

A 4 0

**ELEMENTS CONSTITUTIFS ET SYNTHESE
DES CONVERTISSEURS STATIQUES**

ELEMENTS CONSTITUTIFS ET SYNTHESE

DES CONVERTISSEURS STATIQUES

1/ INTRODUCTION

L'objectif est de réaliser, à partir de la connaissance d'un cahier des charges, la synthèse de la structure d'un convertisseur statique. Il s'agit donc de retrouver, & d'une façon purement logique et sans faire appel aux habitudes, les structures des convertisseurs connus et de découvrir de nouvelles structures à partir de ce même raisonnement logique.

Avant d'énoncer les lois auxquelles doivent obéir les convertisseurs statiques, il est nécessaire de répondre à la question : qu'est-ce qu'un convertisseur statique ?

Un convertisseur statique est un montage utilisant des interrupteurs à semi-conducteurs permettant par une commande convenable de ces derniers de régler un transfert d'énergie entre un générateur et un récepteur. Ce transfert pourra être, dans certains cas, réversible. Pour tenir compte de cette réversibilité, les termes de source d'entrée et de source de sortie remplaceront ceux de générateur et de récepteur. En effet, lors d'un fonctionnement réversible, la source de sortie peut jouer le rôle de générateur et la source d'entrée celui de récepteur.

Le problème de la synthèse d'un convertisseur statique se posera donc de la manière suivante:

On désire effectuer un certain type de conversion d'énergie entre une source d'entrée et une source de sortie définies par le cahier des charges.

Pour cela il faut déterminer :

1/ La structure du convertisseur, c'est-à-dire le nombre et la place des interrupteurs ainsi que la présence ou non d'un ou plusieurs élément de stockage (inductance ou condensateur).

2/ Les caractéristiques statiques et les caractéristiques de commutation des interrupteurs

On en déduira alors le schéma du convertisseur.

Pour réussir ce travail, il faut bien entendu posséder un minimum de connaissance sur les interrupteurs statiques et il faut savoir caractériser parfaitement les sources d'entrée et de sortie

Nous allons d'abord rappeler ces notions.

2/ ETUDE FONCTIONNELLE DES INTERRUPTEURS

Les interrupteurs à semiconducteur ont un fonctionnement basé sur la propriété d'unidirectionnalité en courant et en tension de la jonction PN. L'association de plusieurs jonctions permet de multiplier leurs possibilités. Dans tous les cas, un interrupteur est susceptible de présenter deux états stables en **régime statique** :

- **L'état passant (ON)** : l'interrupteur est dit conducteur, ou fermé, ou amorcé ;
- **L'état bloqué (OFF)** : l'interrupteur est dit non conducteur, ou ouvert, ou bloqué ;

Le passage d'un état à l'autre, (le "basculement" de l'interrupteur), implique un fonctionnement transitoire en **régime dynamique**, fonctionnement complexe car il dépend d'une part des conditions imposées par le circuit extérieur et d'autre part de la manière dont on peut éventuellement agir sur sa structure interne (par l'intermédiaire d'un circuit de commande) pour "forcer" son basculement.

2-1/ Régime statique

En régime statique, l'interrupteur se comporte comme une résistance non linéaire, très faible à l'état passant, très élevée à l'état bloqué.

Considéré comme un dipôle avec des conventions récepteur (figure 1), sa caractéristique statique $I_k(V_k)$ qui représente l'ensemble des points de fonctionnement de l'interrupteur, comporte deux branches situées entièrement dans les deux quadrants tels que $V_k \cdot I_k > 0$, l'une très proche de l'axe des I_k (état passant), l'autre très proche de l'axe des V_k (état bloqué), chacune de ces branches pouvant être unidirectionnelle.

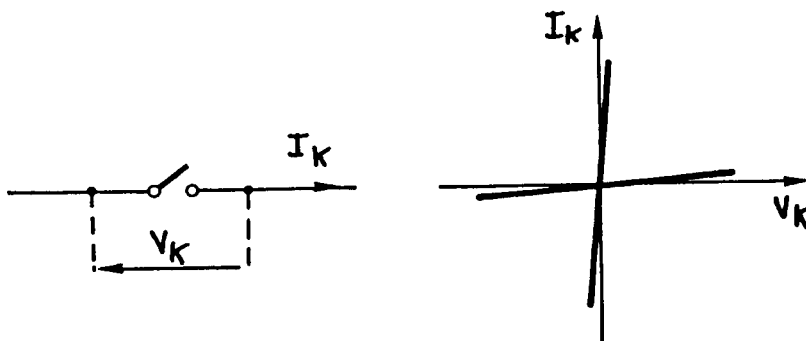


Figure 1 : caractéristique statique d'un interrupteur

Si l'on idéalise l'interrupteur, on peut confondre la caractéristique statique avec les demi-axes dont elle est voisine.

Dans cette représentation, hormis les cas triviaux du court-circuit et du circuit ouvert, qui correspondent respectivement à un interrupteur constamment fermé et un interrupteur constamment ouvert, tout interrupteur qui assure véritablement sa fonction a une caractéristique qui comporte au

moins deux demi-axes (ou segments) orthogonaux.

La caractéristique statique, *qui est une propriété intrinsèque de l'interrupteur*, peut dans le cas des interrupteurs à semiconducteurs, se réduire à un certain nombre de segments du plan $I_K(V_K)$.

Caractéristique statique à deux segments : l'interrupteur est unidirectionnel en tension et en courant. On distingue deux caractéristiques statiques à deux segments.

- pour l'une, tension V_K et courant I_K sont toujours de mêmes signes. C'est par exemple la caractéristique statique d'un transistor T (figure 2).

- pour l'autre, tension V_K et courant I_K sont toujours de signes contraires. C'est la caractéristique idéale d'une diode D (figure 2).

La figure 2 représente quatre caractéristiques à deux segments, mais il est clair que deux d'entre elles correspondent à des dispositions inversées des interrupteurs entre les points A et B.

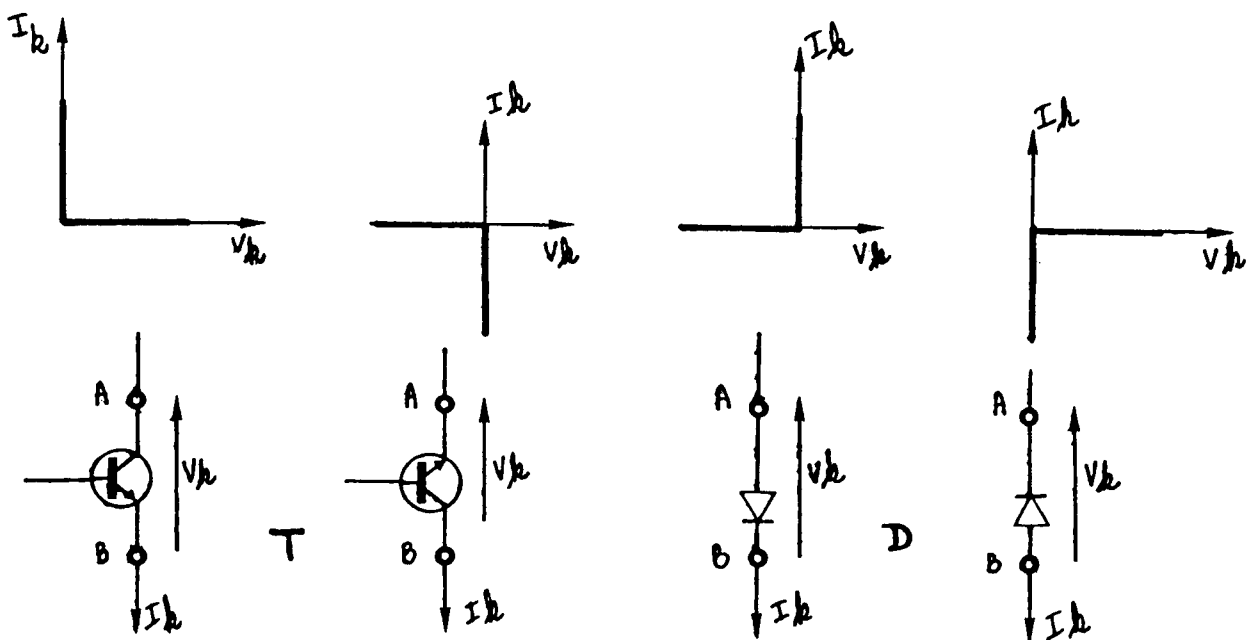


Figure 2 : Caractéristique statique à deux segments

Caractéristique statique à trois segments : l'interrupteur est bidirectionnel en courant ou en tension. Il n'existe donc que deux caractéristiques statiques à trois segments, si l'on ne tient pas compte des dispositions inversées des interrupteurs entre les points A et B (figure 3)

Il faut noter que les interrupteurs possédant des caractéristiques statiques à trois segments peuvent être synthétisés avec les interrupteurs T et D ayant des caractéristiques statiques à deux segments, en les associant en série ou en parallèle.

Caractéristique statique à quatre segments : l'interrupteur est bidirectionnel en courant et en tension. Cette caractéristique statique est unique (Figure 4).

De la même façon, un interrupteur possédant une caractéristique statique à quatre segments peut être réalisé par une association en série ou en parallèle de deux interrupteurs possédant des caractéristiques statiques à trois segments.

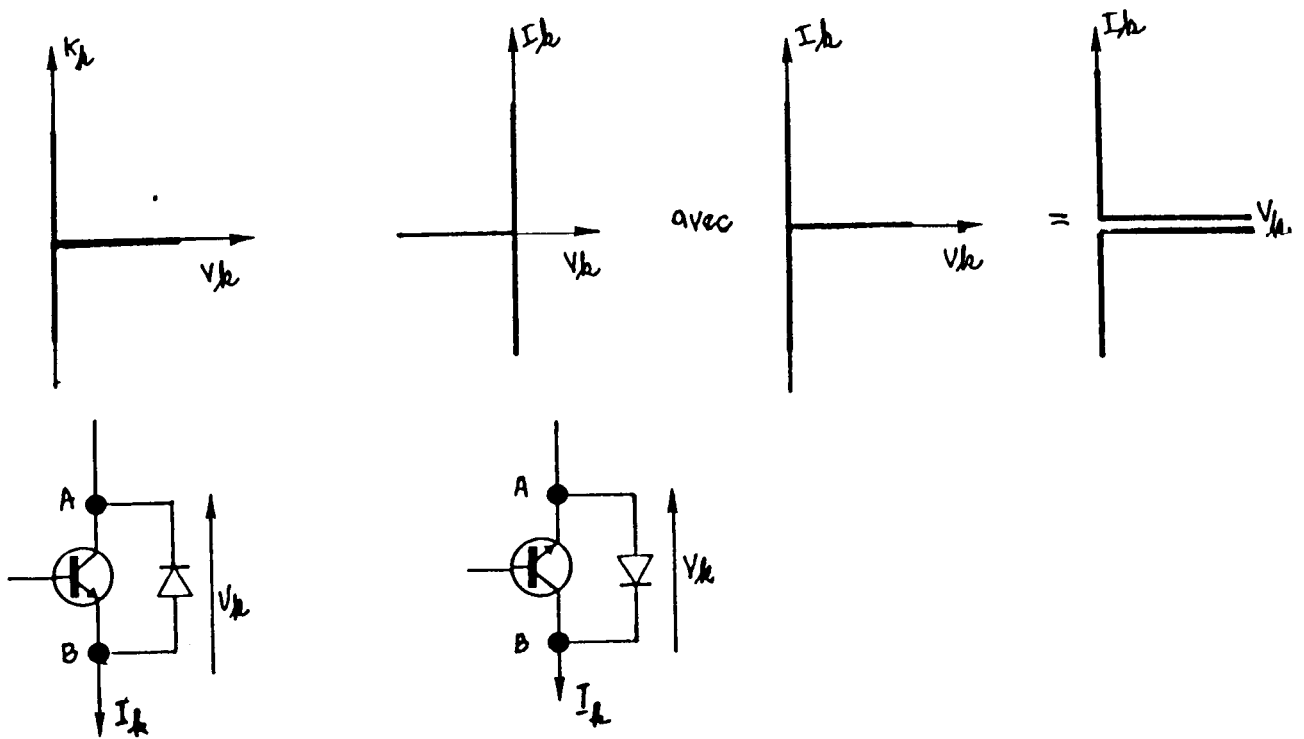


Figure 3a : Caractéristique statique à 3 segments bidirectionnels en courant

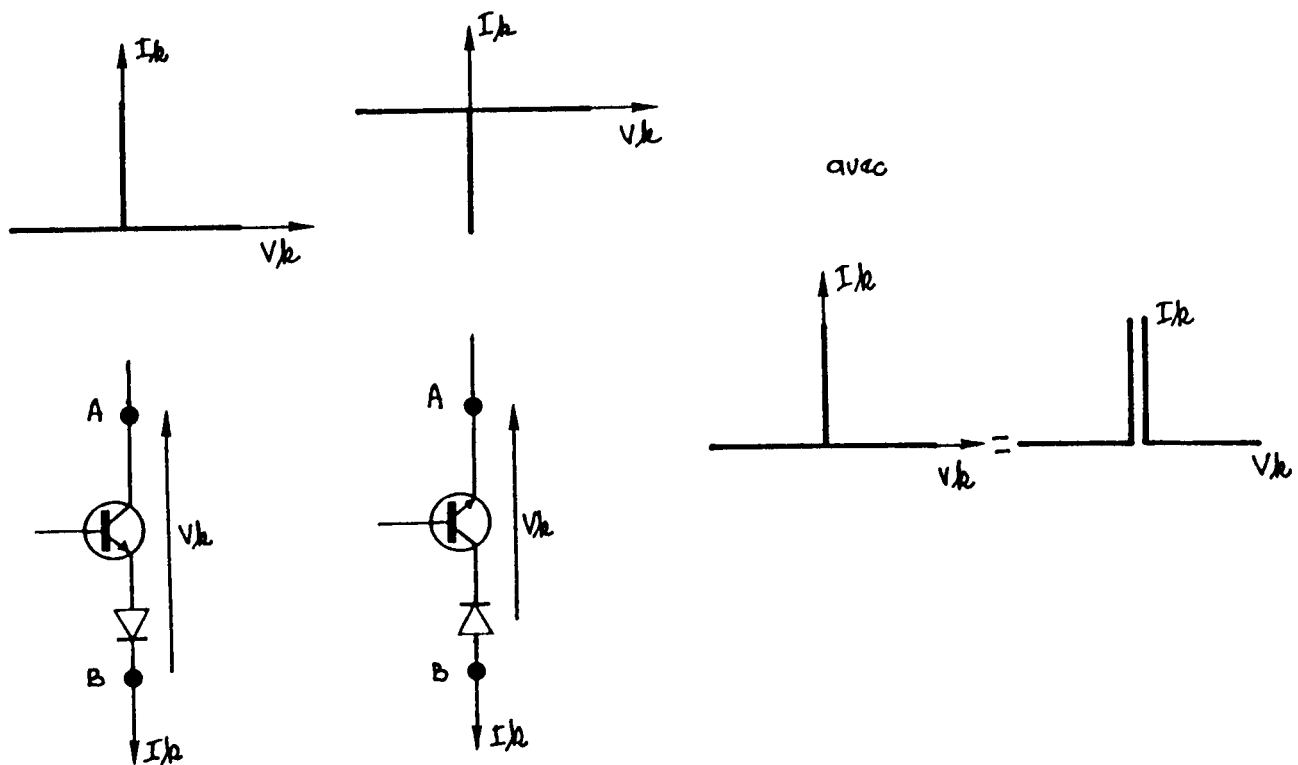


Figure 3b : caractéristique statique à 3 segments bidirectionnelle en tension

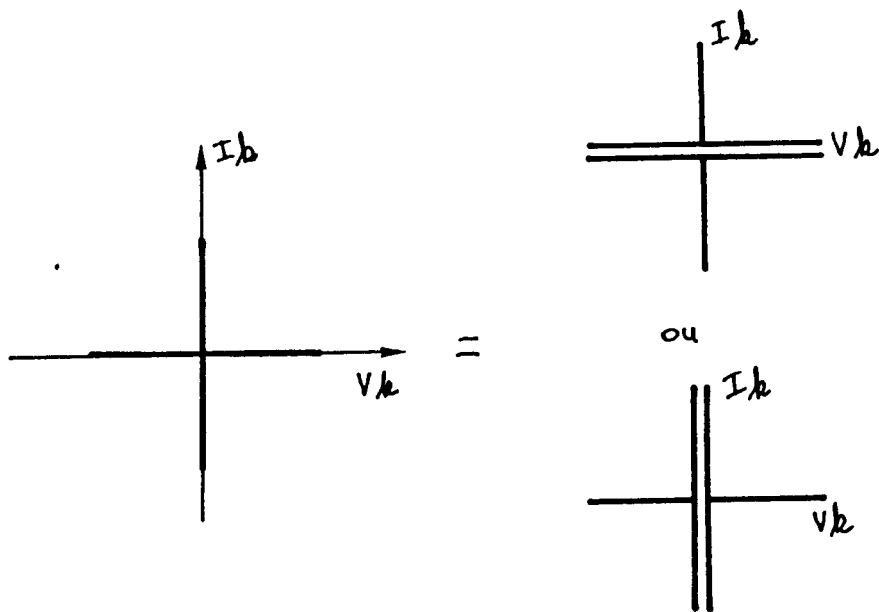


Figure 4 : Caractéristique statique à quatre segments

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.

La trajectoire suivie par le point constitue la "caractéristique dynamique de commutation" de l'interrupteur . Il est important de noter que cette caractéristique *n'est pas une propriété intrinsèque de l'élément*, contrairement à sa caractéristique statique, mais qu'elle dépend des contraintes imposées par le circuit extérieur .

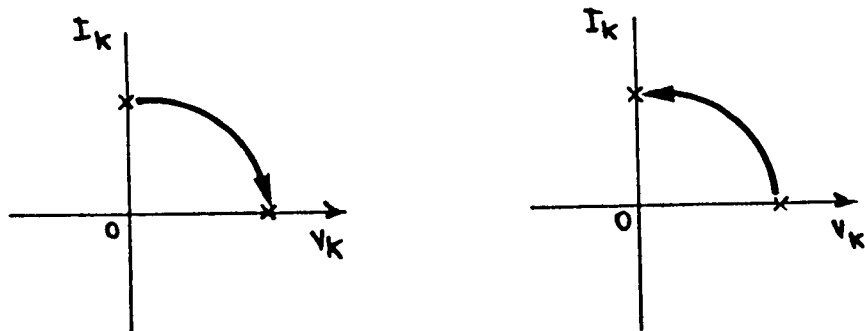
Si l'on néglige les phénomènes secondaires, l'interrupteur étant un élément dissipatif, ce trajet du point de fonctionnement ne peut se faire que dans les quadrants tels que $V_k = I_k > 0$

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.

Pratiquement, cette électrode permet de modifier brusquement la structure interne de l'élément et par suite de faire passer sa résistance d'une valeur très faible (≈ 0) à une valeur très élevée ($\approx \infty$) ou inversement .



blocage commandé

amorçage commandé

Figure 5 : Commutation commandée d'un interrupteur

La caractéristique dynamique devant correspondre à une variation continue de résistance, donc à un rapport V_k/I_k en permanence positif, on passe d'un point de fonctionnement statique situé sur un demi-axe à un autre point de fonctionnement situé sur le demi-axe perpendiculaire de même signe que le précédent. (figure 5)

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.

On notera que la commutation commandée peut faire apparaître des contraintes sévères pour l'élément. Elles dépendent de la caractéristique dynamique suivie. Si le temps de commutation est élevé, ainsi que la fréquence de répétition, les pertes Joule peuvent être importantes.

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

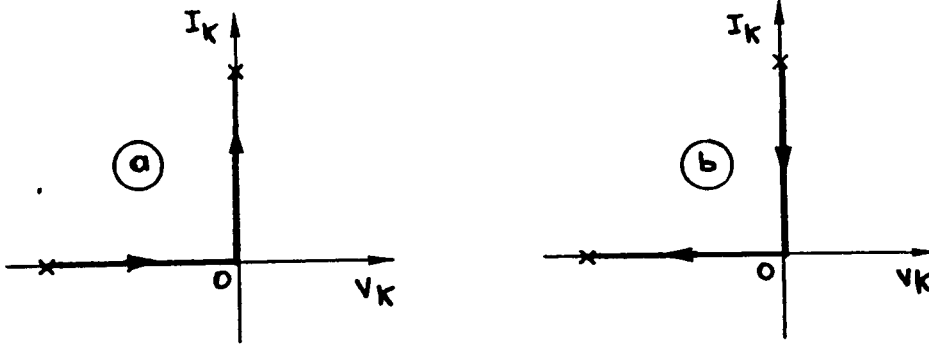
Elle est identifiable dans son principe à celle d'une simple jonction P-N (Diode). Elle ne dépend que du circuit électrique extérieur : l'élément commute naturellement lorsque le point de fonctionnement, se déplaçant sur la caractéristique statique, passe par zéro. En simplifiant les phénomènes réels au voisinage du zéro nous pouvons admettre qu'il y a alors une brusque variation de la résistance de l'élément et que le point de fonctionnement va continuer à se déplacer sur le demi-axe perpendiculaire et de signe contraire.

Le blocage spontané s'effectue au passage par zéro du courant I_k . (figure 6b)

L'amorçage spontané s'effectue au passage par zéro de la tension V_k . (figure 6a)

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.

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



a/ amorçage spontané

b/ blocage spontané

Figure 6 : Commutation spontanée d'un interrupteur

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

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

L'analyse des séquences élémentaires successives de fonctionnement d'un convertisseur permet de connaître la caractéristique statique de l'interrupteur. Au cours d'une période, son point de fonctionnement (V_k , I_k) décrit un **cycle**. Entre les commutations il se déplace sur un axe. A chaque commutation, il saute d'un demi-axe de la caractéristique statique à un demi-axe voisin. Les modes de commutation correspondants se déduisent alors de ses positions initiales et finales.

Exemple : la figure 7 représente le cycle d'un interrupteur. Il est commandé à l'amorçage et à blocage spontané. On reconnaît bien le cycle (idéalisé) d'un thyristor.

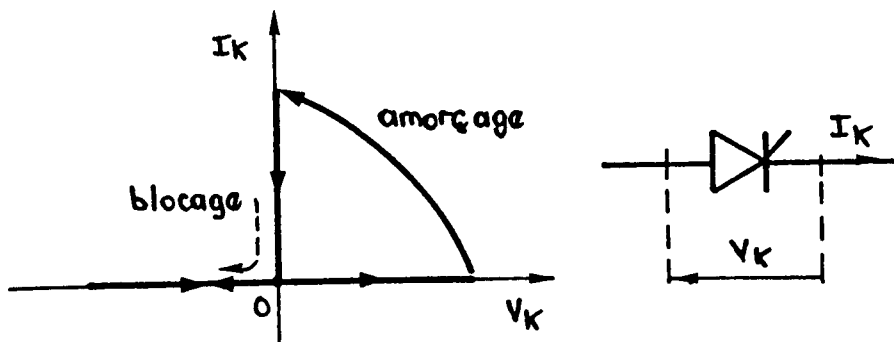


Figure 7 : Le cycle du thyristor

2-3/ Classification des interrupteurs

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

à l'amorçage ou au blocage, commandée ou spontanée .

On rappelle qu'une commutation commandée ne peut se produire que dans les quadrants 1 et 3, tandis qu'une commutation spontanée ne peut se produire que dans les quadrants 2 et 4.

2-3-1/ Interrupteurs à deux segments

Mis à part le court-circuit et le circuit ouvert, on distingue deux interrupteurs dont les caractéristiques statiques possèdent deux segments orthogonaux (Figure 8):

- le premier de ces interrupteurs a la caractéristique statique de l'interrupteur **D** et ses commutations d'amorçage et de blocage sont spontanées (Figure 8a). C'est la diode .
- le second de ces interrupteurs a la caractéristique statique de l'interrupteur **T** et ses commutations d'amorçage et de blocage sont commandées (Figure 8b). C'est le transistor (et ses dérivés) .

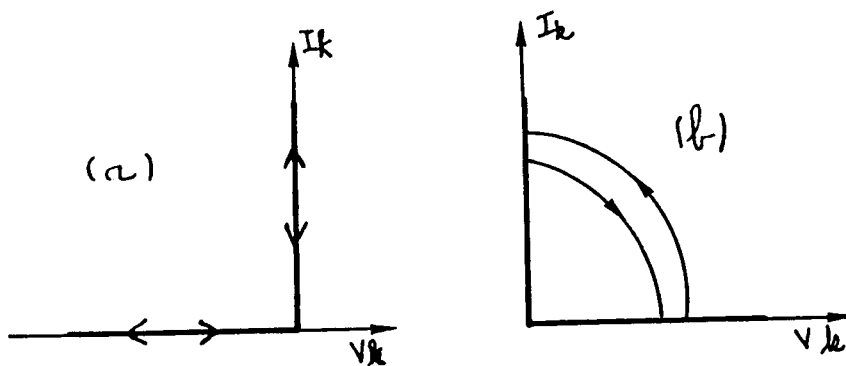


Figure 8 : Caractéristique dynamique d'interrupteurs 2 segments

Tout autre interrupteur qui aurait la caractéristique statique de l'élément **T**, mais qui ne posséderait qu'une seule commutation commandée, à l'amorçage ou au blocage, serait inutilisable pris individuellement. En effet, à la seule commutation commandée doit être obligatoirement associée une commutation spontanée qui ne peut se produire que si la caractéristique statique de l'interrupteur possède deux segments de signes contraires. Ceci signifie qu'un tel interrupteur doit obligatoirement être associé à une diode, en parallèle ou en série, pour finalement constituer un interrupteur à trois segments.

Seuls deux interrupteurs à deux segments sont donc directement exploitables: le transistor et la diode.

2-3-2/ Interrupteurs à trois segments

Ces interrupteurs se répartissent en deux groupes suivant qu'ils sont bidirectionnels en courant et unidirectionnels en tension (Figure 9), ou bidirectionnels en tension et unidirectionnels en courant (Figure 10) . Dans chacun de ces groupes, les interrupteurs ont la même caractéristique statique et ils ne diffèrent donc que par leurs modes de commutation .

Il est important de noter qu'un interrupteur à trois segments qui posséderait ses deux

commutations (d'amorçage et de blocage) commandées ou ses deux commutations spontanées. n'exploiterait jamais les trois segments de sa caractéristique statique. Dans ces conditions, un interrupteur à trois segments possède obligatoirement une commutation commandée et une commutation spontanée (Figures 9 et 10).

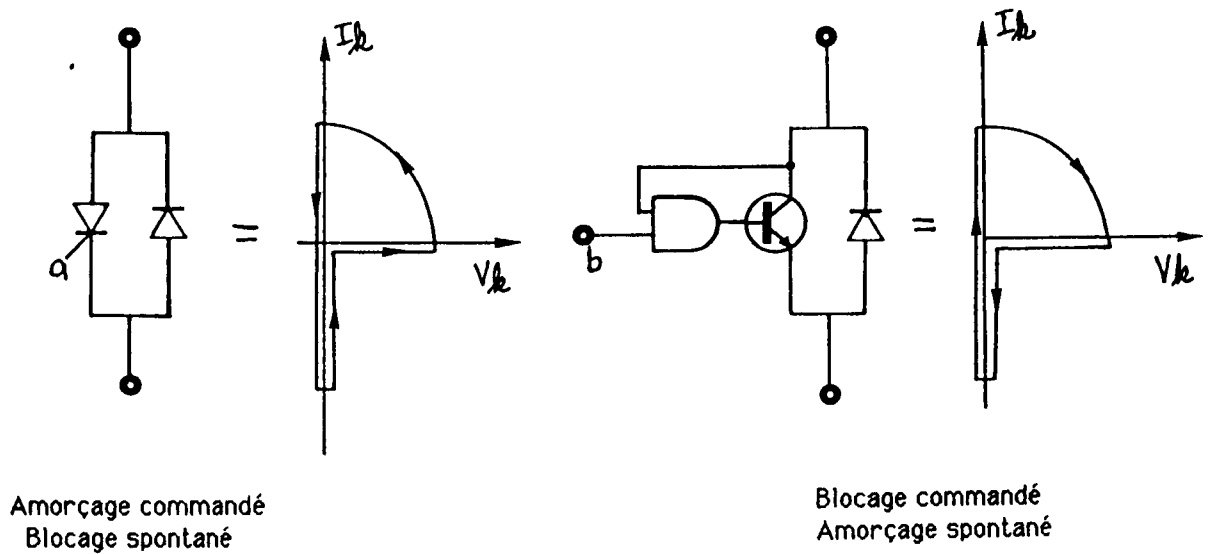


Figure 9 : Caractéristiques dynamiques d'interrupteurs 3 segments bidirectionnels en courant

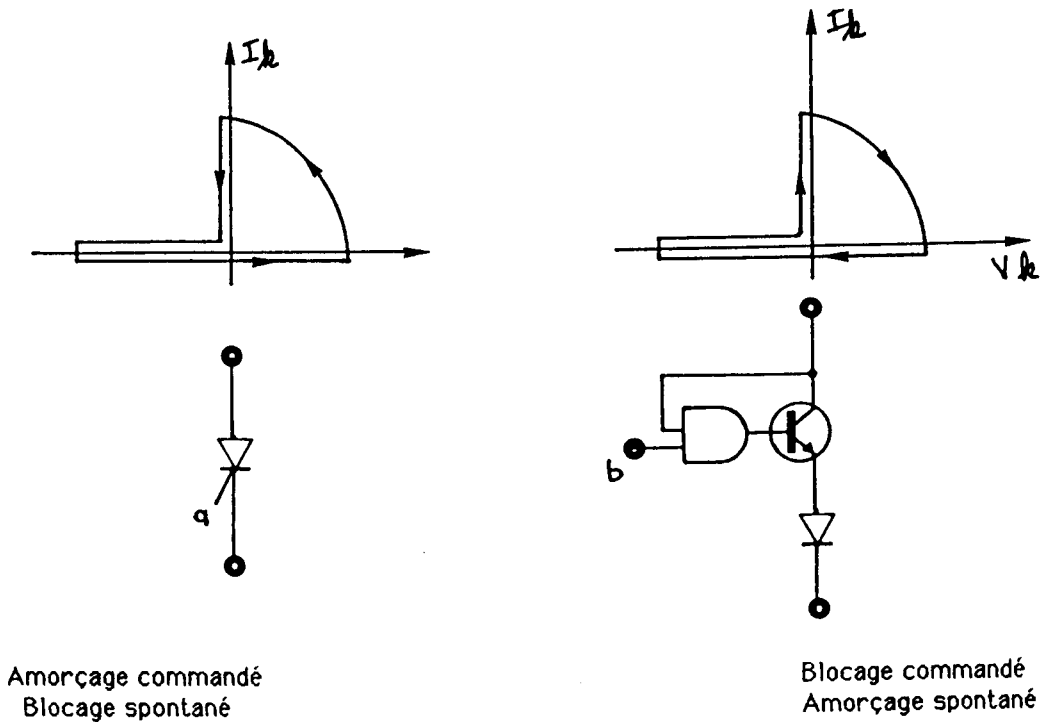


Figure 10 : Caractéristiques dynamiques d'interrupteurs 3 segments bidirectionnels en tension

Le cycle de fonctionnement de ces interrupteurs, qui représente l'ensemble des points de fonctionnement de ces mêmes interrupteurs est alors parfaitement déterminé. Ils ne peuvent donc être utilisés que dans des convertisseurs qui, au cours de leurs fonctionnements, imposent un cycle unique aux interrupteurs. A l'exception du thyristor, ces interrupteurs sont tous des interrupteurs de synthèse, réalisés en associant une diode à un interrupteur à deux segments dont une seule des

commutations est commandée, l'autre étant rendue automatique .

Certains convertisseurs peuvent avoir des fonctionnements complexes qui imposent des cycles différents aux interrupteurs (Onduleur en Modulation de Largeur d'Impulsion par exemple). Ces fonctionnements peuvent conduire à utiliser des interrupteurs qui ont globalement une caractéristique statique à trois segments et des commutations d'amorçage et de blocage commandées (transistor en antiparallèle avec une diode) . Il est cependant important de noter que, quel que soit le fonctionnement envisagé, toutes les possibilités des interrupteurs ne sont pas complètement exploitées, et notamment la réversibilité d'une des grandeurs tension ou courant si les deux commutations sont de même nature, commandées ou spontanées. (Ces interrupteurs se comportent alors comme de véritables interrupteurs deux segments).

2-3-3/ Interrupteurs à quatre segments

Tous les interrupteurs à quatre segments possèdent la même caractéristique statique. Ils ne diffèrent que par leurs modes de commutation qui peuvent être, à priori, différents dans les quadrants 1 et 3.

Ces interrupteurs sont essentiellement utilisés dans les changeurs directs de fréquence, et sont pratiquement constitués de deux interrupteurs trois segments en série ou en parallèle.

3/ CARACTERISATION DES SOURCES

3- 1 / Sources de tension – Sources de courant

Lorsque l'on désire faire la synthèse d'un convertisseur, les seuls éléments connus sont les sources d'entrée et les sources de sortie (on notera que nous utiliserons le terme de source indifféremment pour les générateurs et les récepteurs d'énergie)

La première étape consiste donc à caractériser ces sources . Nous verrons ultérieurement qu'une fois les sources caractérisées, on en déduit la structure du convertisseur .

3-1-1/ Définitions

Deux grandes familles doivent être distinguées : les sources de tension et les sources de courant . La définition classique de ces deux types de source est la suivante :

Une source est dite de tension (la figure 13 donne sa représentation) quand elle est capable d'imposer une tension quel que soit le courant de charge . Cela implique que l'impédance série de la source soit nulle (ou négligeable devant l'impédance de charge de cette source).

Une source est dite de courant (la figure 13 donne sa représentation) quand elle est capable d'imposer un courant, quelle que soit la charge. Cela implique que l'impédance série de la source soit infinie (ou très grande devant l'impédance de charge de cette source).

Cette caractérisation correspond à une propriété permanente . Cependant le fonctionnement des convertisseurs statiques, en raison de la présence d'interrupteurs, provoque des variations instantanées de certaines grandeurs . Il est donc naturel de chercher à généraliser ces définitions à des sources qui possèdent ces propriétés, non plus de façon permanente, mais de façon instantanée . Cela conduit à la définition suivante que nous utiliserons par la suite :

Une source est dite de tension quand la tension à ses bornes ne peut pas subir de discontinuité du fait de la variation de la charge .

Une source est dite de courant quand le courant qui la traverse ne peut pas subir de discontinuité du fait de la variation de la charge .

On notera cependant qu'un générateur de tension (resp. de courant) rectangulaire est bien une source de tension (resp. de courant) car les discontinuités de tension (resp. de courant) ne sont pas le fait de la charge.

Pour mieux préciser cette notion, il est commode d'utiliser la notion d'impédance instantanée .

L'impédance instantanée est la limite pour p tendant vers l'infini de l'impédance symbolique $Z(p)$, on dira aussi la valeur de l'impédance en régime sinusoïdal pour ω tendant vers l'infini . Ainsi :

Une source de tension a une impédance instantanée nulle.

Une source de courant a une impédance instantanée infinie.

3-1-2/ Exemples

a/ Condensateur

C'est une source de tension puisqu'une variation instantanée de la tension à ses bornes (dV/dt infini) conduirait à un courant infini .

D'autre part, $Z(p) = (1/C p) = 0$ pour p tendant vers l'infini . Un condensateur a une impédance instantanée nulle, c'est donc bien une source de tension.

b/ Inductance

C'est une source de courant puisqu'une variation instantanée du courant dans cette inductance (di/dt infini) conduirait à une tension infinie à ses bornes.

D'autre part, $Z(p) = L p = \infty$ pour p tendant vers l'infini . Une inductance a une impédance instantanée infinie, c'est bien une source de courant .

c/ Cas d'une batterie d'accumulateurs (supposés bien chargés)

Est-ce une source de tension ou une source de courant ? Pour répondre à cette question il faut analyser les conditions d'utilisation de cette batterie.

Supposons qu'elle alimente une charge par l'intermédiaire d'un interrupteur T (figure 11). Le courant dans la charge est par exemple de 10 ampères, le temps d'ouverture de T est de 100 nanosecondes et la longueur des cables de 1 mètre (inductance moyenne d'un fil : 1 microHenry par mètre). A l'ouverture de T on aura donc une surtension de :

$$V = L (di/dt) = 100 \text{ volts}$$

Il est clair que pour cette application (qui correspond à un fonctionnement discontinu), à cause des cables de liaison, la charge ne peut pas être considérée comme alimentée par une source de tension.

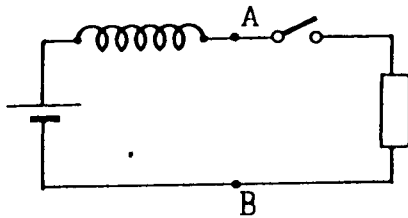


Figure 11

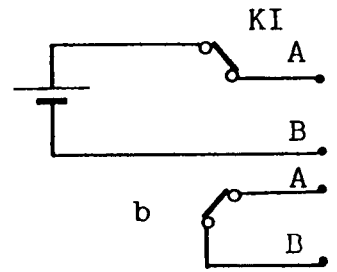
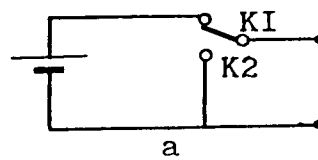


Figure 12

Si l'on a des cables de liaison plus courts (10 cm) et un interrupteur moins rapide (1 μ S), la surtension n'est que de 1 volt. Dans ces conditions, si la batterie a une f.e.m. de quelques dizaines de volts, on pourra la considérer comme une source de tension. On notera que si nous plaçons un condensateur de valeur convenable entre les points A et B, alors, la charge sera effectivement alimentée par une source de tension.

d/ Génératrice à courant continu

La génératrice à courant continu est considérée par l'électrotechnicien comme une source de tension. Pour le concepteur de convertisseurs, elle doit être considérée comme une source de courant, en raison de l'inductance de son induit. Cependant, associée à un condensateur en parallèle, elle pourra alors être considérée comme une source de tension.

e/ Alternateur

Un alternateur qui est fondamentalement une source de tension alternative (exemple du réseau EDF) possède des inductances non négligeables et doit être assimilé à une source de courant. Ce n'est qu'avec prudence et des conditions très particulières qu'il pourra être considéré comme une source de tension. Les structures des convertisseurs seront tout à fait différentes selon le choix effectué au départ.

f/ Convertisseur de la figure 12

Si les interrupteurs K1 et K2 du convertisseur de la figure 12a sont complémentaires on obtient les deux séquences de fonctionnement représentées sur la figure 12b. L'impédance est toujours nulle entre les points A et B. On a donc une source de tension entre ces deux points.

On notera que si en plus de ces deux séquences, on introduit une troisième séquence où K1 et K2 sont ouverts simultanément ($Z_{AB} = \infty$) on n'aura entre les points A et B ni une source de tension, ni une source de courant.

3-1-3/ Conclusion sur la caractérisation des sources

Suite à l'étude de ces différents exemples, il apparaît que le choix pour caractériser les sources d'entrée et les sources de sortie peut être quelquefois difficile. Dans tous les cas, il est nécessaire. Il sera possible de considérer une source d'entrée ou une source de sortie successivement comme une source de tension puis comme une source de courant, d'en déduire les structures correspondantes du convertisseur et de les comparer.

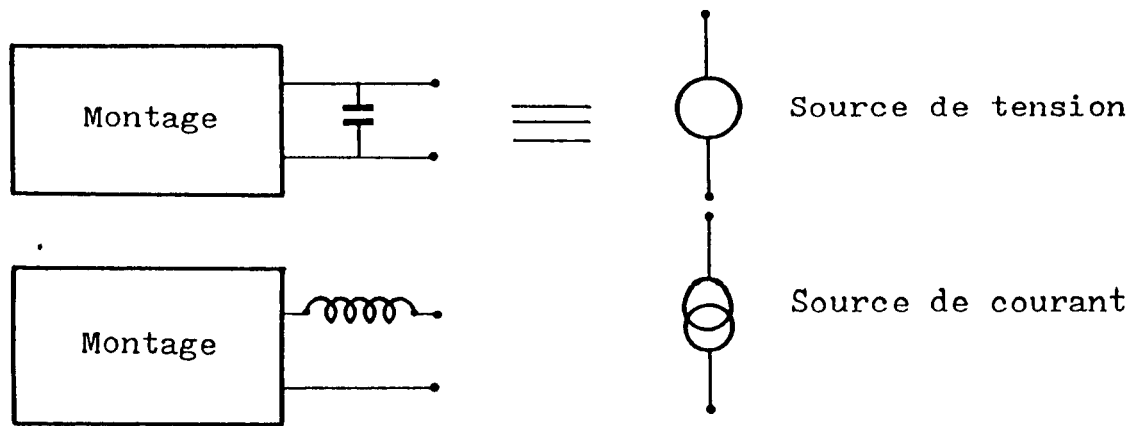


Figure 13

Toutefois, dans le cas où la source est fondamentalement de type continu (batterie, génératrice à courant continu ...), on peut imposer la caractérisation de la source, soit comme source de tension, soit comme source de courant. Pour cela il suffit de rajouter, soit un condensateur en parallèle, soit une inductance en série (figure 13).

Si la source est fondamentalement du type alternatif, la solution ci-dessus ne peut s'appliquer que pour assurer un fonctionnement effectif en source de courant en plaçant une inductance en série. La solution qui consiste à placer un condensateur en parallèle pour obtenir une source de tension est difficilement applicable. En effet, dans la quasi totalité des cas, les sources alternatives ont une impédance interne inductive importante et un condensateur en parallèle produit les effets suivants :

- si la valeur de C est élevée, ce dernier constitue un court-circuit pour la source alternative ($1/C \omega = 0$)
- si la valeur de C est faible, on risque de voir se produire le phénomène de résonance

3-2/ Réversibilité des sources d'entrée et de sortie

La détermination des réversibilités des sources d'entrée et de sortie est fondamentale car nous verrons que l'analyse de ces réversibilités va nous permettre d'en déduire les caractéristiques statiques des interrupteurs utilisés.

La tension (ou le courant) caractérisant un générateur ou un récepteur est dite continue si elle est unidirectionnelle. La tension (ou le courant) est dite alternative s'il elle est périodique et possède une valeur moyenne nulle.

Un générateur ou un récepteur est dit réversible en tension si la tension à ses bornes peut changer de signe.

De même un générateur ou un récepteur est dit réversible en courant si le courant qui le traverse peut s'inverser.

En cas de réversibilité du sens de transfert de l'énergie, c'est-à-dire en cas du changement de signe de la puissance, générateurs et récepteurs peuvent échanger leur rôles de manière fugitive (réversibilité instantanée) ou de manière durable (réversibilité permanente).

Les entrées/sorties d'un convertisseur peuvent donc se caractériser comme des sources de tension ou de courant, continues ou alternatives, réversibles ou non réversibles en tension et/ou en courant.

On notera cependant que pour la seule détermination des caractéristiques statiques des interrupteurs, il n'y a pas lieu de faire la distinction entre grandeurs alternatives et grandeurs réversibles qui ne diffèrent que par l'échelle des temps.

Ainsi une source d'entrée ou de sortie d'un convertisseur sera :

- de tension ou de courant, soit 2 possibilités
- réversible ou non en tension, soit 2 possibilités
- réversible ou non en courant, soit 2 possibilités

Soit donc au total 8 possibilités (figure 14)

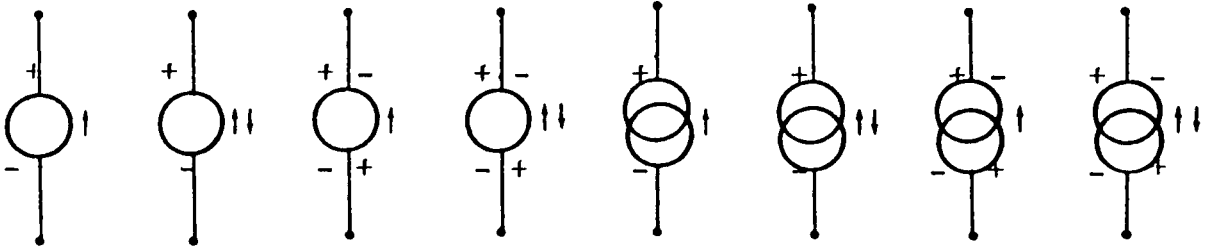


Figure 14 : Réversibilité des sources

Exemples de réversibilité :

- une batterie d'accumulateurs se comporte en récepteur lors de la charge, en générateur lors de la décharge . On dit que c'est une source de tension réversible en courant.

- Le circuit de l'induit d'une machine à courant continu est assimilable à une f.e.m. en série avec une résistance et une inductance . C'est donc une source de courant réversible en tension et en courant.

4/ REGLES D'INTERCONNEXION DES SOURCES

Au cours de son fonctionnement, le convertisseur statique connecte par l'intermédiaire de ses interrupteurs les sources entre lesquelles il assure et contrôle l'échange d'énergie .

Pour que ces liaisons puissent se faire, un certain nombre de règles sont à respecter impérativement.

- 1/ Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée mais elle peut être ouverte
- 2/ Le circuit d'une source de courant ne doit jamais être ouvert mais il peut être court-circuité
- 3/ Il ne faut jamais connecter entre elles deux sources de même nature
- 4/ On ne peut connecter entre elles qu'une source de courant et une source de tension

Remarque importante : si l'une des sources de tension (resp du courant) n'est pas une souce de tension permanente, mais seulement instantanée, par exemple un circuit RC parallèle (resp. un circuit RL série) il devient alors possible d'interconnecter ces deux sources de tension (resp du courant) en prenant certaines précautions :

- dans le cas de deux sources de tension, la fermeture de l'interrupteur qui connecte ces deux sources ne peut avoir lieu qu'à l'égalité des deux tensions, c'est-à-dire au passage par zéro de la tension aux bornes de cet interrupteur. La commutation à la fermeture de cet interrupteur est donc spontanée, l'ouverture peut être commandée à chaque instant .

- Dans le cas de deux sources de courant, l'ouverture de l'interrupteur qui connecte ces deux sources ne peut avoir lieu qu'au passage par zéro du courant dans cet interrupteur. La commutation à l'ouverture de cet interrupteur est donc spontanée et la fermeture peut être commandé à chaque instant.

Les sources d'entrée et de sortie d'un convertisseur étant caractérisées (source de tension ou source de courant, réversibilités) et les règles d'interconnexion des sources étant connues, nous allons voir maintenant que la structure du convertisseur s'en déduit directement .

Nous appellerons configuration de base le schéma qui, sans hypothèse sur les caractéristiques des interrupteurs, permet toutes les interconnexions possibles entre une source d'entrée et une source de sortie données .

L'interdiction de connecter deux souces de même nature nous amène à distinguer deux configurations de base : - La configuration à liaison directe lorsque les sources sont de nature différente; c'est à partir d'elle que l'on déduira la structure de tous les convertisseurs directs.

- Les configurations à liaison indirecte lorsque les sources sont de même nature; c'est à partir d'elles que l'on déduira la structure de tous les convertisseurs indirects.

5/ STRUCTURE DES CONVERTISSEURS DIRECTS

Les sources d'entrée et de sortie sont de nature différente. La grande majorité des convertisseurs élémentaires sont dans cette catégorie.

5- 1/ Convertisseurs directs tension-courant

Problème : la source d'entrée est une source de tension, la source de sortie est une source de courant . Quelles sont les différentes possibilités d'interconnexion directe de ces deux sources et quelle est la structure qui permet de réaliser toutes ces interconnexions ?

Disposant de ces deux sources et des règles du paragraphe précédent, nous savons que l'on peut (figure 15) :

- relier dans un certain sens l'entrée et la sortie (état a)
- relier dans l'autre sens l'entrée et la sortie (état b)
- les séparer en ouvrant la source de tension et en court-circuitant la source de courant (c)

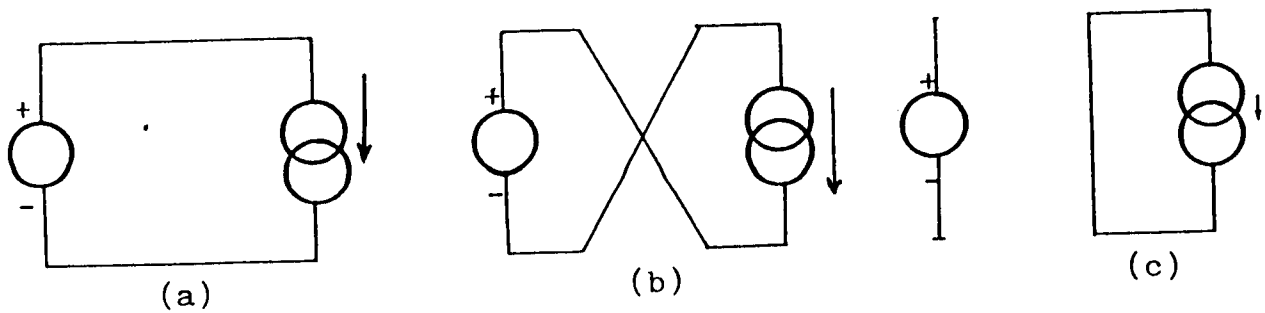


Figure 15 : Possibilités d'interconnexions d'une source de V et d'une source de I

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

Si l'on veut réaliser ces trois états sans faire appel à une source à point milieu, la solution la plus simple consiste à faire appel à un montage en pont à quatre interrupteurs (figure 16a) :

- K1 et K3 fermés donnent l'état a
- K2 et K4 fermés donnent l'état b
- K1 et K4 fermés ou K2 et K3 fermés donnent l'état c

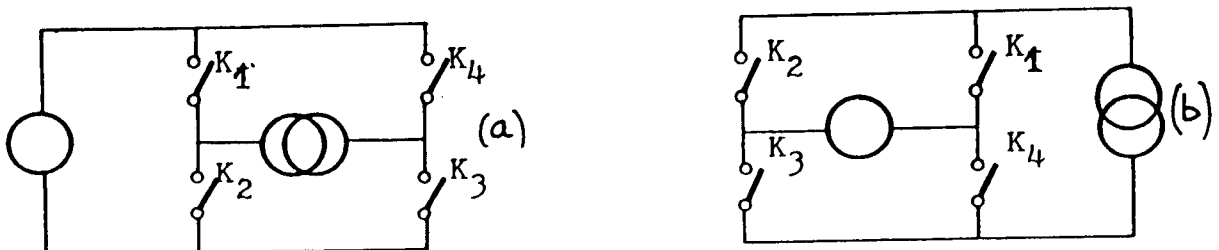


Figure 16 : Configuration de base d'un convertisseur tension courant

Ce schéma sera donc la configuration de base de tous les convertisseurs directs tension courant monophasés . En tenant compte des réversibilités des sources, on pourra le simplifier dans certains cas.

On remarquera que ce montage en pont peut être représenté de façon différente quant à son aspect extérieur (figure 16b), mais identique du point de vue de son fonctionnement . Par la suite nous ne considérerons que la représentation de la figure 16a.

De cette étude on retiendra donc qu'un convertisseur direct est un circuit électrique constitué uniquement d'interrupteurs . Il est donc tout à fait incapable de stocker de l'énergie, le transfert d'énergie s'effectue directement entre l'entrée et la sortie . Si les pertes dans le convertisseur sont négligées, la puissance à l'entrée est égale à chaque instant à la puissance à la sortie.

Des exemples réels de structures de convertisseurs directs sont traités au § 8

5-2/ Convertisseurs directs courant-tension

C'est fondamentalement le même problème que celui du convertisseur direct tension courant

puisque l'on n'a fait aucune hypothèse sur le sens de transfert de l'énergie. On a envisagé simplement les différentes possibilités d'interconnecter une source de tension et une source de courant. La configuration de base reste donc la même, on a simplement l'habitude de la dessiner en plaçant la source d'entrée, c'est-à-dire la source de courant à la gauche du dessin (figure 17).

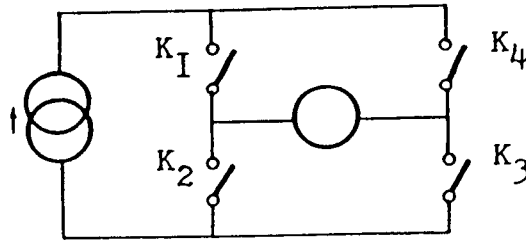


Fig 17 : autre représentation de la configuration de base

6/ STRUCTURE DES CONVERTISSEURS INDIRECTS

Les sources d'entrée et de sortie sont de nature identique.

Pour interconnecter deux sources de même nature, il faudra faire appel à des éléments d'interconnexion supplémentaires ne consommant pas d'énergie active : capacité C ou inductance L . Deux types de solution sont envisageables.

6-1/ Solutions permettant de se ramener à des convertisseurs directs

a/ On modifie la nature de la source d'entrée ou de la source de sortie.

Pour réaliser la conversion directe tension tension, on place une inductance en série soit avec la source d'entrée, soit avec la source de sortie (figure 18a). On se ramène alors à un convertisseur direct courant tension ou tension courant, l'inductance L étant extérieure au convertisseur.

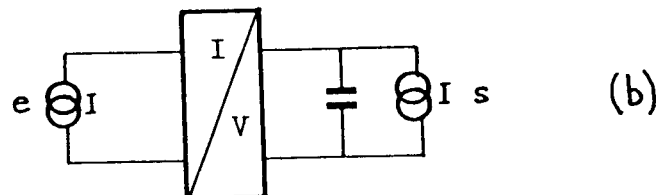
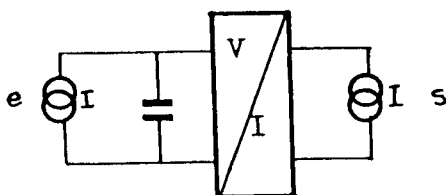
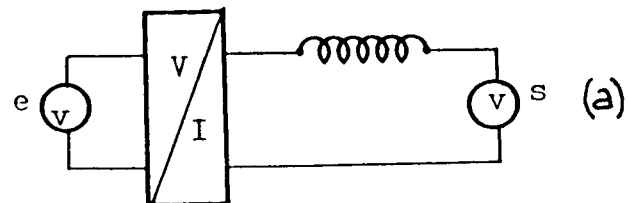
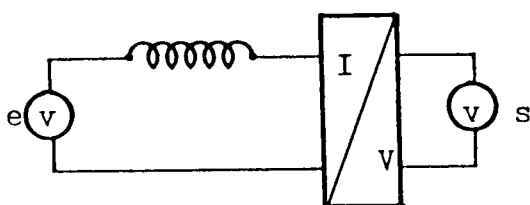


Figure 18 : modification de la nature de la source d'entrée ou de sortie

Pour réaliser la conversion courant courant, on place un condensateur en parallèle, soit sur la source d'entrée, soit sur la source de sortie (figure 18b) . Ici aussi on se ramène à un convertisseur direct, la capacité C étant extérieure à ce convertisseur .

b/ On fait une conversion indirecte en deux étapes utilisant deux convertisseurs directs .

Il n'est pas toujours possible de modifier la nature d'une source . Dans ce cas :

- pour réaliser une conversion tension tension on pourra utiliser deux convertisseurs directs avec une inductance comme étage tampon entre les deux (figure 19a).

- pour réaliser une conversion courant courant on pourra utiliser deux convertisseurs directs avec un condensateur comme étage tampon (figure 19b)

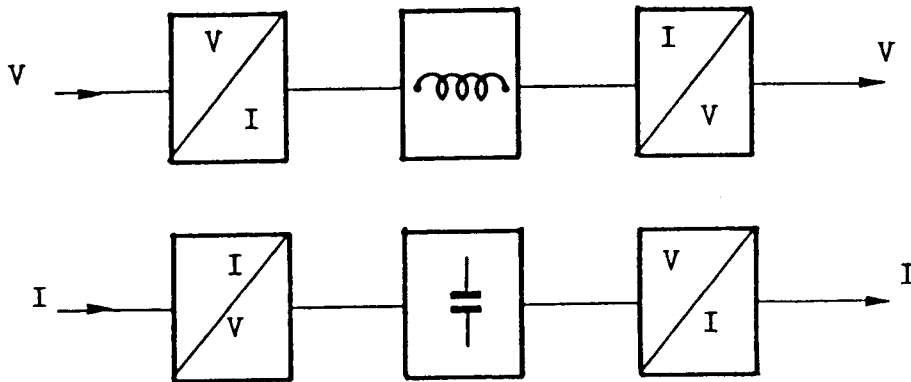


Figure 19 : Utilisation d'un étage tampon

Nous allons voir maintenant comment l'on peut résoudre ce problème à l'aide d'une seule structure. Pour cela on utilise un élément de stockage (inductance ou condensateur), mais ce stockage fait partie du fonctionnement propre du convertisseur.

6-2/ Convertisseurs indirects tension tension

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

- l'inductance stocke l'énergie fournie par une source de tension (figure 20a)
- l'inductance restitue son énergie à l'autre source, soit dans un sens (figure 20b), soit dans l'autre (figure 20c).

Pour réaliser ces différentes connexions, la solution la plus simple consiste à faire appel au montage en pont de la figure 20d . Ce schéma sera la configuration de base des convertisseurs indirects tension tension . Cette configuration pourra se simplifier en fonction des réversibilités des sources .

Dans cette configuration la source de sortie se trouve dans un pont à quatre interrupteurs . On pourrait aussi placer l'entrée dans le pont.

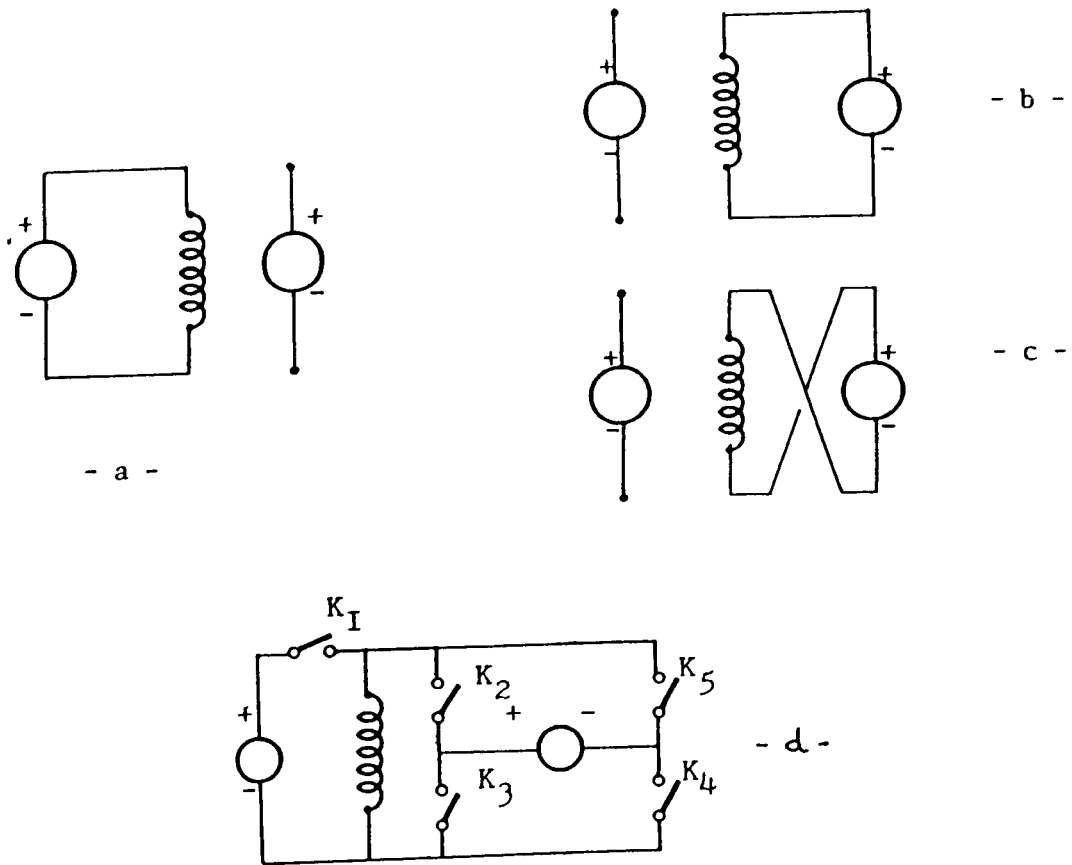


Figure 20 : Convertisseur indirect tension tension

6-3/ Convertisseur indirect courant courant

Dans ce convertisseur indirect les deux sources de courant ne sont jamais connectées simultanément à l'élément de stockage mais successivement :

- le condensateur stocke l'énergie fournie par une source de courant (figure 21a)
- le condensateur restitue son énergie à l'autre source, soit dans un sens (figure 21b), soit dans l'autre (figure 21c) .

Pour réaliser ces différentes connexions, la solution la plus simple consiste à faire appel au montage en pont de la figure 21d . Ce schéma sera la configuration de base des convertisseurs indirects courant courant .

En conclusion de cette étude sur les structures des convertisseurs, on peut dire que les trois configurations de base représentées sur la figure 22 permettent de rendre compte du principe des structures de tous les convertisseurs monophasés.

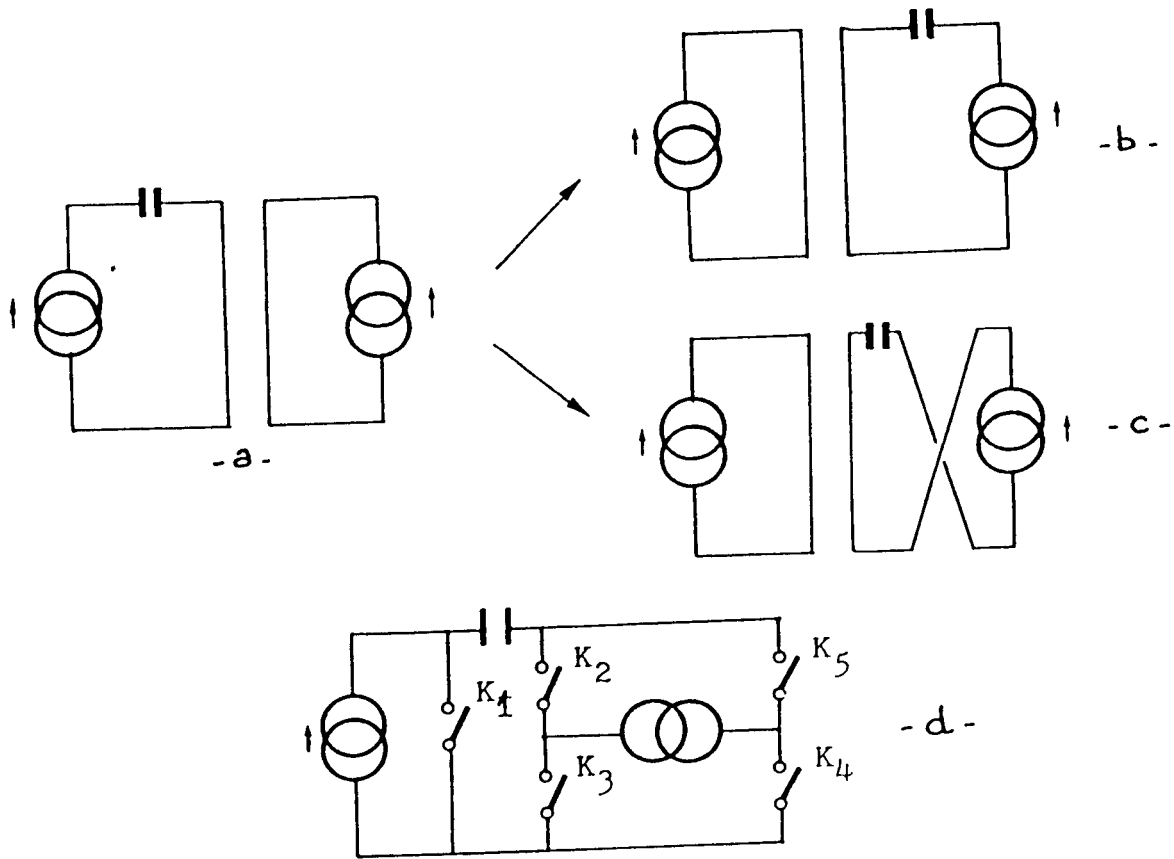


Figure 21: Convertisseur indirect courant courant

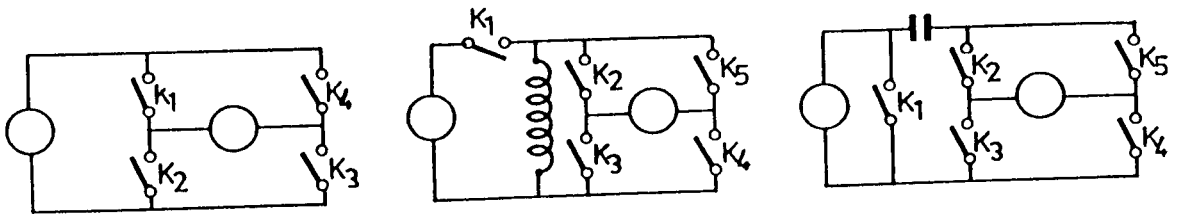


Figure 22 : les trois configurations de base des convertisseurs statiques

7/ CLASSIFICATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES

Un panorama général des structures des convertisseurs statiques peut être donné par un tableau général à double entrée (figure 23). On place sur une entrée du tableau les différentes caractéristiques possibles pour les sources d'entrée (source de tension, source de courant, réversibilités en courant et en tension). On place sur l'autre entrée du tableau les différentes possibilités des sources de sortie.

On remarquera que le choix de l'ordre de rangement des sources d'entrée et des sources de sortie dans ce tableau n'est pas quelconque mais que les sources 1 et 8, 2 et 7, 3 et 6, 4 et 5 sont duales.

Nous pouvons diviser ce tableau en quatre régions. Dans les régions II et III se trouvent les

convertisseurs directs. Dans la région I les convertisseur indirects tension tension et dans la région IV les convertisseurs indirects courant courant.

(Δ)

Entrée \ Sortie	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

The table is divided into four regions by a diagonal line (Δ) and a point Ω . Region I is the top-left quadrant, Region II is the bottom-left quadrant, Region III is the top-right quadrant, and Region IV is the bottom-right quadrant. Cells containing 'X' indicate incompatibilities. Cells containing 'I', 'II', 'III', and 'IV' represent different converter types.

Figure 23 : Tableau général des convertisseurs statiques

Les cases barrées correspondent à des incompatibilités de réversibilité entre source d'entrée et source de sortie.

Un montage réversible se retrouve dans deux cases symétriques par rapport à la diagonale (Δ) suivant le sens de transfert énergétique que l'on prend pour référence.

Deux convertisseurs occupant des cases symétriques par rapport au point Ω sont des montages duaux. On peut donc repérer un convertisseur statique par ses coordonnées (e, s) dans le tableau de la figure 23.

8/ SYNTHESE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

8-1/ Description de la méthode à utiliser pour réaliser la synthèse

Pour faire la synthèse d'un convertisseur statique il faudra procéder comme suit :

1/ Déterminer la nature des sources d'entrée et des sources de sortie afin d'en déduire la configuration de base correspondante (figure 22) .

2/ Dédire du cahier des charges les réversibilités en tension et en courant des sources d'entrée et de sortie.

3/ Identifier sur la configuration de base correspondante les séquences de fonctionnement nécessaires, compte tenu des réversibilités en tension et en courant et des contrôles d'énergie souhaités. Effectuer les simplifications de la structure de base si cela est nécessaire et en déduire le schéma du convertisseur .

4/ Pour les différentes séquences, observer le sens du courant dans les interrupteurs passants et le signe de la tension aux bornes de ceux qui sont bloqués . En déduire la caractéristique $I(V)$ de chaque interrupteur .

5/ Dédire d'une étude approfondie du cahier des charges et en particulier des formes d'onde souhaitées l'enchaînement des différentes séquences de fonctionnement . Pour chaque commutation représenter le point de fonctionnement de chaque interrupteur avant et après la commutation . Les bases rappelées au § 2-2 sur la commutation des interrupteurs vont nous permettre d'en déduire le type de commutation de chaque interrupteur .

6/ Connaissant les caractéristiques statiques et les types de commutation de chaque interrupteur, nous pouvons en déduire les interrupteurs à utiliser .

Pour préciser tout cela nous allons traiter quelques exemples.

8-2/ Etude de cas

8-2-1/ Hacheur non réversible en courant

Cahier des charges : on veut alimenter à partir d'une batterie d'accumulateurs, une machine à courant continu fonctionnant en moteur sans aucune réversibilité . Ce moteur devra être alimenté sous tension continue variable, pour cela on utilisera un convertisseur statique .

Problème : trouver la structure du convertisseur .

Caractérisation des sources d'entrée et des sources de sortie : l'entrée est une source de tension réversible en courant, mais cette réversibilité n'a pas besoin d'être utilisée puisque la batterie ne fonctionnera qu'en générateur. La sortie est une source de courant sans réversibilité. On en déduit que le convertisseur à utiliser est un convertisseur direct dont la figure 24 indique la configuration de base.

Le problème est maintenant de déterminer la nature des interrupteurs K_1 K_2 K_3 K_4 .

Lorsque la batterie alimente le moteur à courant continu, la séquence de fonctionnement (1) est représentée sur la figure 25a ainsi que les points de fonctionnement des différents interrupteurs.

Si l'on veut un contrôle de l'énergie fournie au moteur, il faut introduire une séquence de roue libre, soit par K_1 K_4 , soit par K_2 K_3 . Choisissons par exemple K_2 K_3 , c'est la séquence (2) de la figure 25a.

On déduit de ces deux séquences les caractéristiques statiques des interrupteurs :

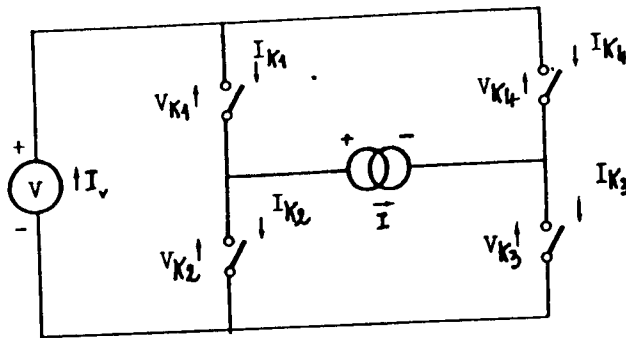


Figure 24 : Structure de base d'un hacheur.

- K1 a la caractéristique statique de l'élément T
- K2 a la caractéristique statique de l'élément D monté en sens inverse
- K3 est un court-circuit
- K4 est un circuit ouvert

Examinons l'enchaînement des séquences (1) (2) (1) ... pour en déduire le type de commutation des interrupteurs selon l'étude présentée au début de ce chapitre. Pour passer de la séquence (1) à la séquence (2), K1 devra avoir une commutation commandée au blocage, tandis que K2 aura une commutation spontanée à l'amorçage.

Pour passer de la séquence (2) à la séquence (1), K1 devra être un interrupteur commandé à l'amorçage et K2 un interrupteur à blocage spontané.

Le convertisseur à utiliser est donc représenté sur la figure 25b. K1 pourra être, par exemple, un transistor ou un thyristor à condition de le munir d'un dispositif de blocage. K2 sera une diode montée en sens inverse.

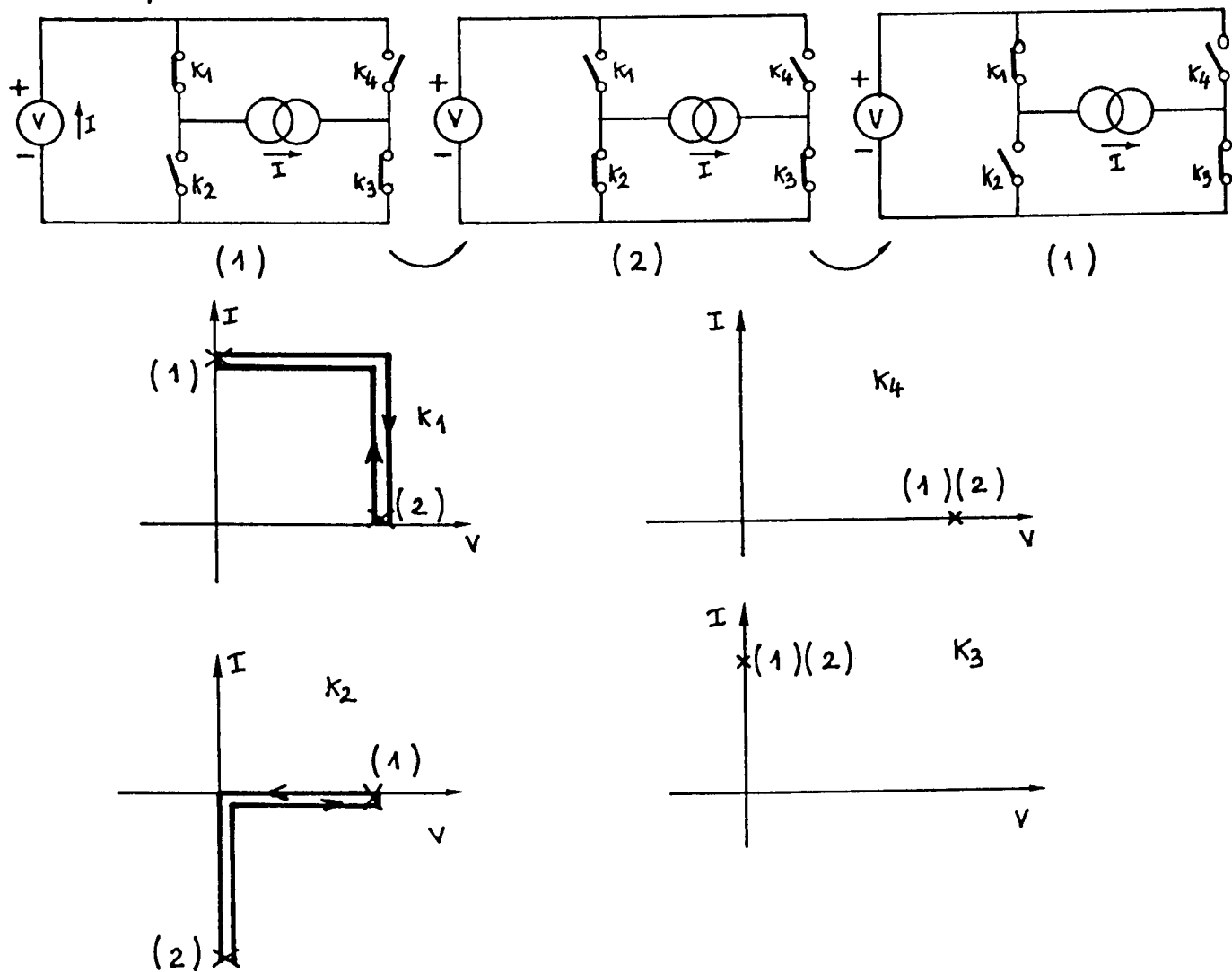
8-2-2/ Hacheur réversible en courant

Cahier des charges : avec une batterie d'accumulateurs on veut alimenter une machine à courant continu sous tension variable. Cette machine est à excitation indépendante, elle devra fonctionner en moteur et en génératrice pour le même sens de la vitesse de rotation. On notera que pour assurer le freinage on choisit de ne pas toucher à l'inducteur mais d'inverser le courant dans l'induit.

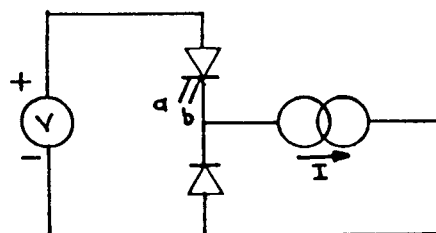
Problème : trouver la structure du convertisseur.

Caractérisation des sources d'entrée et de sortie : la source d'entrée est une source de tension réversible en courant ; la source de sortie, c'est-à-dire la machine, est une source de courant non réversible en tension et réversible en courant. On en déduit que le convertisseur à utiliser est un convertisseur direct dont la figure 24 indique la configuration de base. Les différentes séquences de fonctionnement sont donc : Une séquence active de traction et une séquence neutre de traction et, pour la phase de freinage, une séquence active et une séquence neutre.

La figure 25 représente les différentes séquences de la phase de traction et leur enchaînement.

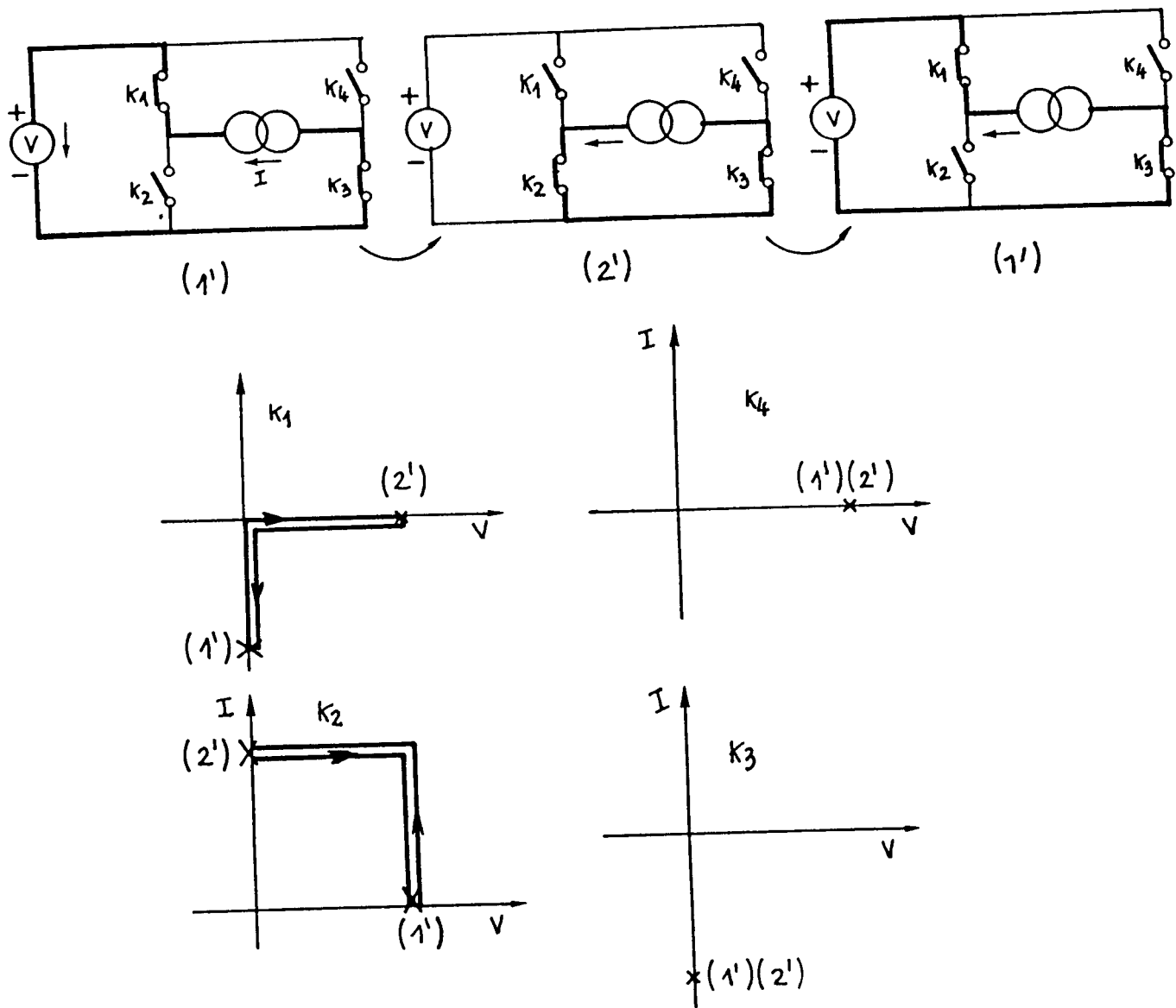


a/ Séquences de fonctionnement et caractéristiques des interrupteurs pour un hacheur non réversible en courant

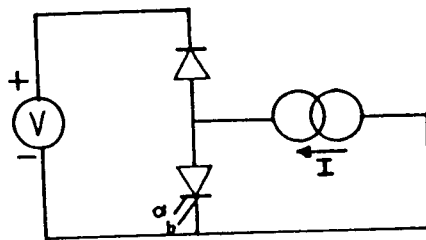


b/ Structure d'un hacheur non réversible en courant

Figure 25



a/ Séquences de fonctionnement et caractéristique des Interrupteurs pour un hacheur en phase de freinage



b/ Structure d'un hacheur fonctionnant en phase de freinage

La figure 26a représente les différentes séquences de la phase de freinage et leur enchaînement.

Pour chaque régime on a représenté le point de fonctionnement de chaque interrupteur pour les différentes séquences. On peut en déduire les résultats suivants :

Phase de traction

L'étude a été faite au paragraphe précédent et cela conduit au schéma du convertisseur représenté sur la figure 25b.

Phase de freinage

Pour passer de la séquence active (1') à la séquence neutre (2'), K1 devra être un interrupteur à blocage spontané, conduisant un courant négatif avant son blocage et K2 un interrupteur à amorçage commandé conduisant un courant positif.

Pour passer de la séquence (2') à la séquence (1'), il faudra pour K2 un blocage commandé et pour K1 un amorçage spontané.

Cela conduit au schéma du convertisseur de la figure 26b.

Si l'on veut un convertisseur qui fonctionne à la fois en traction et en freinage, il doit comporter tous les interrupteurs dont on vient de préciser les types de commutation et cela donne le schéma de la figure 27.

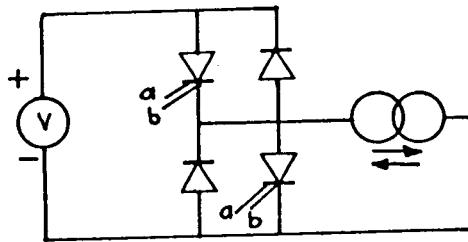


Figure 27 : Structure d'un hacheur réversible en courant

8-2-3/ Onduleur de tension

Cahier des charges : on désire obtenir une tension rectangulaire $+E -E$ aux bornes de la charge.

La source d'entrée est une source de tension réversible en courant. La source de sortie est une source de courant réversible en courant et en tension puisqu'elle voit une tension alternative à ses bornes.

La configuration de base du convertisseur correspondant est donc celle d'un convertisseur direct tension courant. Cette configuration est représentée sur la figure 28a. La figure 28b donne les conventions de signe des tensions et des courants.

Les deux séquences de fonctionnement de ce montage sont données sur la figure 28c. Il n'y a pas de séquence de roue libre puisque la tension aux bornes de la charge est $+E -E$ sans palier nul ; la source de courant n'est jamais déconnectée de la source de tension.

On notera que, le fonctionnement recherché étant un fonctionnement en alternatif, pour un sens donné de la tension aux bornes de la charge, le courant pourra être, soit positif, soit négatif. On déduit

donc des deux séquences de la figure 28c les caractéristiques statiques des interrupteurs K1 K2 K3 K4 (figure 28d). Ces sont des interrupteurs bidirectionnels en courant qui doivent bloquer une tension positive. On pourra utiliser, par exemple, des interrupteurs complexes constitués d'un élément T avec un élément D en antiparallèle.

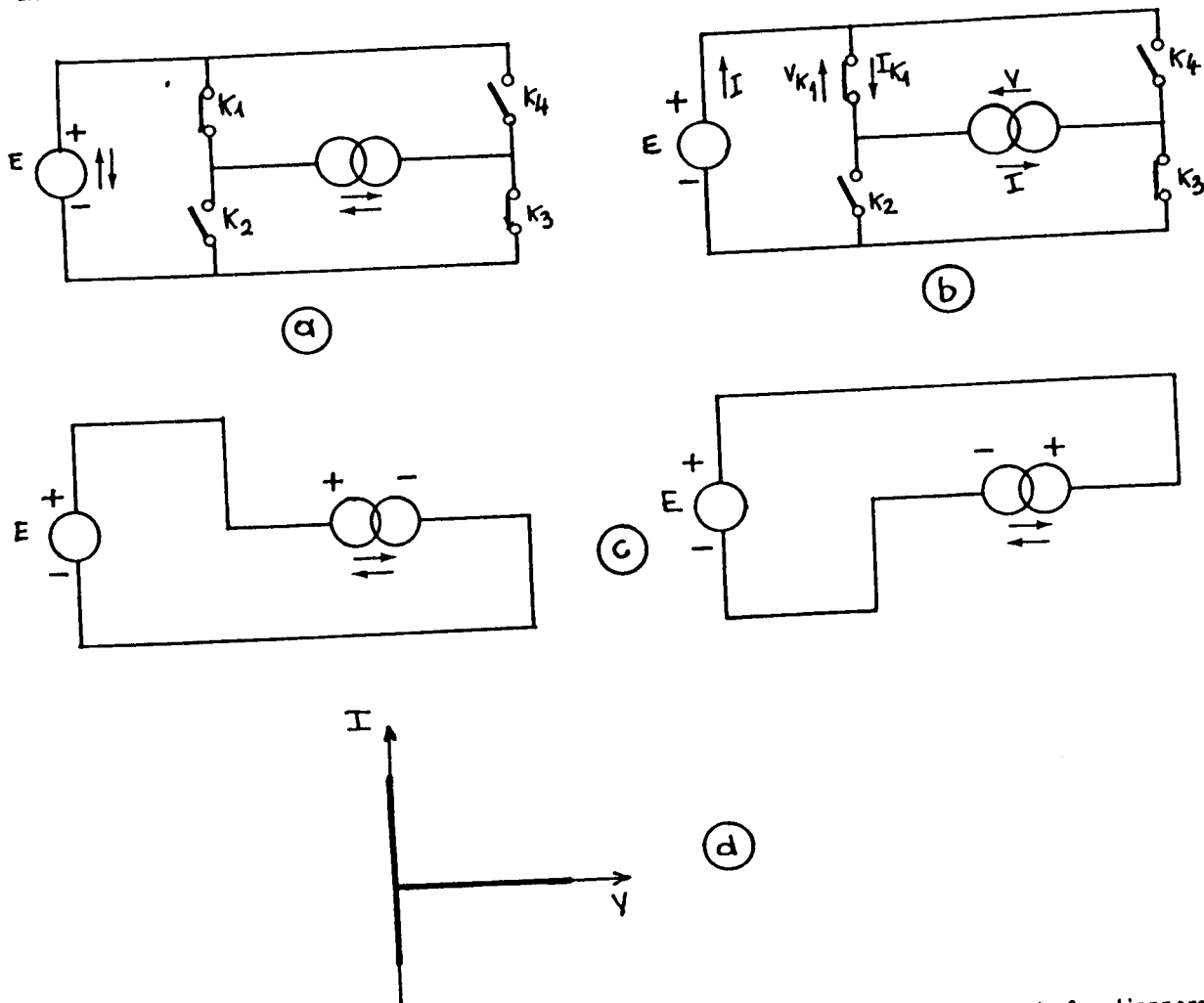


Figure 28 : Structure de base d'un onduleur de tension avec séquences de fonctionnement et caractéristiques statiques des interrupteurs

Pour pouvoir définir le type de commande de ces interrupteurs, il est nécessaire de préciser davantage le cahier des charges. Dans le cas de l'onduleur, il faut préciser le sens du déphasage imposé par la charge, AVant ou ARrière.

Pour simplifier nous allons raisonner sur le terme fondamental du courant, c'est-à-dire que le courant sera considéré comme sinusoïdal.

Premier cas : la charge de l'onduleur impose un courant en arrière par rapport à la tension.

Connaissant la structure de base de l'onduleur et les formes d'onde que l'on désire obtenir, il est facile d'en déduire les différentes séquences. Nous les avons représentées sur la figure 29 en indiquant le sens réel des courants.

Pour avoir une tension positive aux bornes de la charge, ce sont K1 et K3 qui doivent être

conducteurs . Pour une tension négative, ce sont K2 et K4 .

Les séquences 1a et 1b correspondent à des signes du courant différents pour une même tension positive aux bornes de la charge .

Les séquences 2a et 2b correspondent à des signes du courant différents pour une même tension négative aux bornes de la charge .

Représentons maintenant le point de fonctionnement des différents interrupteurs pour chaque séquence . En examinant comment l'on passe d'un point représentatif à un autre, on peut en déduire le type de commutation de chaque interrupteur pour passer d'une séquence à l'autre .

Pour passer de la séquence 1b à 2a (c'est-à-dire de +E à -E aux bornes de la charge), il faudra pour K1 et K3 une commande au blocage . Les interrupteurs K2 et K4 auront au contraire un amorçage spontané pour conduire un courant négatif .

Pour passer de la séquence 2b à 1a (c'est-à-dire de -E à +E aux bornes de la charge), il faudra pour K2 et K4 une commande au blocage tandis que K1 et K3 auront un amorçage spontané (pour conduire un courant négatif) .

Ainsi K1 K2 K3 et K4 devront être des interrupteurs complexes constitués, par exemple, d'un élément T commandé au blocage avec une diode en antiparallèle (figure 29) .

Si l'élément T est un thyristor il faudra le munir d'un circuit de commutation forcée .

Remarque importante : le passage de la séquence 1a à 1b correspond à l'inversion du sens du courant dans les interrupteurs K1 et K3, c'est-à-dire à la commutation du courant de la diode à l'élément T . Il faudra donc que ces éléments T1 et T3 reçoivent un signal de commande pour s'amorcer au passage par zéro du courant . Si ces éléments sont des thyristors, cela se fera en leur envoyant des impulsions larges, ou en rafales, pendant tout le temps potentiel de conduction des thyristors, c'est-à-dire à partir de t_0 (avec un léger retard pour permettre à T2 et T4 de se bloquer et éviter le court-circuit) et pendant $T/2$.

On fera un raisonnement identique pour le passage de la séquence 2a à la séquence 2b .

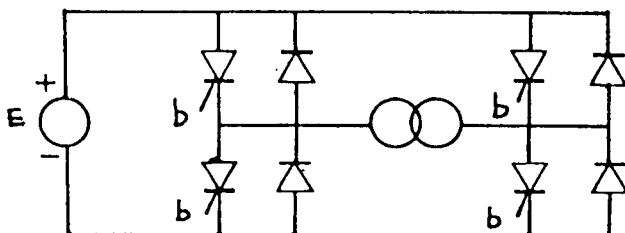
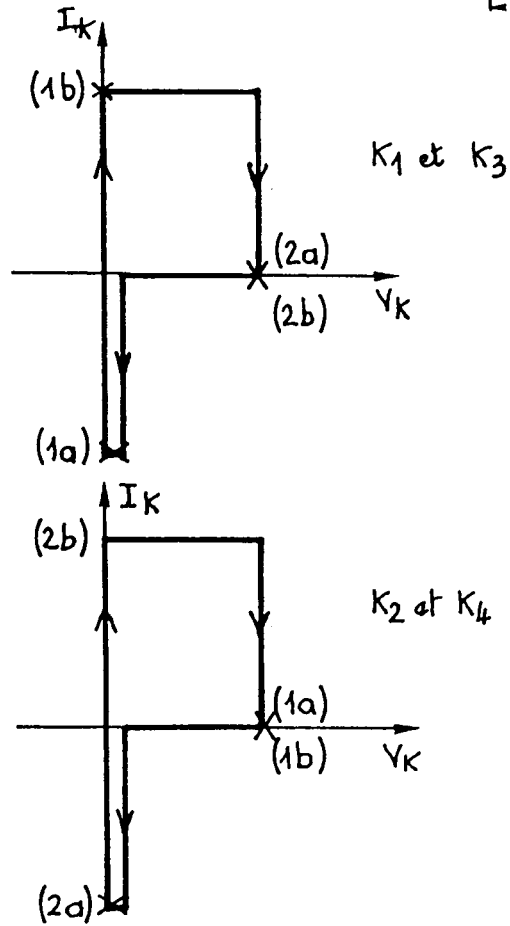
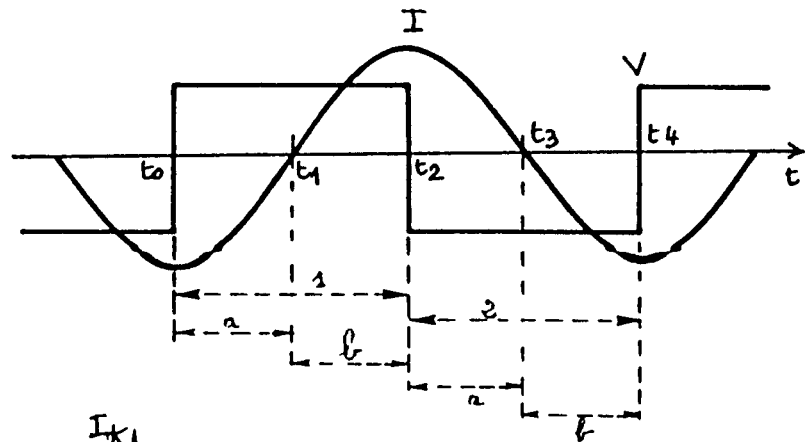
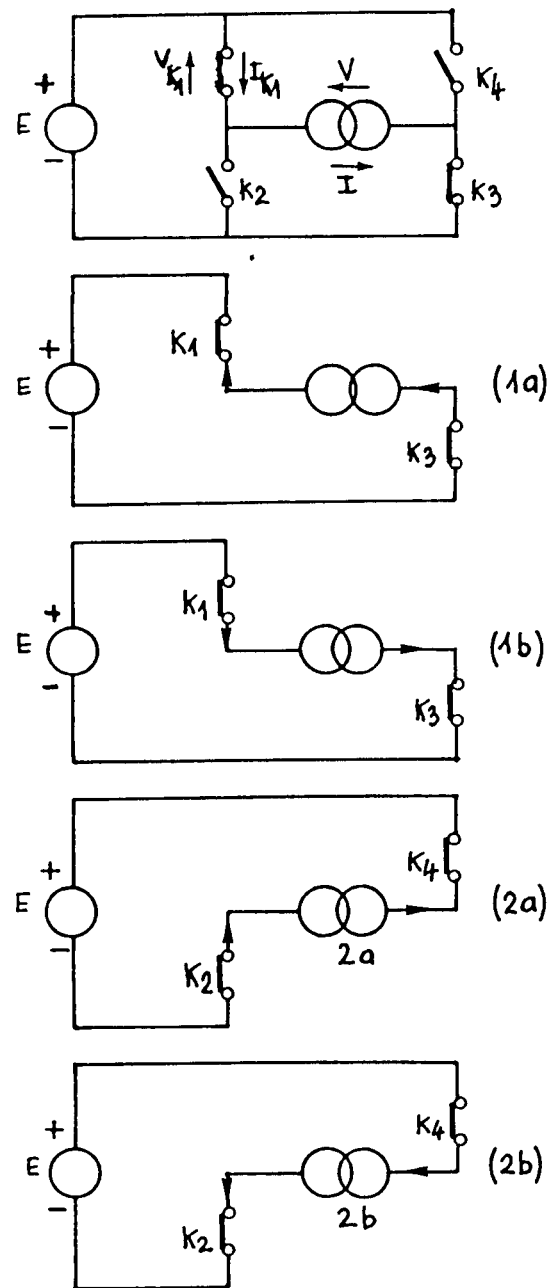
En résumé, un onduleur de tension débitant sur une charge imposant un courant en arrière par rapport à la tension devra utiliser des éléments commandés au blocage et dont l'amorçage a lieu au passage par zéro du courant .

Il est clair que le thyristor est mal adapté pour ce type de montage . Lorsque la puissance du montage le permettra, on préférera utiliser des interrupteurs complexes, synthétisés autour de transistors ou de thyristors blocables, appelés "thyristors-duaux" .

Deuxième cas : la charge de l'onduleur impose un courant en avance par rapport à la tension .

L'étude est tout à fait analogue à celle que nous venons de faire . La figure 30 en résume les résultats .

Un onduleur de tension débitant sur une charge imposant un courant en avance par rapport à la tension devra utiliser des éléments commandés à l'amorçage et dont le blocage aura lieu au passage par zéro du courant . Il est clair ici que les thyristors avec une diode tête-bêche sont parfaitement adaptés pour ce type de montage .

Figure 29 : Onduleur de tension avec déphasage arrière de I par rapport à V

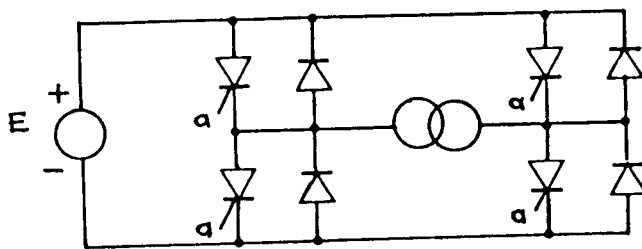
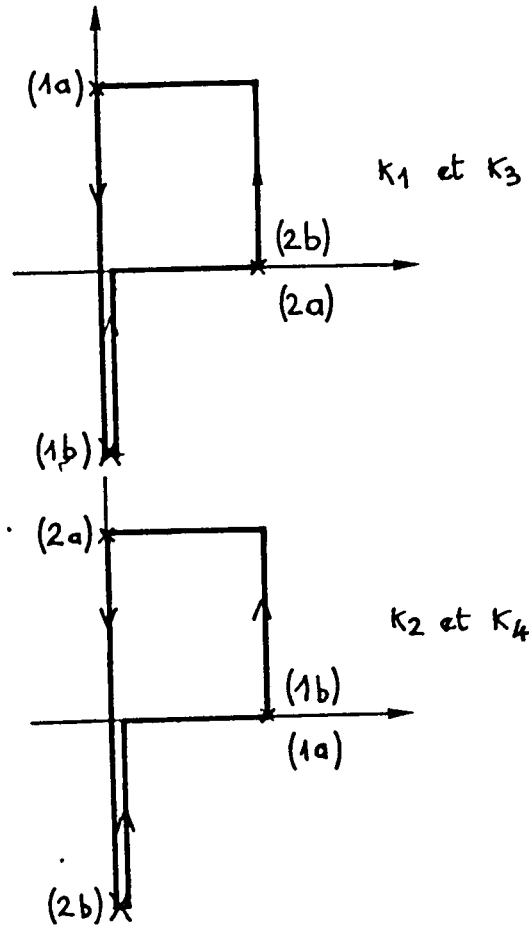
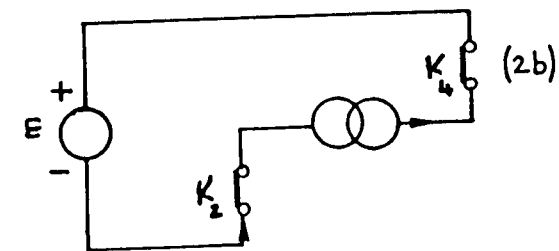
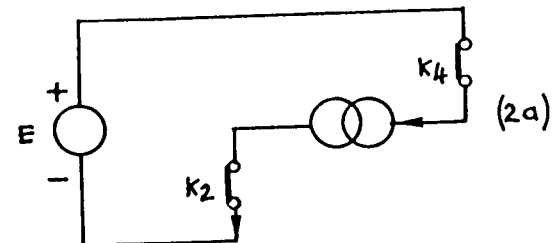
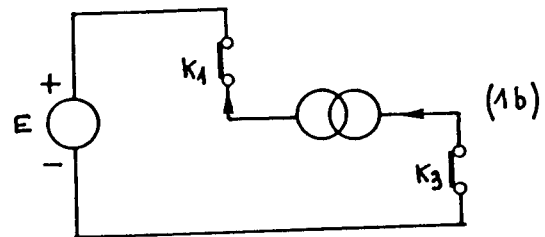
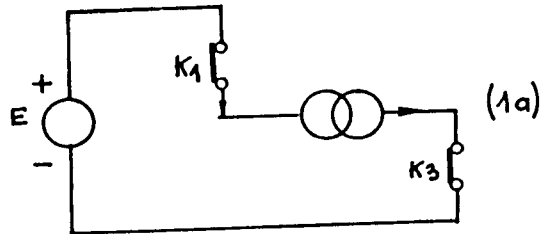
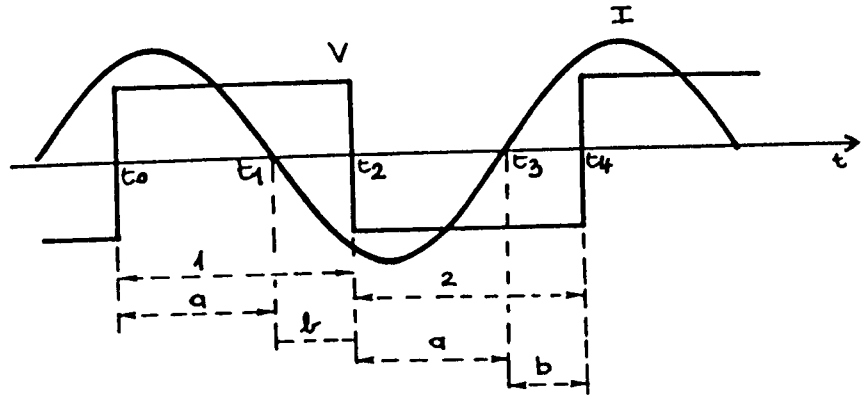
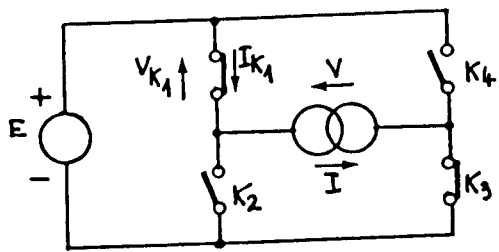


Figure 30 : Onduleur de tension avec déphasage avant de I par rapport à V