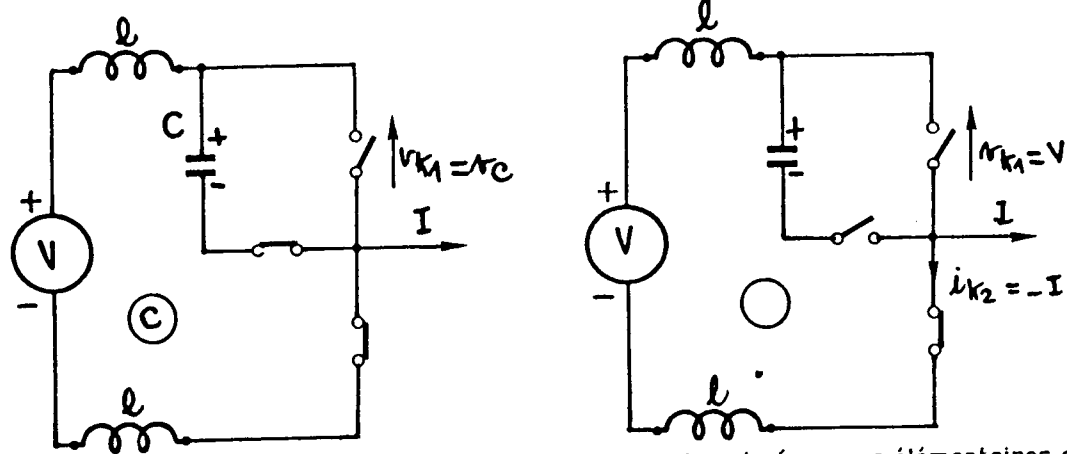
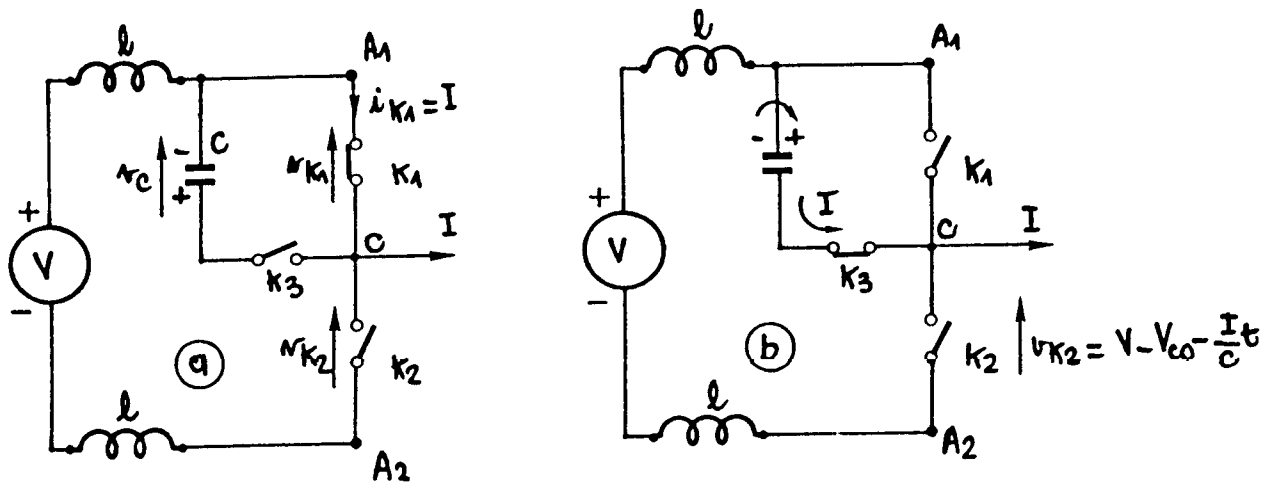


Figure 32 : principe et séquences élémentaires de la commutation forcée avec branches de tension inductives

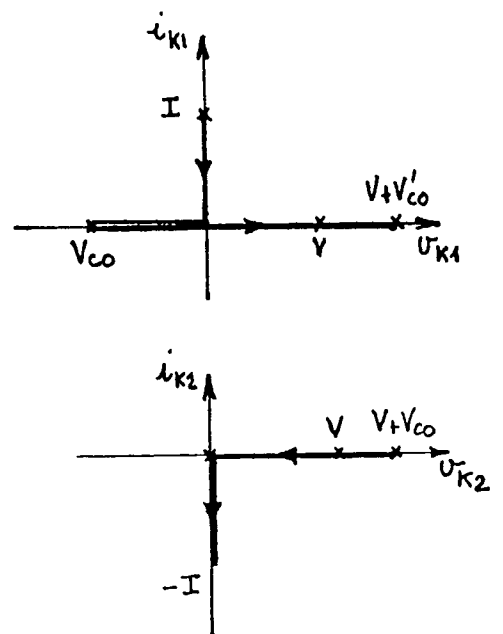
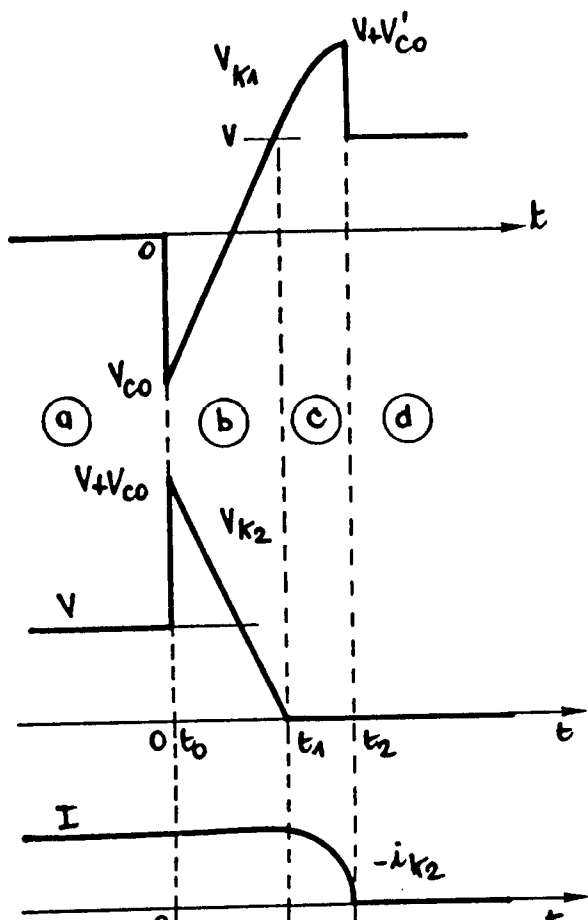


Figure 33 : Tensions et courants des interrupteurs principaux lors d'une commutation forcée. Cycles correspondants.

En résumé, une commutation forcée peut se décomposer en deux séquences principales :

1ère séquence :

- L'amorçage de l'interrupteur auxiliaire provoque le blocage de l'interrupteur principal . C'est une commutation naturelle instantanée (de durée négligeable devant le temps total de commutation) .

Le condensateur se charge à courant constant . La condition $V_C = V$ réalisée au bout d'un temps $t_1 = (V - V_{C0})C/I$ entraîne l'amorçage du deuxième interrupteur principal . Fin de la première séquence .

2ème séquence :

- La fermeture de K_2 crée une maille oscillante LC qui au bout d'un quart de période d'oscillation annule le courant dans l'interrupteur auxiliaire K_3 , lequel se bloque . Il y a donc eu entre K_2 et K_3 commutation naturelle libre avec empiètement de durée $t_2 = \pi\sqrt{LC}/2$. Fin de la deuxième séquence .

Quelles sont les propriétés fondamentales de la commutation forcée ?

Interrupteurs : Elle ne met en jeu que des interrupteurs à amorçage commandé ou spontané et à blocage spontané . Selon leur cycle global on les identifiera donc à des diodes (amorçage spontané , blocage spontané) ou à des thyristors (amorçage commandé, blocage spontané) .

Ces interrupteurs peuvent avoir à supporter des contraintes en tension plus sévères . La figure 33 montre les tensions aux bornes des interrupteurs K_1 et K_2 au cours de la commutation dans la structure de base envisagée ici : l'amplitude maximale de la tension est $V + V_{C0}$.

Durée de la commutation : Elle peut être très élevée et constituer un obstacle important au fonctionnement des convertisseurs à fréquence élevée . Elle est fonction de plusieurs paramètres : valeurs de L et C, amplitudes du courant I et des tensions V et V_{C0} .

Condensateur : Son dimensionnement, effectué à partir des paramètres précédents, nécessite un compromis entre une bonne sécurité de fonctionnement (temps minimal d'application de tension inverse aux bornes des thyristors) et une durée minimale de la commutation .

Le circuit étudié ci-dessus est un circuit théorique élémentaire qui a pour seul but de dégager le principe de base de la commutation forcée . Sa mise en œuvre pratique dans un convertisseur conduit le plus souvent à un circuit plus complexe, pouvant d'ailleurs admettre de multiples variantes. Cette complexité répond soit à une nécessité (circuits de précharge ou d'inversion de polarité des condensateurs), soit à une optimisation des performances (rapidité de commutation, sécurité de fonctionnement, diminution des pertes) . Une étude plus complète de la commutation forcée sera donc effectuée de manière spécifique dans la suite de cet ouvrage .

5/ CONCLUSION

Ce chapitre a permis de mettre en évidence les règles fondamentales qui régissent la commutation dans les convertisseurs . L'application de ces règles, compte tenu des conditions de fonctionnement imposées par un convertisseur donné, permet de déterminer le mode de commutation de chacune de ses cellules élémentaires . La caractérisation des interrupteurs qui les constituent en découle immédiatement . La structure générale théorique du convertisseur est alors complètement connue . Le problème qui se pose ensuite est celui de la mise en œuvre de composants interrupteurs réels, susceptibles de répondre effectivement aux critères imposés :

- critères de fonctionnement: caractéristiques statique et dynamique
- critères de dimensionnement: contraintes électriques nominales ou maximales.

Si aucun composant naturel ou de synthèse n'est susceptible de répondre directement à ces critères, il faut soit avoir recours à la commutation forcée, effectuer le choix du circuit de commutation le mieux adapté à la structure du convertisseur et caractériser les interrupteurs qui le constituent, soit envisager une autre structure de convertisseur, répondant au même cahier des charges.

Remarquons qu'un critère très important sur le plan pratique est celui de la rapidité de commutation . Elle conditionne en effet la possibilité de fonctionnement des convertisseurs à des fréquences élevées . Les progrès des semiconducteurs, liés aux possibilités accrues qu'apportent les composants de synthèse (thyristor dual par exemple), associés à une utilisation judicieuse soit de la commutation naturelle soit de la commutation forcée, permettent une extension toujours plus grande du domaine de fréquence accessible .

Dans tous les cas, la commutation impose aux interrupteurs des contraintes dynamiques plus ou moins importantes qui amènent le concepteur à une analyse plus approfondie des phénomènes qui l'accompagnent sur le plan local . Cette analyse prend essentiellement en compte des critères liés à la fiabilité et au rendement des équipements, d'autant plus importants d'ailleurs que la fréquence de fonctionnement est plus élevée . Cette analyse, essentiellement liée aux composants semiconducteurs utilisés, permet de mettre au point des méthodes susceptibles de les faire travailler dans des conditions optimales, compte tenu de leurs propriétés physiques (tenue aux dv/dt et di/dt par exemple) . Elle peut amener à associer aux interrupteurs des réseaux de composants électriques passifs plus ou moins complexes constituant les circuits d'aide à la commutation . Ces circuits, assez simples dans le cas des diodes et des thyristors, sont généralement plus élaborés lorsqu'il s'agit d'éléments blocables (transistors, G.T.O., ..., composants de synthèses) .