

A 60 LA DUALITE DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES

1/ INTRODUCTION

Une présentation synthétique des très nombreux circuits électroniques de puissance conduit naturellement à tenter d'établir des relations entre ces divers circuits.

Les éléments constitutifs des convertisseurs sont principalement des interrupteurs et des éléments réactifs. Ces interrupteurs peuvent être fermés ($V_k = 0$) ou ouvert ($I_k = 0$), uni- ou bidirectionnels en tension et/ou en courant, commandés à l'ouverture et/ou à la fermeture. Les éléments réactifs sont des inductances (couplées ou non) et des condensateurs aptes à stocker de l'énergie respectivement sous forme d'un courant et d'une tension. D'autre part, ces convertisseurs contrôlent les échanges d'énergie entre des sources qui sont de tension ou de courant.

Parmi tous ces éléments, il existe donc une relation de bijection évidente qui associe à chaque élément possédant certaines propriétés en tension (resp. en courant) un autre élément possédant les mêmes propriétés en courant (resp. en tension). Cette relation, qui n'est certes pas nouvelle, s'appelle la dualité.

Après avoir rappelé quelques notions de base sur la dualité dans les graphes et les circuits (le lecteur se reportera à la bibliographie concernée pour de plus amples détails), nous montrons dans ce chapitre comment étendre ce concept aux circuits électroniques de puissance.

Ces circuits comprenant des interrupteurs, il apparaît dès lors nécessaire de définir les éléments duaux de ces interrupteurs. Ceci conduit, en particulier, à mettre en évidence un "nouvel" interrupteur : "le thyristor-dual". Enfin, nous tentons d'étendre l'application des règles de la dualité à des convertisseurs complexes, notamment les convertisseurs polyphasés, qui ne sont pas applicables sur un plan sans imbrication de branches.

2/ RAPPELS SUR LA DUALITE DANS LES GRAPHES ET LES CIRCUITS

La dualité permet de définir des couples de grandeurs électriques duales (ou corrélatives) qui sont entre autres :

- Courant - Tension
- Résistance - Conductance
- Inductance - Capacité
- Impédance - Admittance

- Flux - Quantité d'électricité

Il faut noter que la puissance et l'énergie électriques sont corrélatives d'elles-mêmes.

La dualité ne s'applique qu'aux graphes et circuits qui sont applicables sur un plan sans imbrication de branches. (Cette limitation prend toute son importance avec les convertisseurs polyphasés).

Deux graphes sont duaux si :

- il existe une relation biunivoque entre les mailles de l'un des graphes, y compris la maille externe, et les noeuds de l'autre graphe,

- à chaque branche "B" commune à deux mailles de l'un des graphes est associée, dans l'autre graphe, une branche "B*" connectée entre les deux noeuds associés à ces deux mailles.

Deux circuits électriques sont duaux si :

- les graphes qui leurs sont associés sont duaux,

- les éléments placés sur les branches duales B et B* appartenant à chacun de ces graphes sont duaux.

L'exemple classique de deux circuits duaux est donné à la figure 1.

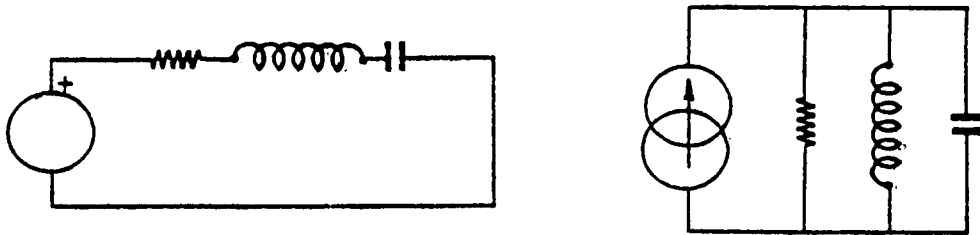


Figure 1 : Exemple de circuits duaux

Les équations qui caractérisent les fonctionnements de ces deux circuits duaux s'écrivent sous la même forme symbolique :

$$F(p) = \alpha H(p) + \beta p H(p) + \frac{1}{\gamma p} H(p)$$

Le circuit dual d'un circuit donné s'obtient en marquant un point dans chacune des mailles du circuit et un point à l'extérieur du circuit qui correspond à la maille externe (Fig 2). Chacun de ces points représente un noeud du circuit dual. Entre chaque paire de points, pour chaque branche commune aux deux mailles qui entourent ces points, on insère une branche sur laquelle est placé l'élément corrélatif de l'élément placé sur la branche commune aux dites mailles.

Un exemple simple de recherche de circuit dual est donné à la figure 2.

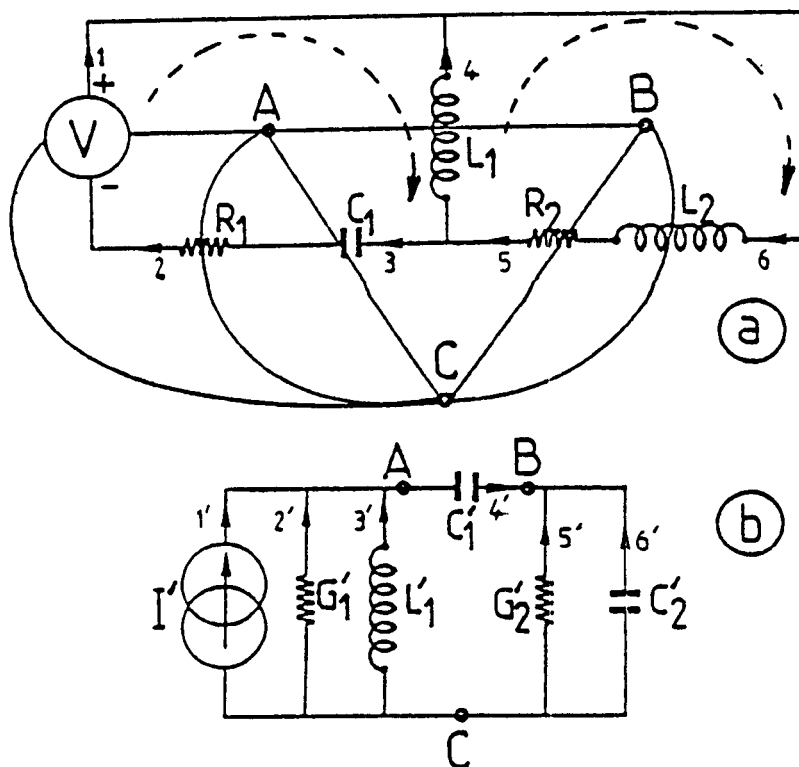


Figure 2 : Exemple de recherche d'un circuit dual

Après la recherche de la structure duale, il est nécessaire de définir les signes des grandeurs duales comme par exemple le signe de la source de courant I' de la figure 2b. Il faut pour cela orienter les branches du circuit initial et en déduire une orientation des branches du circuit dual. Avec l'orientation choisie, la loi des mailles pour le circuit de la figure 2a s'écrit :

$$V_1 + V_2 + V_3 - V_4 = 0$$

$$V_4 + V_5 + V_6 = 0$$

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_5 + V_6 = 0$$

où V_i désigne la tension aux bornes de la branche numérotée i .

Pour le noeud A, la loi des noeuds s'écrit par dualité :

$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0 \quad (1)$$

et pour les noeuds B et C :

$$I_4 + I_5 + I_6 = 0 \quad (2)$$

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_5 + I_6 = 0 \quad (3)$$

L'orientation des branches des circuits de la figure 2b est directement déduite des expressions (1), (2) et (3).

Cette détermination du signe des grandeurs duales est fondamentale lorsque les circuits

comprennent des éléments unidirectionnels.

3/ INTERRUPTEURS STATIQUES DUAUX

La notion de dualité peut être étendue aux convertisseurs statiques qui sont fondamentalement des circuits électriques. Néanmoins, pour être complètement applicable, elle nécessite la connaissance des éléments duaux des interrupteurs.

Certains auteurs ont contourné cette difficulté en décomposant le fonctionnement du convertisseur considéré en ses différentes séquences. Les interrupteurs fermés (resp. ouverts) sont ensuite remplacés par des court-circuits (resp. des circuits ouverts) dans les circuits associés à chacune de ces séquences. L'application des règles de dualité à chacun de ces circuits permet d'obtenir les circuits associés aux différentes séquences de fonctionnement du convertisseur dual qu'il faut alors identifier.

Telle quelle, cette façon de procéder souffre néanmoins d'une grave lacune puisque seul le fonctionnement entre les commutations, qui ne détermine que les caractéristiques statiques des interrupteurs, est pris en considération. Les commutations des interrupteurs (caractéristiques dynamiques) sont dans ce cas occultées.

Le tableau de la figure 3 présente les différents interrupteurs à deux et trois segments, et montre les relations de dualité qui existent entre eux. De toute évidence, les interrupteurs deux segments que sont la diode et les composants "du type transistor" sont des interrupteurs qui sont leur propre dual.

En ce qui concerne les interrupteurs à trois segments, l'application de la dualité à un tel interrupteur, qui possède un amorçage et un blocage commandés, conduit à un interrupteur qui est facilement identifiable. En revanche, les interrupteurs possédant un amorçage commandé et un blocage spontané et qui sont "du type thyristor" associés ou non à une diode en antiparallèle, ont des interrupteurs duaux qui ne correspondent à aucun composant discret existant. Néanmoins, ces derniers peuvent être synthétisés à l'aide d'un "nouvel" interrupteur, associé ou non à une diode en série, qui possède les caractéristiques duales du thyristor. Cet interrupteur est appelé thyristor-dual dans toute la suite .

Figure 3 : Relations de dualité entre les interrupteurs:

4/ LE THYRISTOR-DUAL

A partir des propriétés du thyristor, il est possible de définir par dualité les propriétés du thyristor-dual sans faire aucune hypothèse sur la nature de ses éléments constitutifs.

Le thyristor-dual s'amorce si sa commande le permet ET si la tension à ses bornes est nulle, il se bloque par la commande s'il est parcouru par un courant positif. Cette commande au blocage est inactive si le courant est négatif, tout comme la commande à l'amorçage d'un thyristor est inactive si la tension à ses bornes est négative.

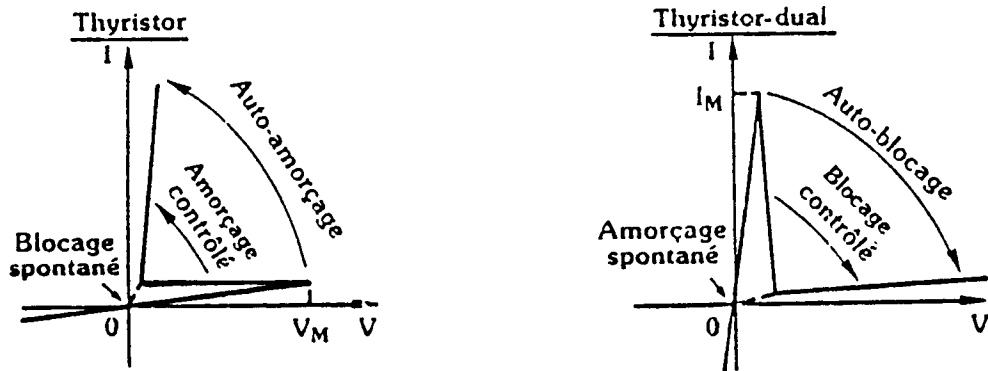
Les pertes par commutation à l'ouverture du thyristor sont nulles puisque cette ouverture s'effectue sous courant nul (commutation spontanée). De la même façon, les pertes par commutation à la fermeture du thyristor-dual sont aussi nulles puisque cette fermeture s'effectue sous tension nulle.

Une inductance en série avec le thyristor permet de protéger ce dernier contre les di/dt trop élevés lors de son amorçage et donc de limiter les pertes pendant cet amorçage. On en déduit

immédiatement qu'un condensateur placé en parallèle sur le thyristor-dual permettra de protéger ce dernier contre des dv/dt importants lors de son blocage et donc de limiter les pertes par commutation à l'ouverture.

Une propriété intéressante du thyristor-dual, par la sécurité de fonctionnement qu'elle entraîne, est celle de disjonction. En effet, si le thyristor s'amorce lorsqu'une surtension se produit à ses bornes ($V=V_M$) une surintensité provoque le blocage du thyristor-dual ($I=I_M$).

Les propriétés du thyristor et du thyristor-dual sont rassemblées dans le tableau comparatif de la figure 4.



Conditions d'amorçage :
 $V > 0$ + commande d'amorçage.

Condition de blocage :
 $I < 0$.

Auto-amorçage si $V = V_M$.

Courant maximal à l'état passant.

Nécessité d'une protection en :

$\frac{dI}{dt} > 0$ à l'amorçage.

λ Inductance de protection.

Diminution des pertes à l'amorçage

Conditions de blocage :
 $I > 0$ + commande de blocage.

Condition d'amorçage :
 $V < 0$.

Auto-blocage si $I = I_M$.

Tension maximale à l'état bloqué.

Nécessité d'une protection en :

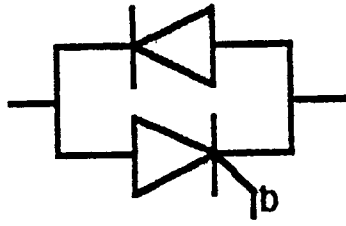
$\frac{dV}{dt} > 0$ au blocage.

λ Condensateur de protection.

Diminution des pertes au blocage

Figure 4 : Tableau comparatif des propriétés du thyristor et du thyristor dual

Pratiquement, le thyristor-dual est réalisé à l'aide des composants habituels (transistor, diode...) et de circuits spécifiques de commande. Le thyristor-dual est symbolisé de la façon suivante :



5/ APPLICATION DES REGLES DE DUALITE DANS LES CONVERTISSEURS STATIQUES

La connaissance des interrupteurs duaux permet de définir complètement les structures duales des convertisseurs statiques. La recherche des structures duales à partir de celles déjà existantes se fait par une méthode semblable à celle appliquée dans le cas des circuits linéaires. Cependant, la présence d'éléments unidirectionnels dans les circuits de convertisseurs nécessite de connaître l'orientation des branches du circuit dual préalablement au positionnement des éléments corrélatifs sur ces branches.

5-1/ Recherche du convertisseur dual d'un convertisseur donné

Nous ne nous intéressons ici qu'aux convertisseurs applicables sur un plan sans imbrication de branches.

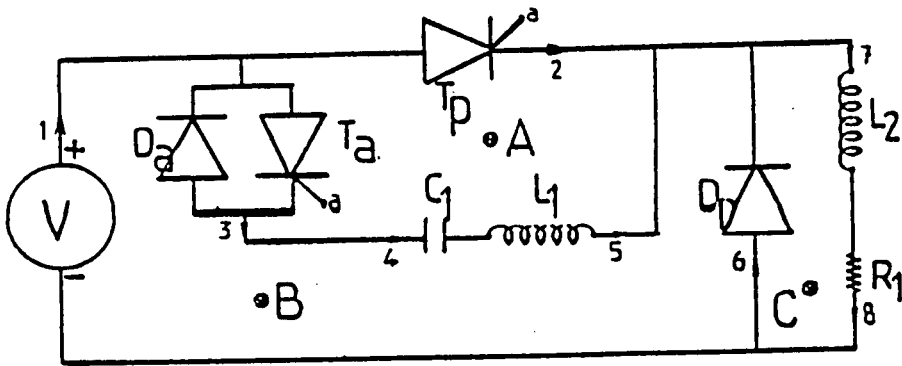
Chaque branche du circuit considéré est numérotée et orientée de façon tout à fait arbitraire. On dessine ensuite le graphe ainsi orienté de ce circuit. Dans chaque maille adjacente de ce graphe, on marque un point qui correspond au noeud dual de ladite maille et un point quelconque à l'extérieur du circuit. Entre chaque paire de noeuds duaux, on insère une branche pour chaque élément commun au deux mailles qui entourent ces noeuds.

Un sens de parcours dans une maille du graphe initial étant fixé, toutes les branches orientées dans ce sens ont des branches duales orientées dans le même sens vis à vis du noeud dual de cette maille.

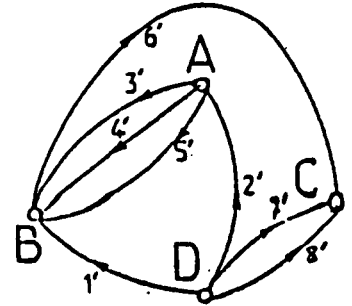
Le graphe dual étant ainsi orienté, on place sur chaque branche l'élément corrélatif. En sachant que les éléments unidirectionnels sont définis par des caractéristiques courant-tension, à une branche orientée dans le sens courant (respectivement tension) de la caractéristique de l'élément qu'elle comporte correspond par dualité une branche orientée dans le sens tension (respectivement courant) de la caractéristique de l'élément corrélatif.

5-2/ Exemples

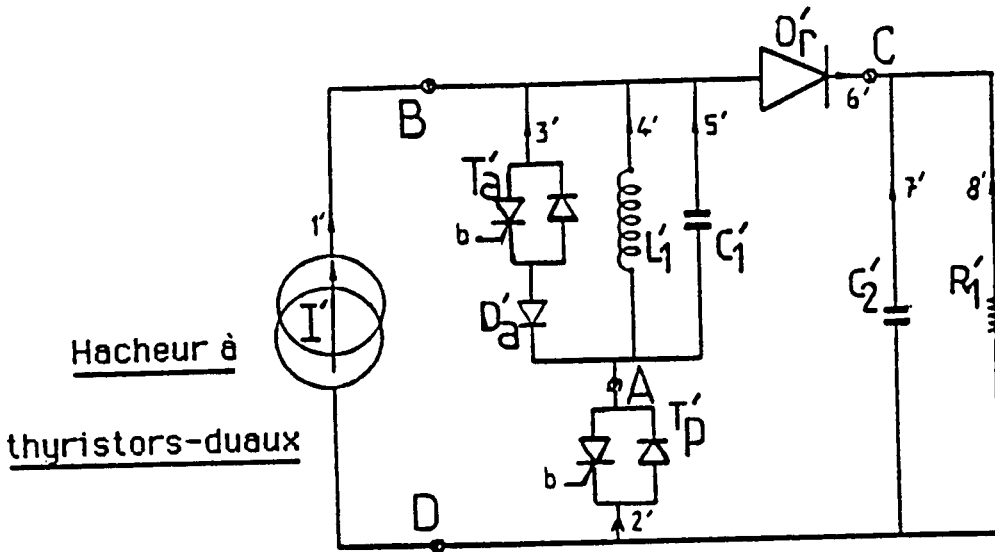
La méthode de recherche du convertisseur dual d'un convertisseur donné exposée ci dessus est tout à fait générale. Elle est appliquée ici dans la recherche du convertisseur dual d'un hacheur à thyristors à commutation forcée (Fig 5).



Hacheur à thyristors



Graphe dual



Hacheur à thyristors-duaux

Figure 5 : Recherche du convertisseur dual d'un hacheur à thyristor à commutation forcée

La structure en pont est invariante par dualité. Il suffit de remplacer tous les éléments par leurs duaux et de permuter K'_2 et K'_3 (Figure 6).

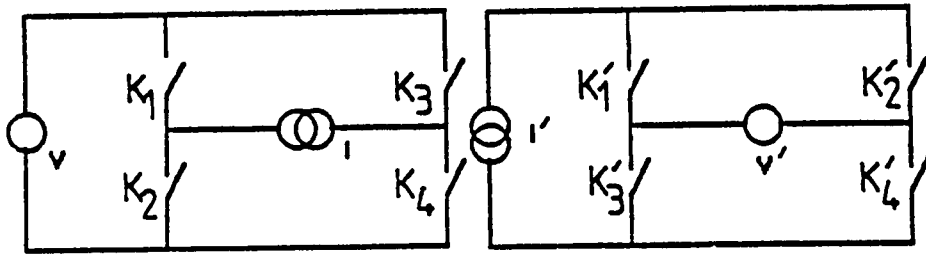


Figure 6

Dans les exemples des figure 7, 8 et 9, la recherche des circuits duaux est basée sur la remarque précédente.

Il est aussi aisé de démontrer que le hacheur abaisseur ("Buck") est le dual du hacheur survolteur ("Boost"), et que le hacheur à stockage capacitif ("Cuk converter") est le dual du hacheur à stockage inductif abaisseur-élevateur ("buck-boost").

Remarque : Un phénomène important dans les convertisseurs continu/ continu est la conduction discontinue qui correspond à l'annulation du courant dans l'inductance pendant une séquence de restitution d'énergie avant la fin de cette même séquence. Ce phénomène possède son dual dans les convertisseurs où le stockage d'énergie est effectué par un condensateur et il se traduit par une annulation de la tension aux bornes de ce condensateur pendant la séquence de restitution d'énergie.

6/ EXTENSIONS A DES STRUCTURES COMPLEXES

Jusqu'à présent les règles de dualité ont été appliquées complètement aux circuits des convertisseurs statiques applicables sur un plan sans imbrication de branches et qui ne comprenaient pas de transformateur. Ces deux restrictions constituent un obstacle à une généralisation de la dualité, obstacle qui peut être contourné en s'intéressant non pas au circuit du convertisseur, mais à la fonction réalisée par ce convertisseur.

Un transformateur est constitué, dans le cas le plus simple, de deux inductances couplées. Cette possibilité de couplage entre les inductances ne possède pas son dual avec les condensateurs. Néanmoins, si on considère principalement l'effet transformateur, à savoir la transformation des tensions et des courants telle que les puissances à l'entrée et à la sortie soient identiques, alors l'élément dual d'un transformateur idéal est aussi un transformateur idéal.

Les convertisseurs non applicables sur un plan sans imbrication de branches sont essentiellement les convertisseurs continu/alternatif polyphasés et plus généralement les convertisseurs directs de fréquence.

Ces convertisseurs directs de fréquence sont des circuits qui gèrent les échanges d'énergie entre un système polyphasé de tension et un système polyphasé de courant. Ils sont pratiquement constitués d'une matrice d'interrupteurs apte à interconnecter chacune des phase de l'un des système à une phase quelconque de l'autre système.

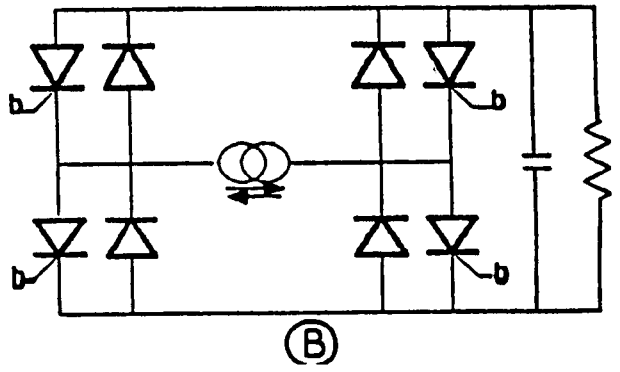
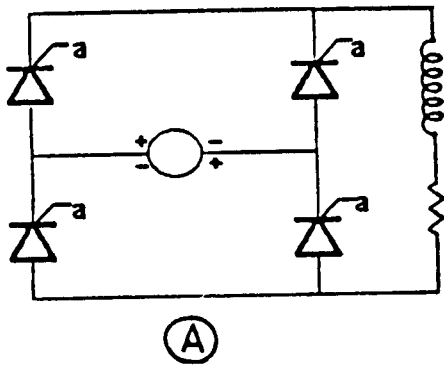


Figure 7

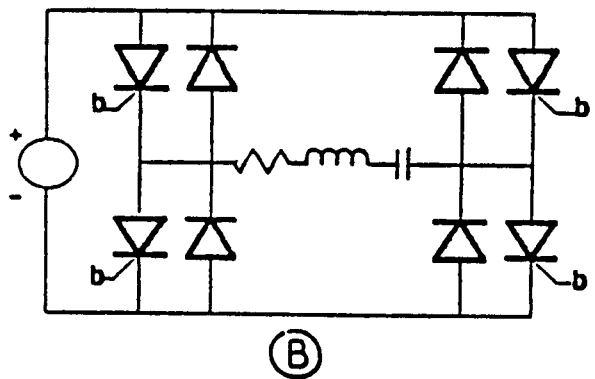
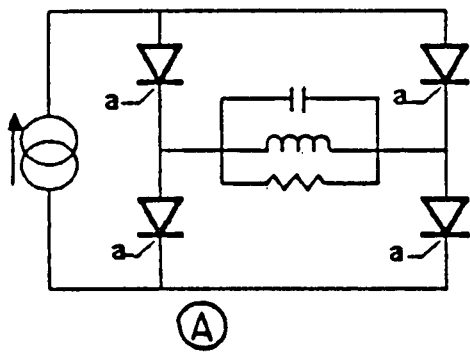


Figure 8

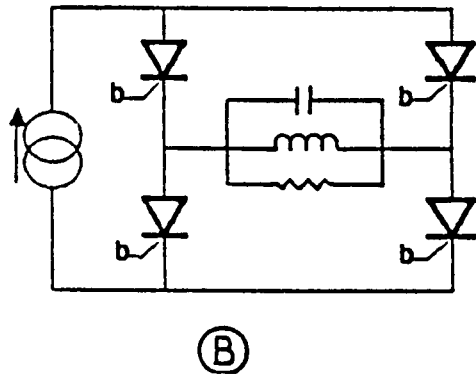
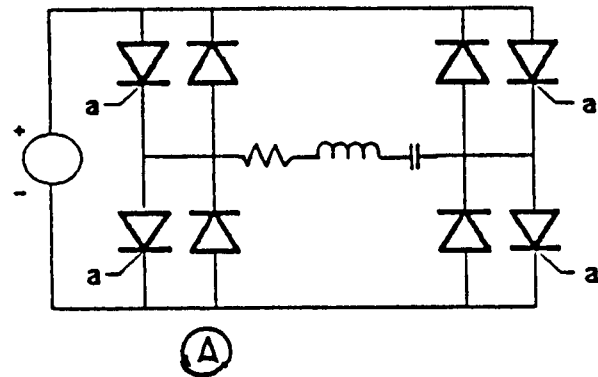


Figure 9

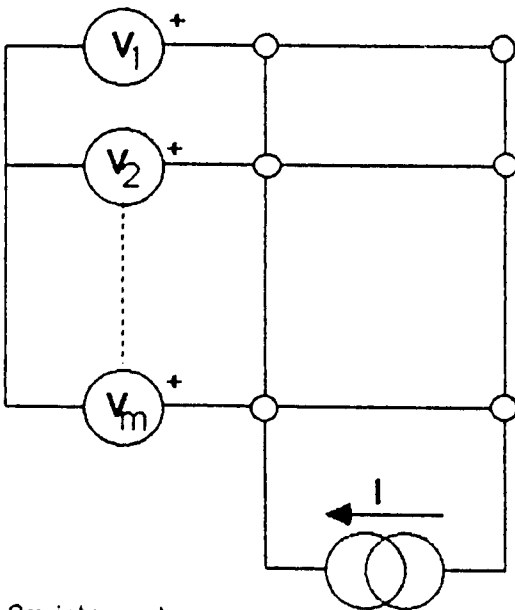
Il faut tout de suite remarquer que, décomposer le fonctionnement du convertisseur en ses différentes séquences, appliquer les règles de dualité aux circuits associés à chacune des séquences de fonctionnement, puis identifier (à partir des circuits duaux obtenus) le convertisseur dual, est une méthode qui reste utilisable à la seule condition que chacun desdits circuits soit lui-même applicable sur un plan. Néanmoins pour que les convertisseurs soient réellement duaux, il faut bien évidemment que les interrupteurs qui les composent aient aussi des caractéristiques dynamiques duales.

Afin d'alléger cette présentation, seul est envisagé ici le problème de la recherche du

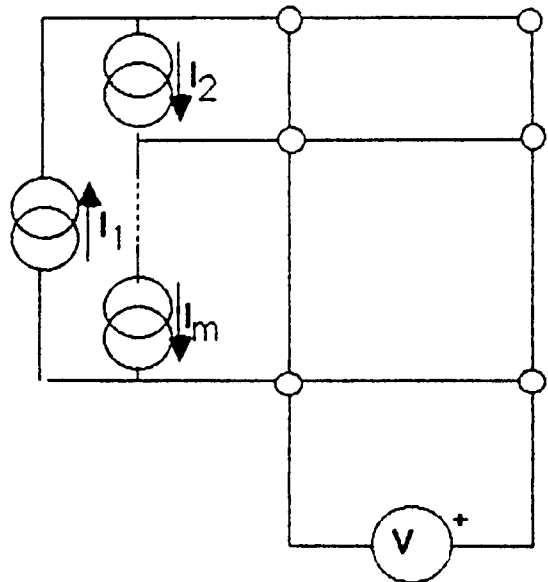
convertisseur dual du redresseur (ou pont de Graetz) m -phasé ($m > 2$), qui est un cas particulier des convertisseurs directs de fréquence.

Dans le cas le plus général, un pont de Graetz est un dispositif statique (Fig 10a) qui permet d'appliquer aux bornes d'une source de courant continue une quelconque tension entre phases d'un système polyphasé, équilibré ou non, de sources de tension connectées en étoile (le couplage triangle implique un système équilibré).

Par dualité on déduit qu'un pont de Graetz dual est un dispositif statique (Fig 10b) qui permet de faire circuler dans une source de tension continue un quelconque courant par fil de ligne d'un système polyphasé, équilibré ou non, de sources de courant connectées en triangle (le couplage en étoile sans neutre impliquant un système équilibré).



2m interrupteurs :
2 interrupteurs passants
2m-2 interrupteurs bloqués



2m interrupteurs :
m interrupteurs passants
m interrupteurs bloqués

Figure 10 : Application de la dualité à un convertisseur polyphasé (pont de Graetz).

Le pont de Graetz m -phasé, comme son dual, est constitué d'une matrice de $2m$ interrupteurs. Ces interrupteurs possèdent des caractéristiques statiques et dynamiques duales.

Afin de ne pas court-circuiter les sources de tension et de ne pas ouvrir les sources de courant et en négligeant les phénomènes de commutation, un interrupteur et un seul doit être fermé à chaque instant dans chaque colonne de la matrice de la figure 10a, ces deux interrupteurs pouvant d'ailleurs être situés sur la même ligne lorsqu'une tension nulle est appliquée à la charge (roue libre). Ceci montre que l'onde de tension aux bornes de la source de courant continu peut être considérée comme la différence de deux ondes de tension d'indice de pulsation m .

Pour les mêmes raisons, un interrupteur et un seul doit être fermé à chaque instant dans chaque ligne de la matrice de la figure 10b, ces m interrupteurs pouvant d'ailleurs être situés sur une même colonne lorsqu'un courant nul circule dans la charge. L'onde de courant dans la source de tension continue résulte donc de la somme de m ondes de courant d'indice de pulsation 2.

Cette analyse met en évidence une différence fondamentale dans les fonctionnements de ces deux convertisseurs possédant des fonctions duales, dont les circuits sont sensiblement identiques mais tous deux non applicables sur un plan. On remarque que les deux fonctionnements sont rigoureusement duaux dans le cas particulier où $m = 2$, cas particulier dans lequel les circuits sont applicables sur un plan.

Ces circuits duaux sont représentés plus en détail à la figure 11 lorsque les réseaux alternatifs sont triphasés ($m = 3$) équilibrés.

Dans le redresseur de tension, la tension aux bornes de la source de courant continu est contrôlée par le réglage du temps pendant lequel la tension est positive aux bornes des thyristors et cette tension vaut :

$$U = \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \sqrt{3} V_{\max} \cos \theta_a$$

où θ_a désigne l'angle de retard à l'amorçage,

et V_{\max} l'amplitude des tensions V_1 , V_2 et V_3 .

Par dualité, dans le redresseur de courant, le courant dans la source de tension continue est contrôlé par le réglage du temps pendant lequel le courant est positif dans un thyristor-dual (c'est à dire le temps de conduction de l'interrupteur commandé) avant de déclencher son blocage. Ce courant continu I^* vaut :

$$I^* = \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \sqrt{3} I_{\max} \cos \theta_b$$

où θ_b désigne l'angle de retard au blocage

et I_{\max} l'amplitude des courants I_1 , I_2 et I_3 .

Ce redresseur de courant a en fait la structure bien connue d'un onduleur de tension triphasé. Son fonctionnement en onduleur non autonome est cependant moins bien connu car il suppose un réseau alternatif triphasé de courant établi pour permettre un contrôle du transfert de puissance par un réglage de phase.

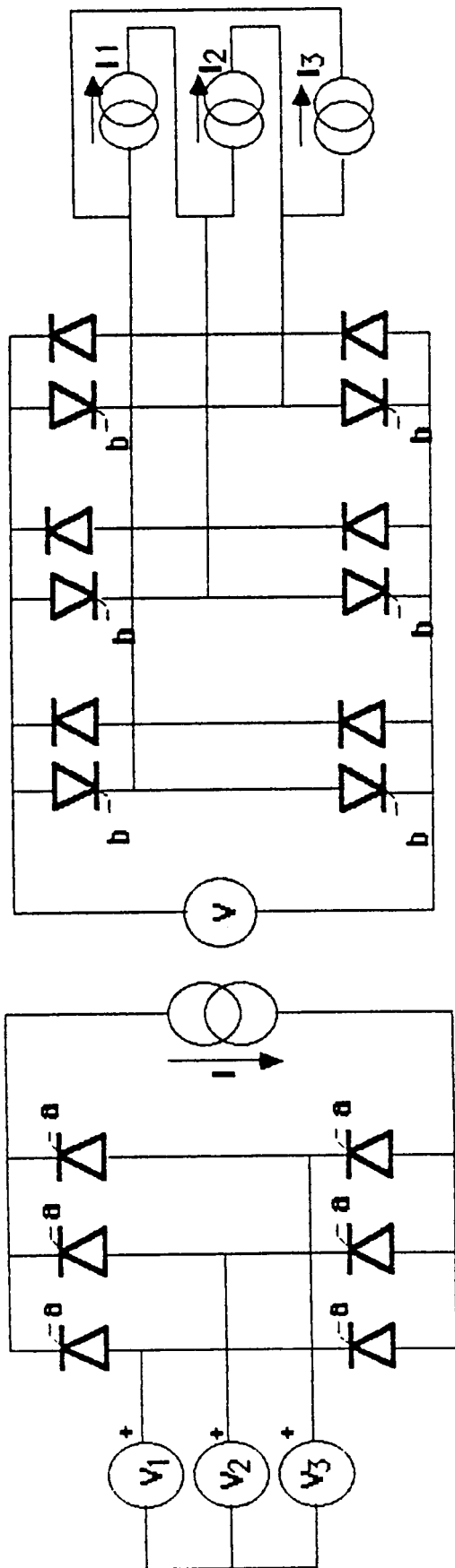


Figure 11

77 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons montré comment les règles de la dualité pouvaient être appliquées aux convertisseurs statiques en introduisant la notion d'interrupteur dual.

Pour être appliquée complètement dans les circuits de convertisseurs, la dualité implique de prendre en compte un "nouvel" interrupteur qui présente les propriétés duales de celles du thyristor et qui est appelé "thyristor-dual".

La notion de dualité n'est certes pas nouvelle dans les convertisseurs, et elle a déjà été largement utilisée (sans faire appel aux interrupteurs duaux) dans la présentation des convertisseurs moyenne fréquence tels que l'onduleur parallèle et l'onduleur série à thyristors (Fig.8a et Fig.9a).

Ces convertisseurs ont des structures duales mais des mécanismes de commutation identiques. En d'autres termes, les interrupteurs qui composent ces convertisseurs ont des caractéristiques statiques duales mais des caractéristiques dynamiques qui sont parcourues dans le même sens.

D'autre part, au sein d'une même structure, deux interrupteurs (possédant nécessairement des caractéristiques statiques identiques) qui présentent des caractéristiques de commutation duales peuvent être utilisés. Aussi, dans l'onduleur série à thyristors (Fig 9b) et l'onduleur série à thyristors duaux (Fig 8b), les interrupteurs ont des caractéristiques dynamiques décrites en sens inverse.

Appliquée uniquement à la structure ou aux mécanismes de commutation, la dualité ne permet souvent que d'obtenir des propriétés qualitatives de ces nouveaux circuits. En revanche, lorsqu'elle est appliquée conjointement à la structure et à la commutation d'un convertisseur, elle permet aussi de transposer au convertisseur dual des résultats quantitatifs concernant le convertisseur en question. La dualité constitue alors une méthode fructueuse de recherche de nouveaux circuits de conversion de puissance.

La dualité ne doit donc pas être finalement considérée comme un exercice purement "universitaire" mais bien comme une méthode d'étude et de synthèse de l'électronique de puissance.