

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.

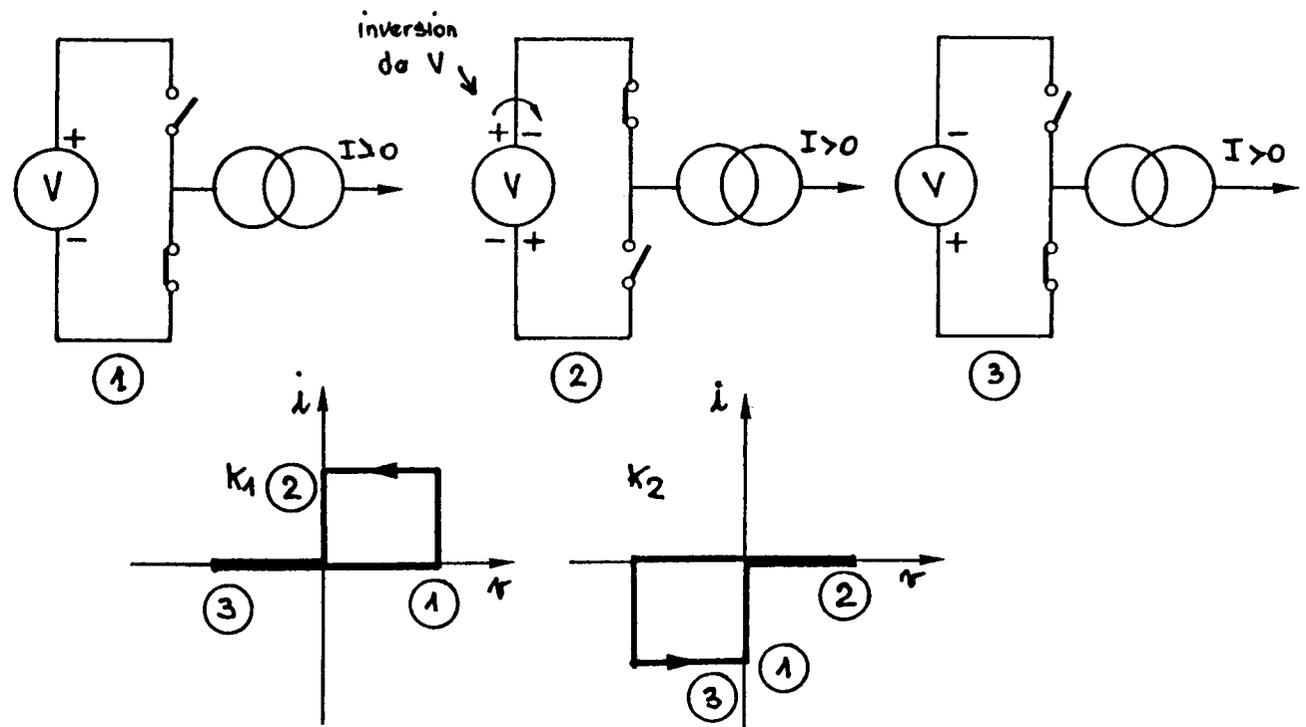


Figure 20 : la tension change de signe entre chaque commutation.

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).

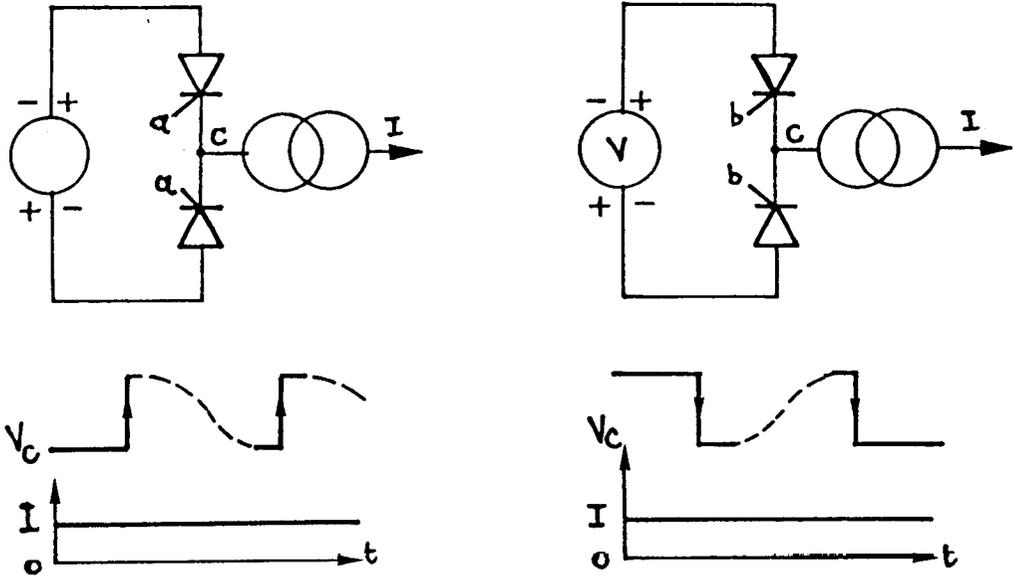
Le signe de la tension ayant changé, la commutation suivante sera à nouveau positive. Il y a donc à nouveau commutation par commande à l'amorçage de l'interrupteur ouvert (soit  $K_2$ ).

En conséquence, les deux interrupteurs sont tous deux commandés à l'amorçage et à blocage spontané. Ils sont du même type (thyristor), ce que confirme 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) .

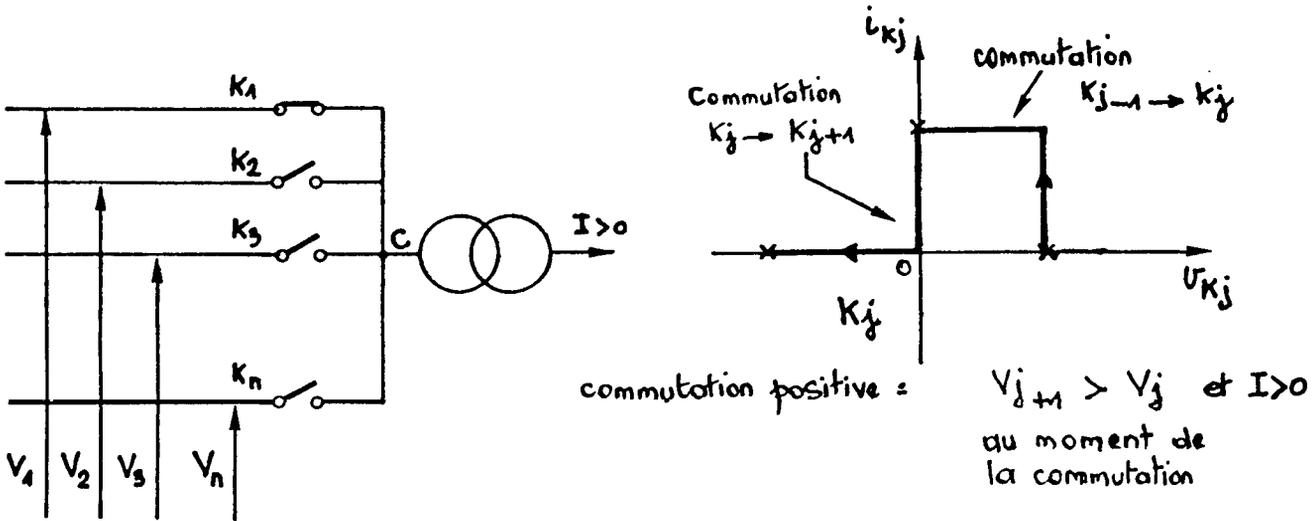


Figure 22 : Cellule polyphasée

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.

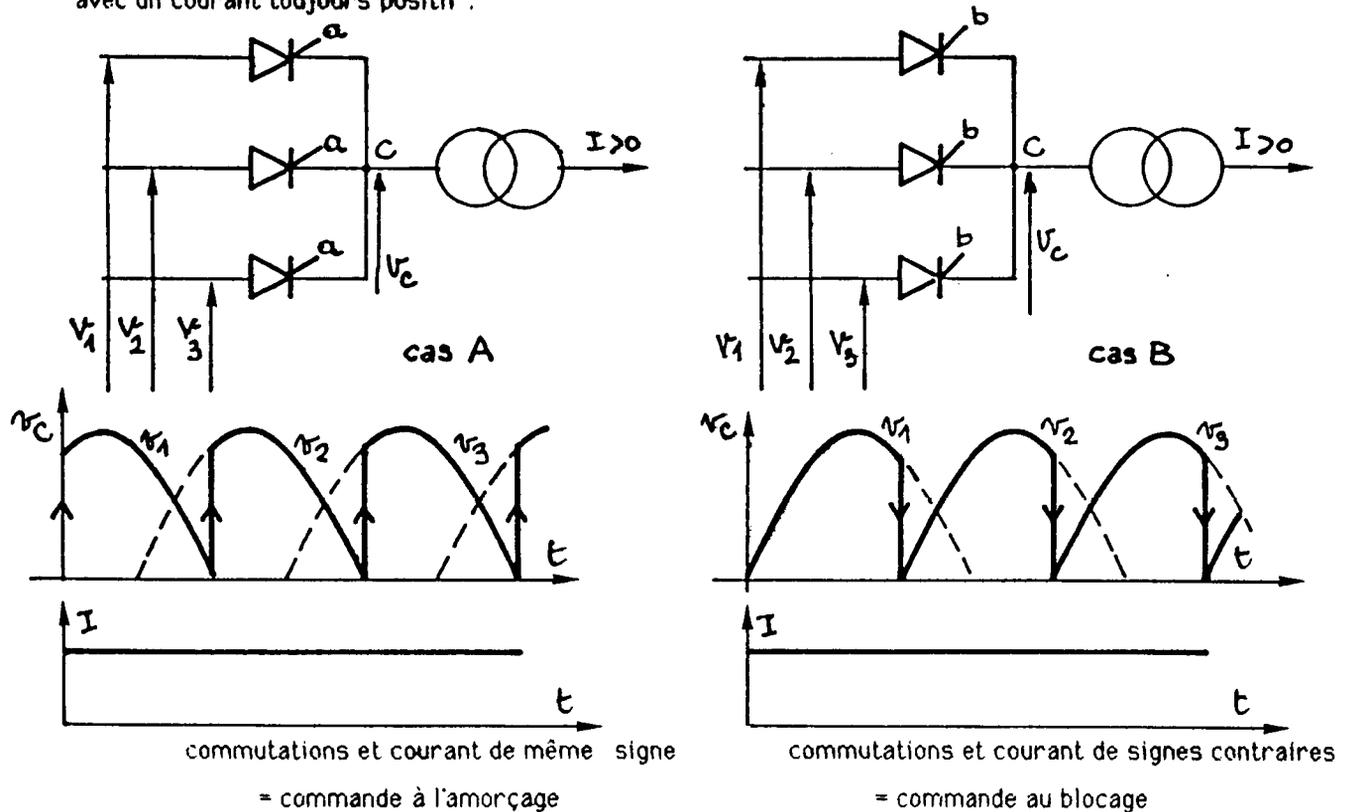


Figure 23

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  $\pm E$ .

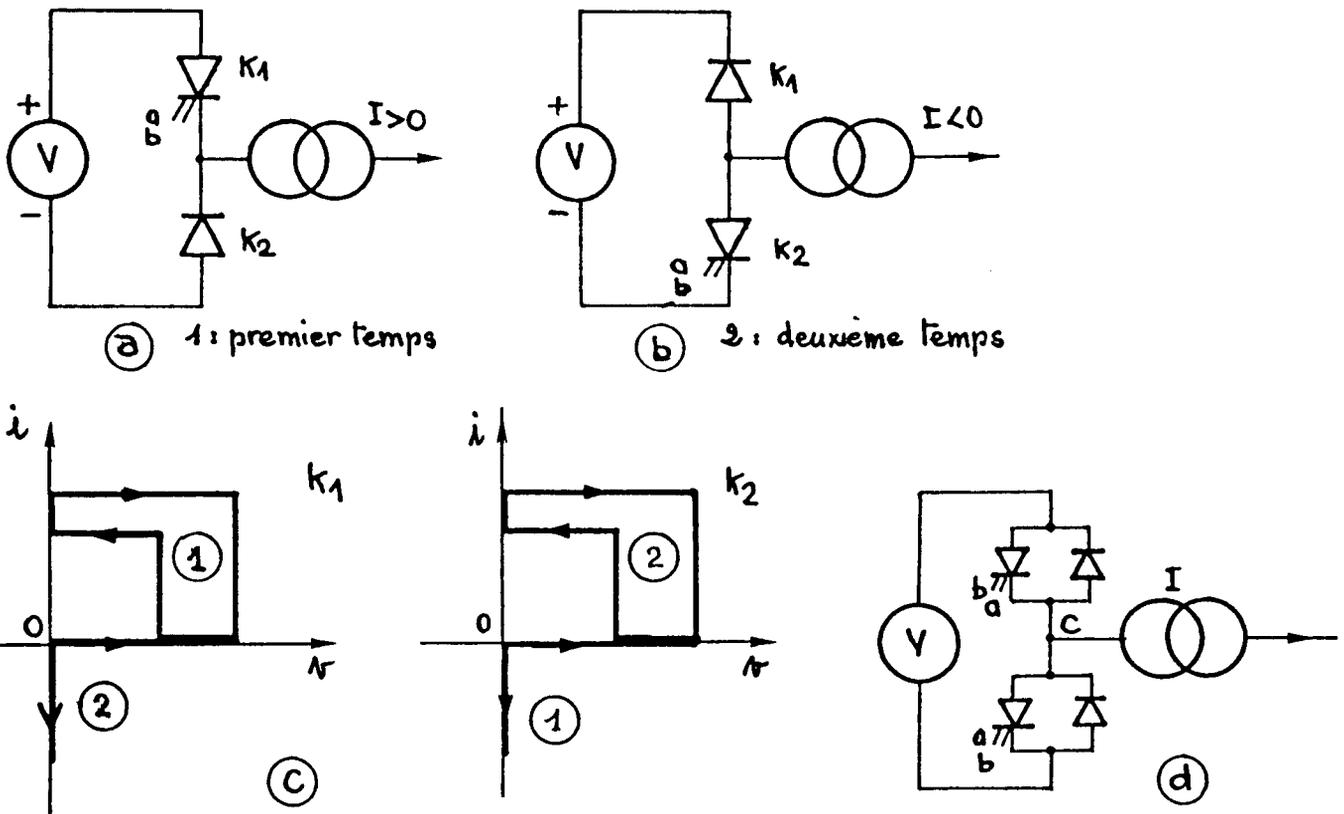


Figure 24 : Cellule de commutation asymétrique réversible en courant.

### 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 FORCÉE** .

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 .

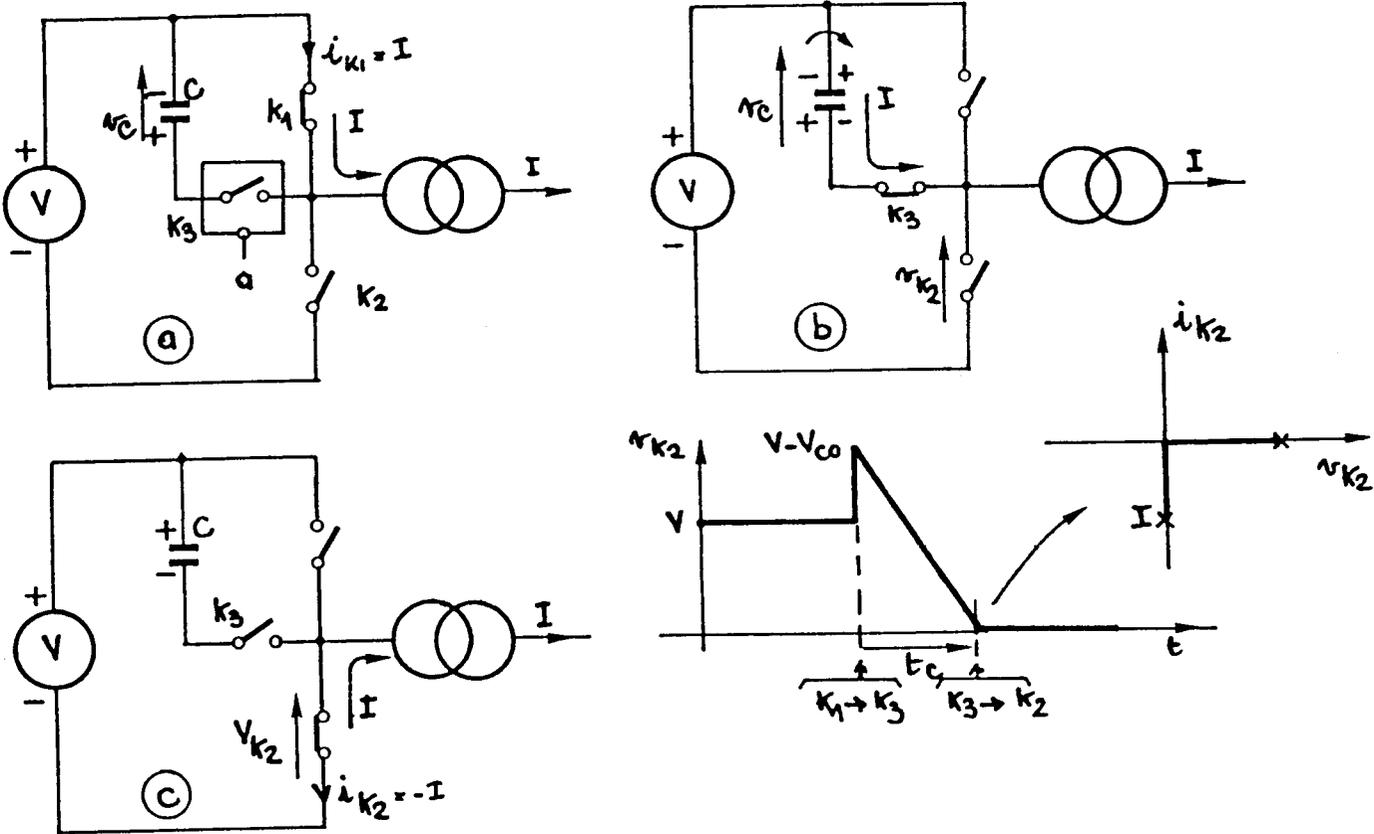


Figure 25 : principe de la commutation forcée

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.

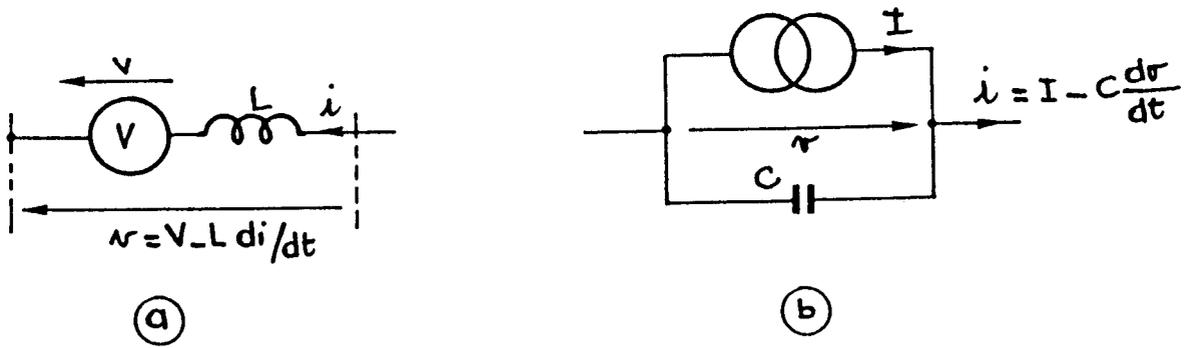


Figure 26 : sources de tension et de courant imparfaites.

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 .

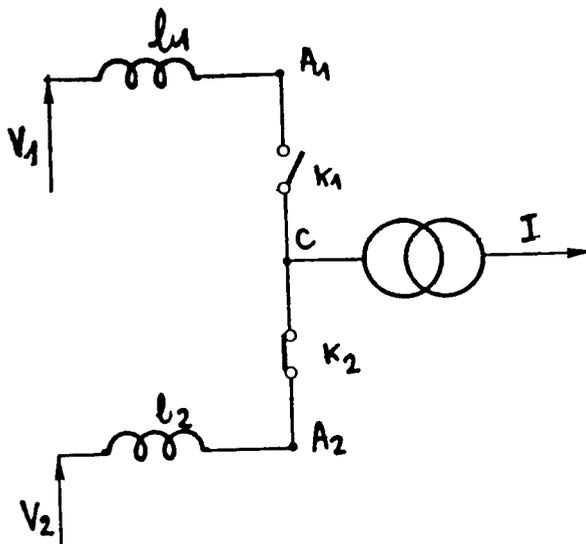


Figure 27 : cellule de commutation avec sources de tension "inductives"

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.

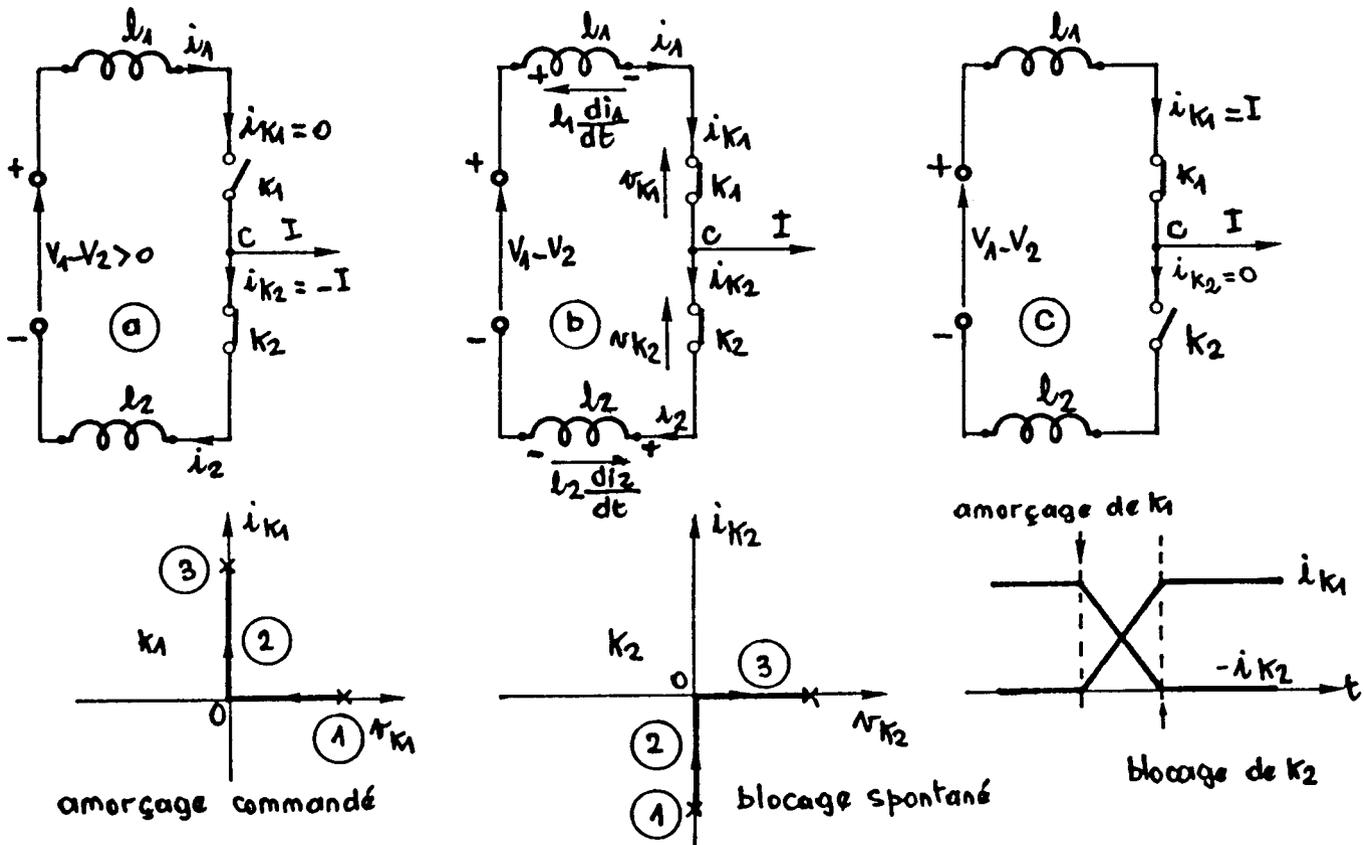


Figure 28 : commutation à l'amorçage avec des branches tension inductives.

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:

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

$$i_{k1} - i_{k2} = I \quad \frac{di_{k1}}{dt} = \frac{di_1}{dt} \quad \frac{di_{k2}}{dt} = \frac{di_2}{dt}$$

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

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  $K_2$  .

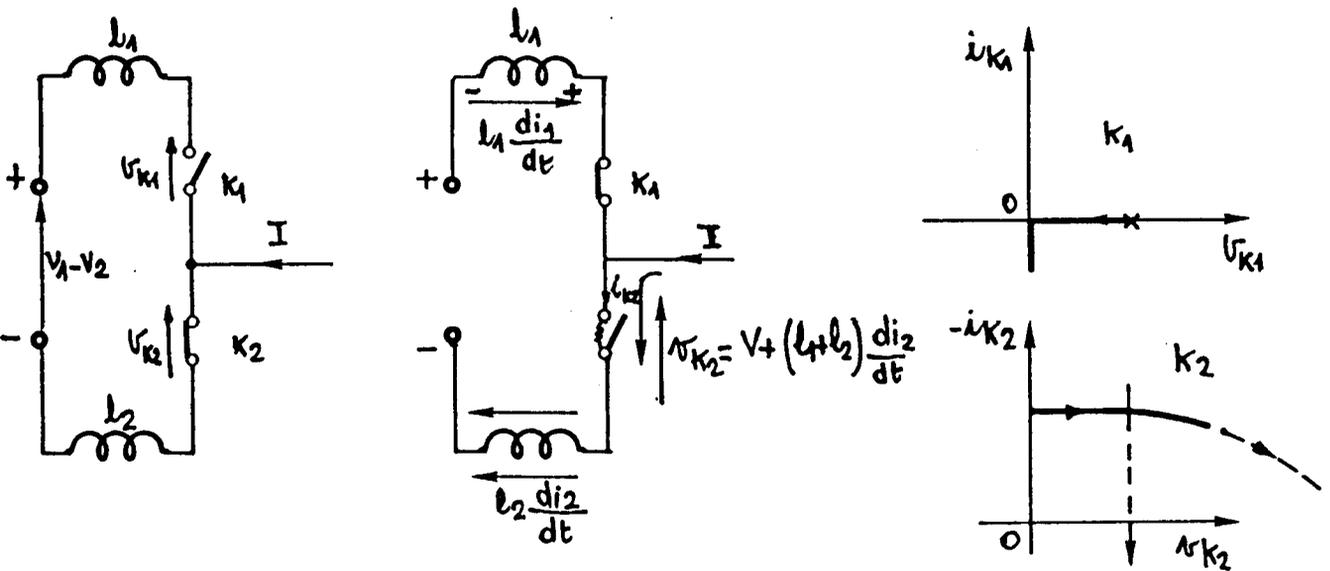


Figure 29 : commande au blocage avec des branches tension inductives.

$I$  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  $v_{K_1}$  . Dès que  $v_{K_1} = 0$ , 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  $i_{K_2}$  . 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 capacitives (circuit résonnant parallèle - figure 30c)

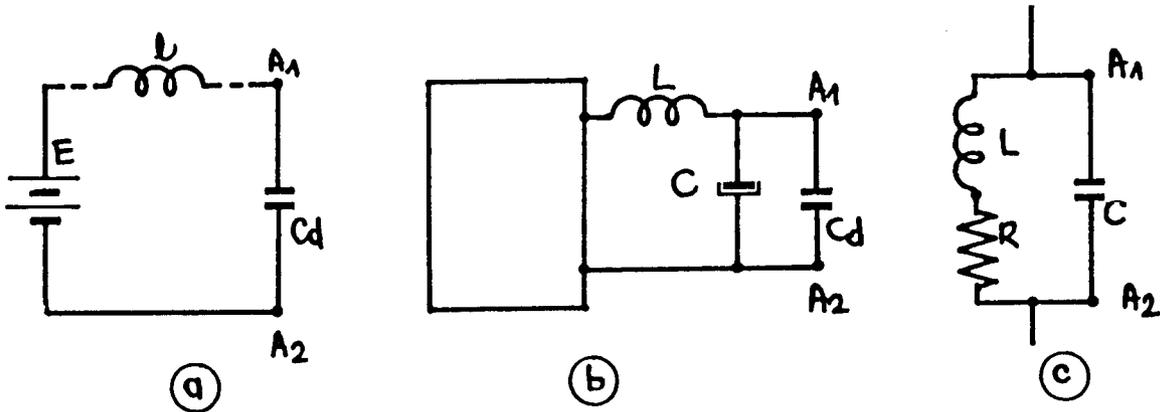


Figure 30 : sources de tension presque parfaites

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 .

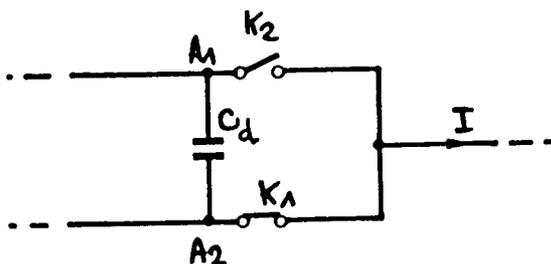


Figure 31: découplage de la cellule

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 § 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

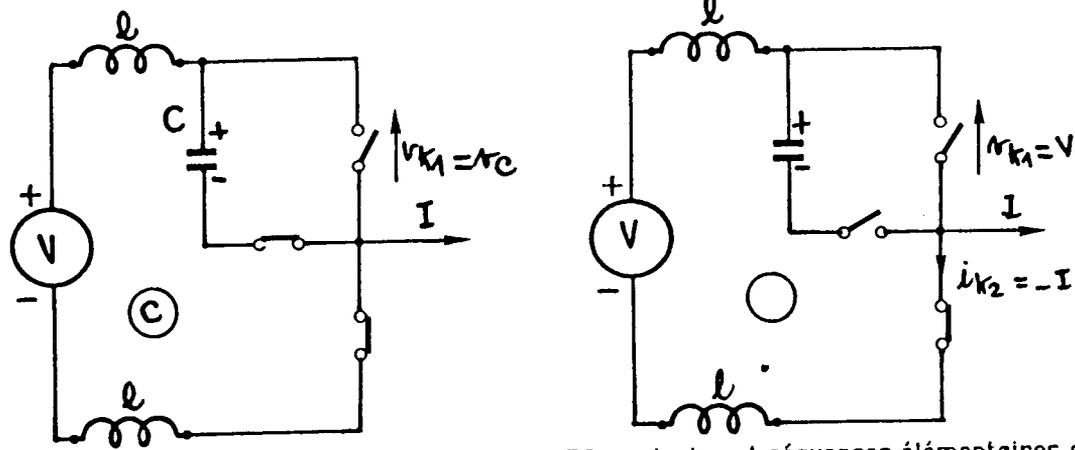
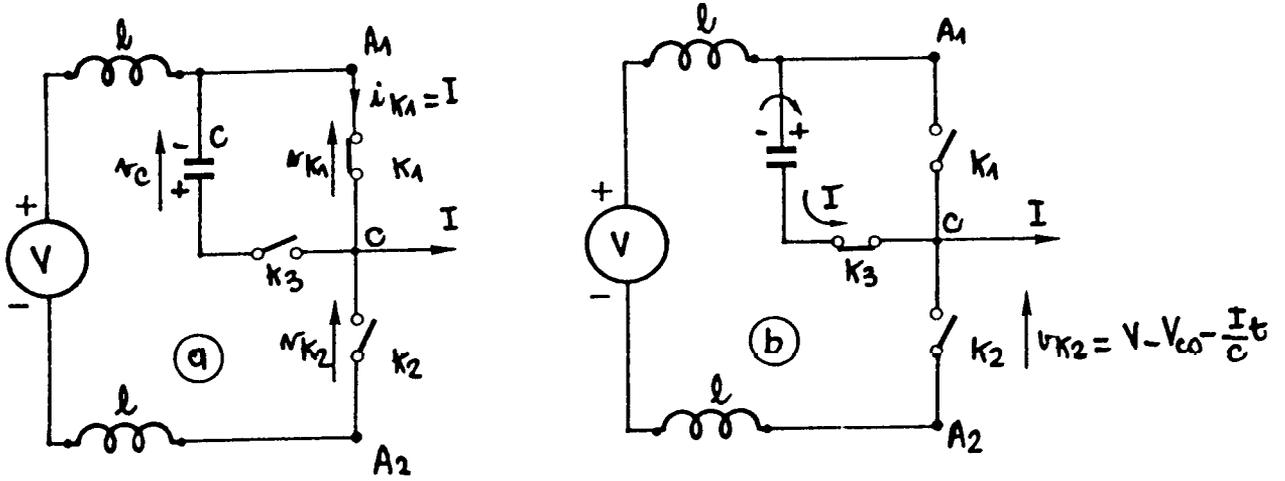


Figure 32 : principe et séquences élémentaires de la commutation forcée avec branches de tension inductives

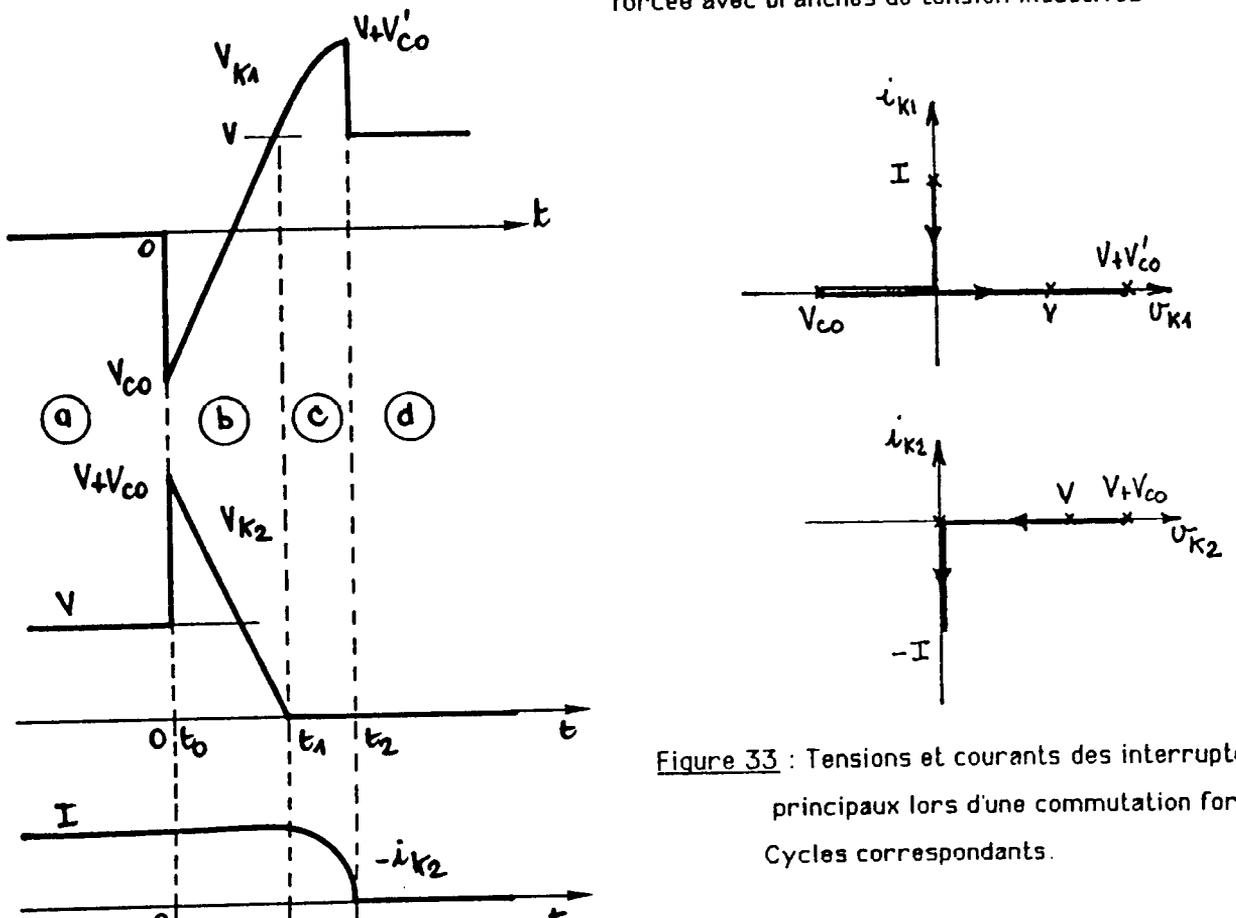


Figure 33 : Tensions et courants des interrupteurs principaux lors d'une commutation forcée. Cycles correspondants.

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) .