



HAL
open science

Méthode de synthèse de la structure des convertisseurs multi-niveaux

P. Bartholoméüs, P. Le Moigne, C. Rombaut

► **To cite this version:**

P. Bartholoméüs, P. Le Moigne, C. Rombaut. Méthode de synthèse de la structure des convertisseurs multi-niveaux. *Journal de Physique III*, 1997, 7 (9), pp.1829-1850. 10.1051/jp3:1997226. jpa-00249684

HAL Id: jpa-00249684

<https://hal.science/jpa-00249684>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Méthode de synthèse de la structure des convertisseurs multi-niveaux

P. Bartholoméüs (*), P. Le Moigne et C. Rombaut

Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance (**) École Centrale de Lille,
BP. 48, Cité Scientifique 59651 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

(Reçu le 7 mars 1997, accepté le 27 mai 1997)

PACS.84.30.Jc – Power electronics; power supply circuits

PACS.07.50.-e – Electrical and electronic components, instruments, and techniques

Résumé. — Une méthode d'étude des structures de convertisseurs réalisés à partir de cellules multi-niveaux à association de sources de tension en série est présentée. La notion de non réversibilité en puissance de la cellule de commutation est introduite. Elle permet la définition des structures de conversion réversibles ou non réversibles. À partir du sens de circulation du courant dans les cellules, il est possible de définir la caractéristique statique des interrupteurs réalisant les connexions entre un des différents points de la source de tension et la source de courant. Deux trames d'interrupteurs sont considérées. Pour la première, nommée "cellule à N_c interrupteurs", les connexions sont réalisées par un seul interrupteur à la fois. Pour la seconde, constituée d'un empilage de cellules élémentaires de commutation, et nommée "cellule à association de cellules élémentaires", les connexions nécessitent la mise en série de plusieurs interrupteurs. À partir de ces deux trames d'interrupteurs, plusieurs cellules conduisant à de nouvelles structures de redresseurs non réversibles ont pu être définies.

Abstract. — In this paper a study of the multilevel converters' structures is presented. Multilevel cells with series connection of voltage sources are considered. The notion of power reversibility of the cell is introduced. It allows for the definition of reversible and non-reversible converter structures. The knowledge of the sign of the current which circulates in the cell permits the definition of the static characteristics of the switches involved in the connection between the different points of the voltage source and the current source. Two configurations of the cells are studied. For each one, the static characteristic of each switch is determined. For the first configuration, called " N_c -switch cell", each point of the voltage source is connected to the current source by one switch only. The second one is constituted of a stacking-up of switching elementary cells. It is called "elementary cell association structure". In this case, several switches are involved in each connection. Thanks to these two configurations, different cells have been developed, and they allow for the definition of new structures of rectifiers.

(*) Auteur auquel doit être adressée la correspondance (e-mail : BARTHOLO@EC-LILLE.FR)
(**) CNRS-EP-0121

1. Introduction

Le domaine privilégié des convertisseurs multi-niveaux est celui des hautes tensions. En effet, lorsque les tensions d'alimentation sont supérieures aux valeurs maximales admissibles par les composants de puissance, il est nécessaire de les associer afin de limiter les contraintes en tension appliquées à chacun d'eux [1]. Cette solution offre des degrés de liberté supplémentaires qui peuvent être mis à profit par l'utilisation des techniques multi-niveaux. Celles-ci permettent alors, comme le montre la figure 1, une amélioration de la qualité de la tension délivrée, entraînant de la sorte une diminution de la taille des filtres associés [2], ainsi qu'un accroissement de la puissance transitée [3].

On distingue essentiellement deux familles de convertisseurs fonctionnant en mode multi-niveaux :

- Les structures basées sur l'association de convertisseurs conventionnels qui ont la particularité de nécessiter une isolation électrique entre chaque dispositif. Cette isolation peut être faite en connectant l'alimentation alternative des convertisseurs aux primaires (ou secondaires) de transformateurs dont les secondaires (ou primaires) sont branchés en série (Fig. 2a). Ce type de structure a déjà été utilisé pour des fonctionnements monophasés ou triphasés de forte puissance [4].

L'isolation peut aussi être obtenue avec des alimentations continues distinctes (Fig. 2b) [5]. Elle est particulièrement intéressante pour les applications de type filtre actif monophasé [6].

- Les structures composées de cellules multi-niveaux. Elles peuvent être soit composées de cellules imbriquées (Fig. 3a), développées au LEEI [7, 8], soit de cellules avec mise en série de sources de tension [9]. Le NPC [10, 11] (Neutral Point Clamped), en est le principal représentant (Fig. 3b). Il a fait l'objet de nombreuses études [12–15]. La cellule NPC peut aussi être généralisée à un nombre quelconque de niveaux (Fig. 3c). Elle a été présentée dans [16] mais elle apparaît également dans [10]. Son application a été envisagée dans le cas de cellules 5-niveaux [17–19].

Cet article a pour objet l'étude des structures à base de *cellules multi-niveaux avec mise en série de sources de tension*. Nous proposons une méthode de synthèse pour la détermination de ces structures. La notion de non réversibilité des cellules y est utilisée dans le but de montrer les simplifications qui peuvent être obtenues lorsque le transit d'énergie est unidirectionnel.

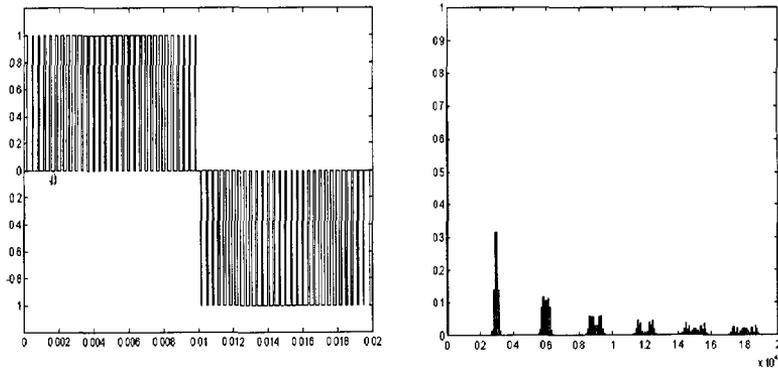
2. Cellule multi-niveaux à sources de tension en série

2.1. DÉFINITION. — La cellule de commutation multi-niveaux à sources de tension en série, représentée figure 4, est un dispositif réalisant la connexion successive d'une borne de la source de courant alimentant (ou alimentée par) la cellule, à l'une des N_c bornes de la source de tension ($N_c > 2$). La seconde borne de la source de courant est alors connectée soit à une autre cellule, soit à un point dont le potentiel électrique est fixe.

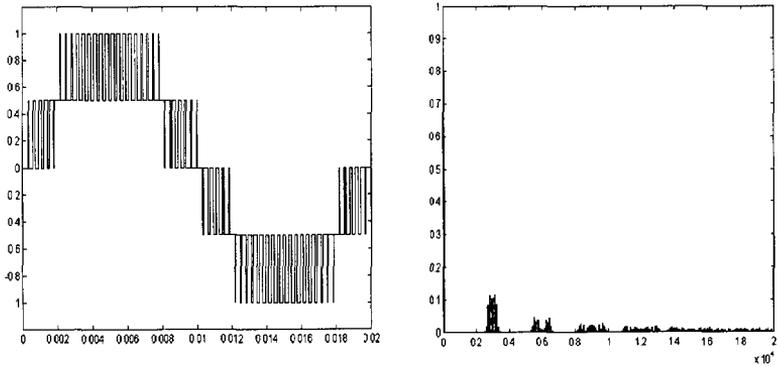
La création des N_c bornes de potentiels régulièrement répartis nécessite $N_c - 1$ sources de tension de même valeur $E/(N_c - 1)$.

2.2. CELLULE À N_c INTERRUPTEURS. — Nous considérons tout d'abord que les connexions entre les différentes bornes de la source de tension et la source de courant sont réalisées par N_c interrupteurs comme le montre la figure 5. La cellule ainsi obtenue est nommée *cellule à N_c interrupteurs*.

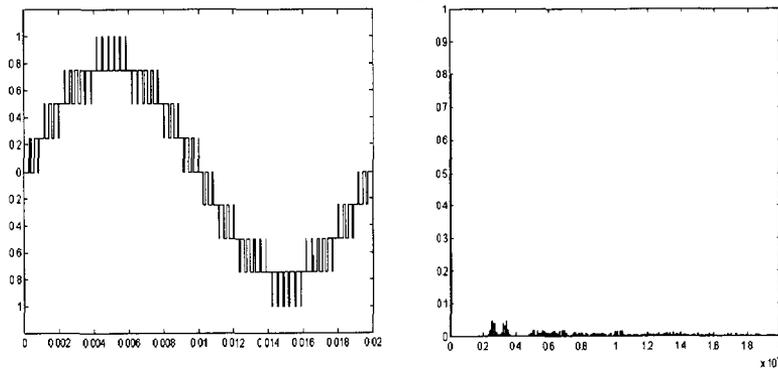
La fermeture d'un interrupteur impose la valeur du potentiel de la borne A de la source de courant. Il est donc nécessaire qu'à chaque instant, un et un seul interrupteur soit fermé de



Onde MLI 3-niveaux et spectre correspondant



Onde MLI 5-niveaux et spectre correspondant



Onde MLI 9-niveaux et spectre correspondant

Fig. 1 — Différentes ondes modulées en largeur d'impulsion et leur spectre [Different pulse-width-modulated waveforms and there spectrum.]

manière à ne jamais laisser en circuit ouvert la source de courant et à ne jamais connecter deux points de potentiels différents.

Si f_{c_j} représente la fonction de connexion de l'interrupteur k_j , définie par $f_{c_j} = 1$ lorsque k_j

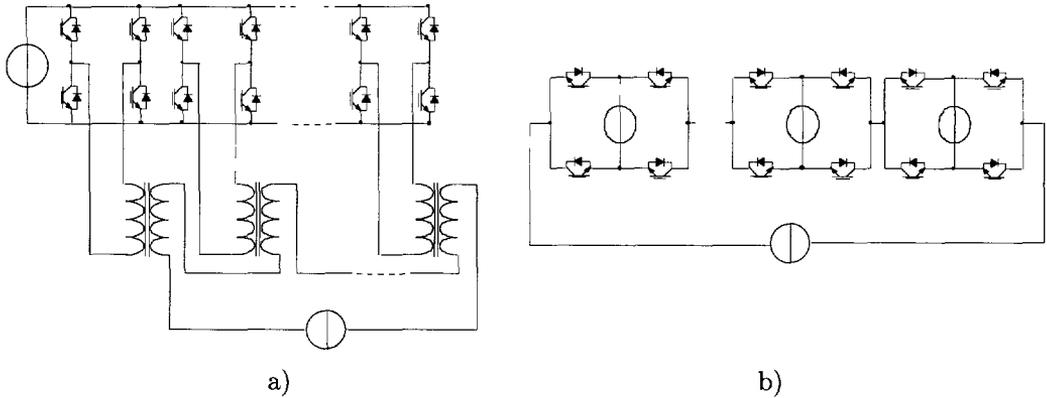


Fig. 2. — Structures multi-niveaux basées sur la mise en série de convertisseurs conventionnels.
 [Multilevel structures based on a series-association of conventional converters.]

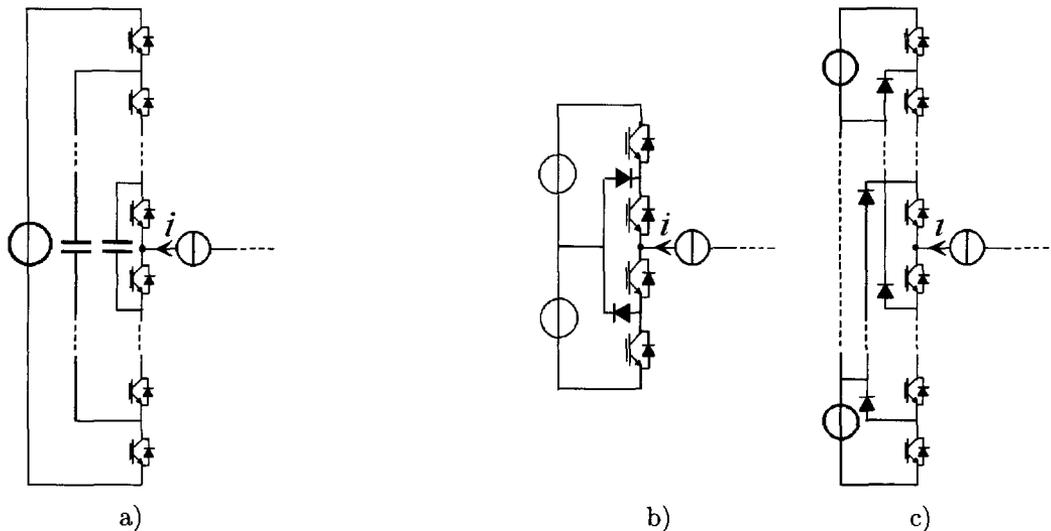


Fig. 3. — Cellules multi-niveaux, a) cellule imbriquée, b) cellule à sources de tension en série (NPC), c) NPC généralisé.

[Multilevel cells, a) imbricated cell, b) cell with a series-association of voltage sources (NPC), c) generalised NPC]

est fermé et $f_{c_j} = 0$ lorsqu'il est ouvert, la relation suivante doit être vérifiée en permanence :

$$\sum_{j=1}^{N_c} f_{c_j} = 1. \quad (1)$$

2.3. DÉTERMINATION DE LA CARACTÉRISTIQUE STATIQUE DES INTERRUPTEURS. — Afin de déterminer la caractéristique statique des interrupteurs, il est nécessaire de définir le signe du courant qui les traverse lorsqu'ils sont fermés ainsi que la tension à leurs bornes lorsqu'ils sont ouverts.

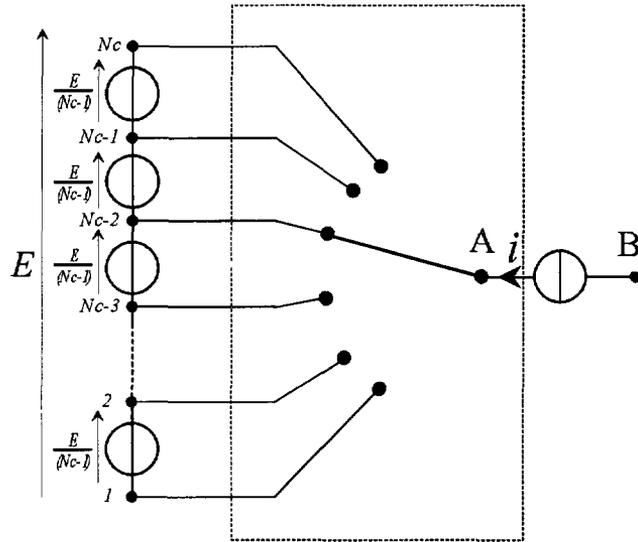


Fig. 4. — La cellule multi-niveaux à sources de tension en série.
 [The multilevel cell with a series association of voltage sources.]

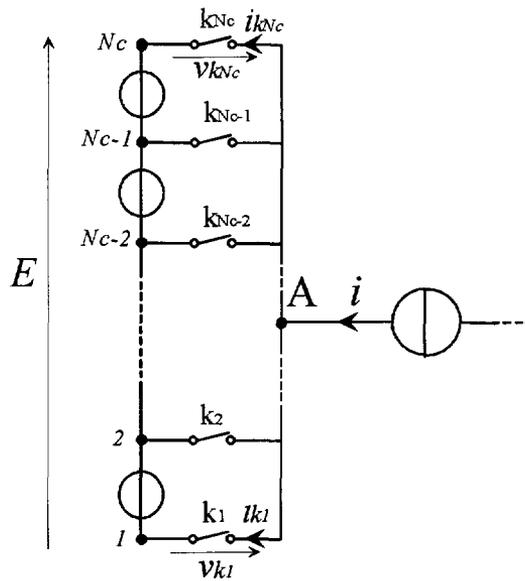


Fig 5 — La “cellule à N_c interrupteurs”
 [The “ N_c -switch cell”.]

Le courant i_{k_j} traversant l'interrupteur k_j est donné par :

$$i_{k_j} = f_{c_j} i. \tag{2}$$

Le sens du courant dans l'interrupteur est celui de i .

La tension v_k , à ses bornes s'exprime de la manière suivante :

$$v_{k_j} = \sum_{m=1}^{N_c} f_{cm} v_{1m} - v_{1j} \quad (3)$$

v_{1m} représente la différence de potentiel entre les bornes 1 et m de la source de tension.

Le signe de la tension v_{k_j} dépend de la position qu'occupe l'interrupteur k_j par rapport à l'interrupteur fermé :

- v_{k_j} est positif si l'interrupteur fermé est au-dessus de lui, c'est-à-dire si l'un des interrupteurs $k_{j+1}, k_{j+2} \dots k_{N_c}$ est fermé,
- v_{k_j} est négatif dans le cas contraire, c'est-à-dire si l'un des interrupteurs $k_{j-1}, k_{j-2} \dots k_1$ situé au-dessous de lui est fermé.

Il est clair que seuls les interrupteurs extrêmes k_1 et k_{N_c} sont unidirectionnels en tension (v_{k_1} est positif ou nul et $v_{k_{N_c}}$ est négatif ou nul) ; les autres interrupteurs doivent être bidirectionnels en tension, la tension à leurs bornes étant multiple de $E/(N_c - 1)$, comprise entre $\frac{1-j}{N_c-1}E$ et $\frac{N_c-j}{N_c-1}E$.

Dans ces conditions, si aucune contrainte liée au sens de circulation du courant dans les interrupteurs n'est imposée, tous ces interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant et, à l'exception de k_1 et k_{N_c} , être bidirectionnels en tension. Ainsi, les interrupteurs k_1 et k_{N_c} ont des caractéristiques 3 segments et les interrupteurs k_j ($1 < j < N_c$) ont nécessairement des caractéristiques 4 segments. La cellule peut alors être définie. Elle est représentée figure 6, il s'agit de la cellule multi-niveaux généralisée définie par Bhagwat *et al.* [9].

3. Cellules multi-niveaux des redresseurs monophasés non réversibles

En règle générale les caractéristiques statiques des semi-conducteurs d'une structure sont imposées par sa topologie et par sa fonctionnalité. Pour la cellule étudiée, le signe de la tension aux bornes de chaque interrupteur est imposé par le signe de la tension continue E d'une part, et par sa position dans la structure relativement à celle de l'interrupteur fermé d'autre part. Le sens du courant circulant dans l'interrupteur est, lui, imposé par la source de courant. Si celle-ci est alternative les interrupteurs sont *a priori* bidirectionnels en courant. Cependant, pour certaines fonctionnalités, il est possible de simplifier la structure en rendant certains interrupteurs unidirectionnels en courant. C'est le cas, en particulier, des redresseurs à source de tension continue lorsque la propriété de réversibilité en puissance n'est pas nécessaire.

Nous nous proposons de définir la caractéristique statique des interrupteurs de la cellule pour un redresseur monophasé non réversible. Nous ne traitons ici que le cas où le nombre de niveaux pouvant être généré par la cellule est impair car les cellules à nombre pair de niveaux ne présentent pas de réel intérêt [20]. Pour simplifier l'écriture des relations, il est intéressant de définir un point de référence des tensions. On choisit le point M, milieu de la source de tension (Fig. 7). Dans ces conditions la borne N_c est au potentiel $E/2$, la borne 1 au potentiel $-E/2$ et la borne j au potentiel v_j

$$v_j = \frac{E}{2(N_c - 1)}(2j - N_c - 1). \quad (4)$$

La borne B de la source de courant est connectée au point M. Cette configuration n'enlève rien à la généralité du raisonnement car, que la source de courant soit monophasée ou triphasée, il est toujours possible de segmenter et disposer la ou les source(s) de courant de sorte qu'il apparaisse un nœud à potentiel flottant pouvant être connecté au point M.

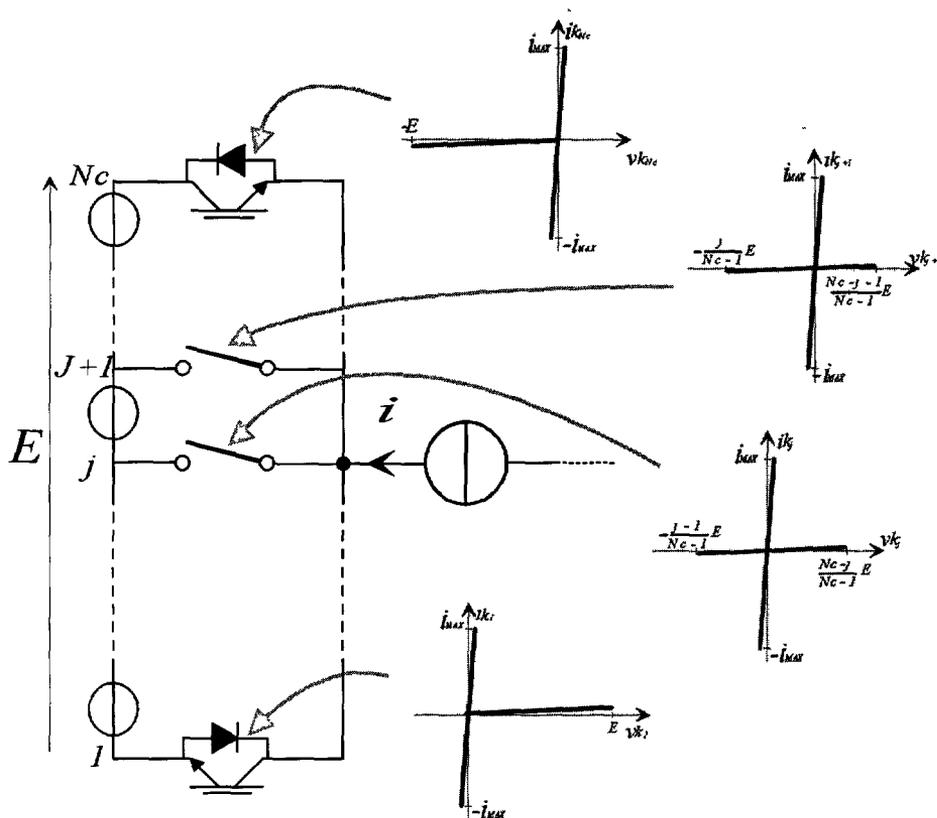


Fig. 6. — Caractéristiques statiques des interrupteurs de la cellule à N_c interrupteurs (cas d'une structure réversible).

[Static characteristics of the switches of the “ N_c -switch cell” (reversible structure case).]

3 1. CARACTÉRISTIQUES STATIQUES. — Si le transit d'énergie est unidirectionnel, de la source de courant vers la source de tension, il faut que, lorsque le courant i est positif, c'est-à-dire entrant dans la cellule de commutation, la tension aux bornes de la source de courant soit, elle aussi, positive. Il faut donc que le point A soit connecté à une borne dont le potentiel est positif. Inversement, quand le courant i est négatif, il faut qu'il provienne d'un point dont le potentiel est négatif.

Puisqu'il y a $N_c - 1$ sources de tension, le point M se situe à la connexion de deux sources (Fig. 7), les points de connexion situés au-dessus de M ont des potentiels positifs et les interrupteurs qui les relient au point A doivent être traversés par des courants positifs. En revanche, les interrupteurs connectés aux points situés sous le point M, donc à potentiel négatifs, doivent être traversés par des courants négatifs. La connexion de la source de courant au point M de potentiel 0 doit être possible quel que soit le signe du courant.

On en déduit les caractéristiques statiques des interrupteurs de la cellule non réversible et la nature des interrupteurs (Fig. 8).

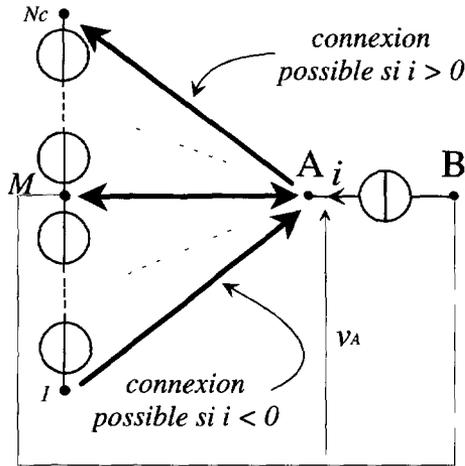
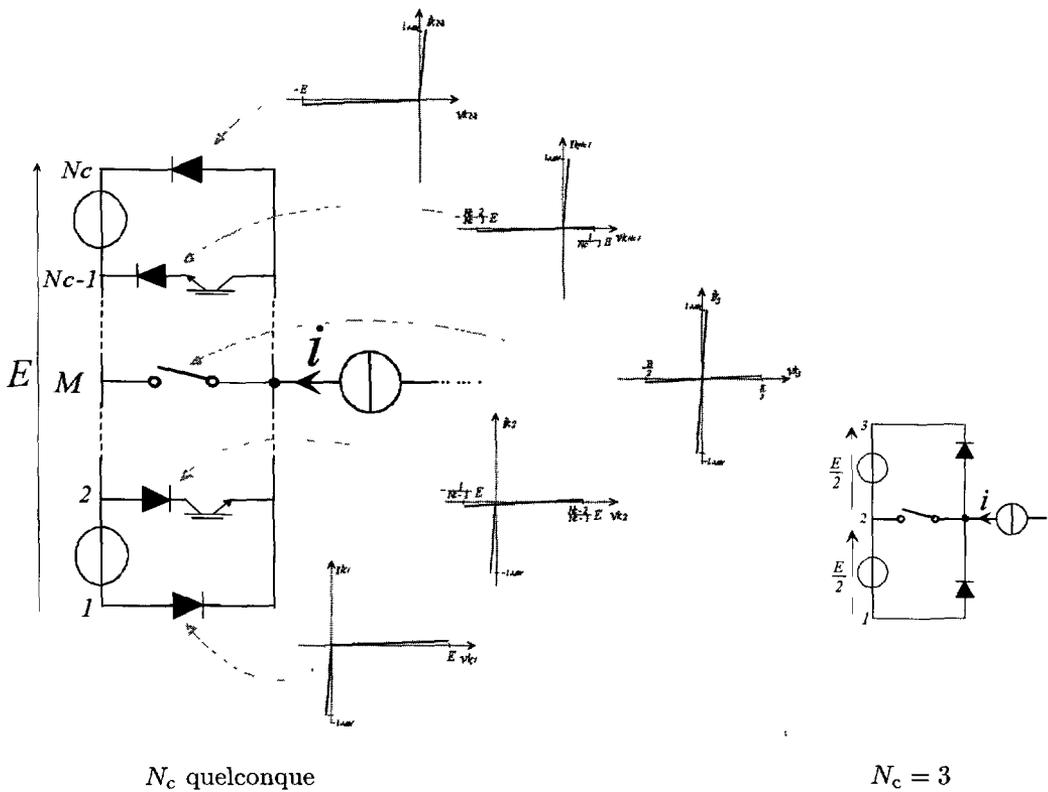


Fig. 7. — Représentation des sens de circulation des courants pour le cas de la cellule non réversible.
 [Representation of the directions of currents (non-reversible cell case)]



N_c quelconque

$N_c = 3$

Fig. 8. — Caractéristiques statiques des interrupteurs de la cellule à N_c interrupteurs (cas d'une structure non réversible)

[Static characteristics of the switches of the “ N_c -switch cell” (non-reversible structure case).]

3.2. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES CELLULES MULTI-NIVEAUX À N_c INTERRUPTEURS. L'avantage de cette cellule est sa simplicité : la connexion d'un point de la source de courant à un point de la source de tension est simplement réalisée par la fermeture d'un interrupteur. L'inconvénient réside dans la valeur de la tension imposée aux bornes des composants. Elle est d'autant plus élevée que l'interrupteur est éloigné du point milieu. La tension maximale (en valeur absolue) devant être supportée par les interrupteurs situés aux extrémités de la cellule est égale à E . Les tensions maximales aux bornes des interrupteurs situés au-dessus du point milieu ont pour expression :

$$|v_{k_j}|_{\max} = \frac{j-1}{N_c-1} E \geq \frac{E}{2}. \quad (5)$$

Celles des interrupteurs situés au-dessous du point milieu :

$$|v_{k_j}|_{\max} = \frac{N_c-j}{N_c-1} E \geq \frac{E}{2}. \quad (6)$$

Dans tous les cas,

$$v_{k_j \max} - v_{k_j \min} = E. \quad (7)$$

La cellule à N_c interrupteurs n'est donc pas adaptée aux applications haute tension. Le seul cas où cet inconvénient n'apparaît pas est celui de la cellule non réversible 3 niveaux qui ne comprend qu'un seul interrupteur à commutation commandée 4 segments devant supporter une tension maximale de $E/2$ et deux diodes supportant la totalité de la tension E .

4. Cellules à association de cellules élémentaires de commutation

Afin d'éviter le principal défaut de la cellule multi-niveaux précédente, un second type peut être envisagé. Cette cellule, représentée figure 9, permet la limitation des contraintes en tension subies par les interrupteurs grâce à un assemblage de cellules élémentaires de commutation. Elle est nommée cellule à association de cellules élémentaires.

Cette cellule à N_c potentiels est divisée en $(N_c - 1)$ couches numérotées comme le montre la figure 9. Les interrupteurs de la cellule sont indicés de la manière suivante :

Le premier indice attribué aux interrupteurs est le numéro de la couche à laquelle ils appartiennent. Le second indique leur position dans cette couche.

La connexion de la source de courant à l'une des N_c bornes de la source de tension s'effectue grâce à une mise en série d'interrupteurs. La cellule ainsi constituée nécessite un nombre important de semi-conducteurs, ce qui peut compliquer sa commande et engendrer d'importantes pertes en conduction. En revanche, elle semble mieux adaptée aux applications haute tension. En effet, la différence de potentiel appliquée en entrée de chacune des cellules élémentaires peut être limitée par les cellules des couches d'indices supérieurs. On peut donc, comme le montre la figure 10, faire en sorte que cette différence de potentiel soit toujours limitée à $E/(N_c - 1)$ et ainsi répartir la tension aux bornes des interrupteurs. Cette possibilité n'est *a priori* envisageable que si tous les interrupteurs sont commandables ; cette solution n'est bien sûr pas concevable car trop lourde en éléments semi-conducteurs, et de commande trop complexe. Pour cette étude, nous choisissons comme critère principal d'optimisation la minimisation du nombre de composants commandables.

Nous nous proposons de déterminer la caractéristique statique de chacun des composants de la cellule à association de cellules élémentaires sachant que le fonctionnement de celle-ci doit être identique à celui de la cellule à N_c interrupteurs. Il s'agit donc d'identifier pour les

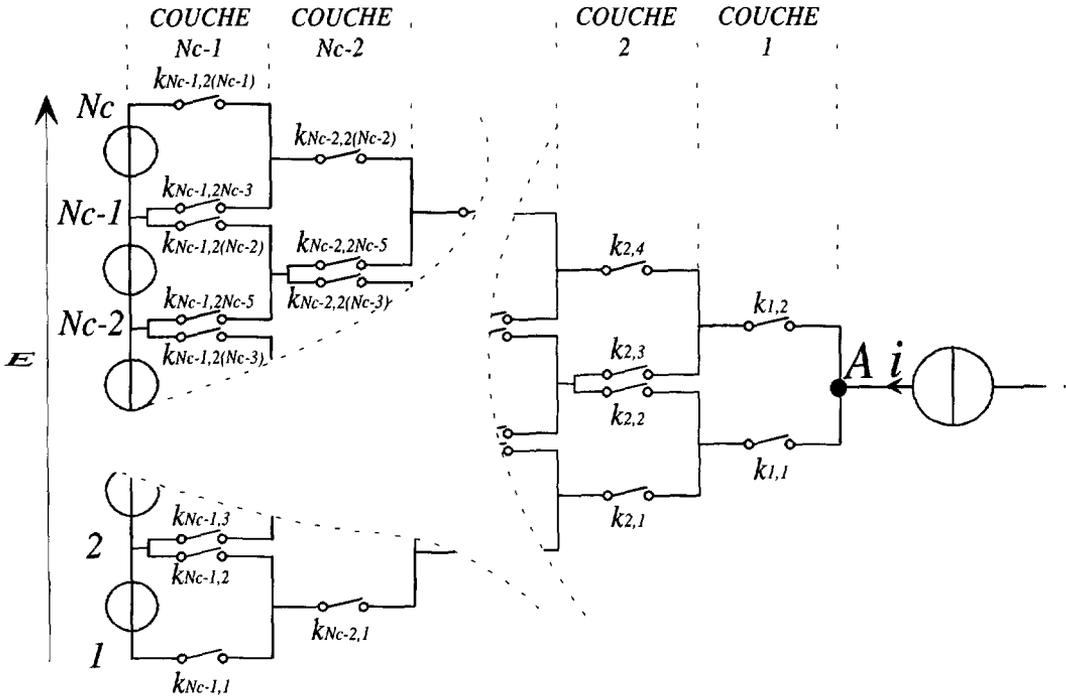


Fig. 9. — La cellule à association de cellules élémentaires.
 [The cell with “elementary-cell-association”.]

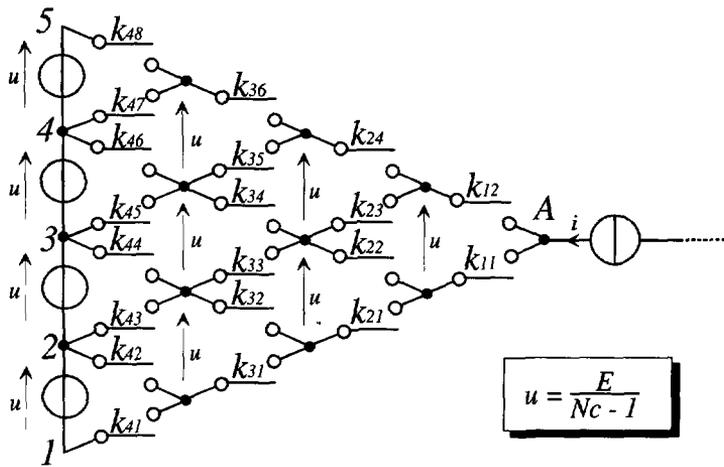


Fig. 10. — Exemple de la cellule 5-niveaux.
 [The 5-level example.]

deux types de cellules les caractéristiques statiques des interrupteurs réalisant les connexions de chaque point j de la source de tension au point A de la source de courant.

Nous considérons la structure réversible, puis non réversible. La figure 10 montre que la

connexion d'une borne de la source de tension à la source de courant peut être réalisée de diverses manières. La simplification de la cellule passe donc par le choix judicieux des chemins.

Par la suite, nous prendrons souvent comme exemple la cellule à 5 niveaux, car son étude est relativement simple, mais elle permet toutefois une généralisation aux cellules à nombre de niveaux supérieur.

4.1. CAS DE LA CELLULE RÉVERSIBLE. — Pour déterminer la caractéristique statique des interrupteurs de cette cellule, il est nécessaire de définir les configurations d'interrupteurs qui permettent de relier les différentes bornes de la source de tension à la source de courant. Nous ne considérons, bien sûr, que ceux qui ne mettent pas en jeu plus d'interrupteurs qu'il n'y a de couches.

Ainsi, les bornes situées aux extrémités de la cellule ($j = 1$ et $j = N_c$) ne peuvent être reliées à la source de courant que d'une seule manière, en fermant les interrupteurs extrêmes. Pour une cellule 5 niveaux par exemple, le point 5 sera relié à A si les interrupteurs k_{12} , k_{24} , k_{36} et k_{48} sont fermés (Fig. 10). Ces interrupteurs sont donc nécessairement bidirectionnels en courant.

Par contre, il existe plusieurs chemins pour atteindre les autres bornes. Compte tenu des degrés de liberté existants, il est possible de différencier totalement, pour la connexion de j à A, les interrupteurs impliqués dans la connexion lorsque le courant est positif de ceux impliqués lorsque le courant est négatif. Cette façon de procéder permet de limiter le nombre d'interrupteurs bidirectionnels en courant.

Considérons par exemple la cellule 5 niveaux (Fig. 10). Pour relier la source de courant au point d'indice 4, différentes configurations existent :

- 1) k_{12} k_{24} k_{36} k_{47}
- 2) k_{11} k_{22} k_{34} k_{46}
- 3) k_{12} k_{23} k_{34} k_{46}
- 4) k_{12} k_{24} k_{35} k_{46} .

Si l'une des deux dernières configurations est envisagée pour un des chemins (pour un sens du courant), l'autre chemin choisi a nécessairement un interrupteur en commun avec le premier. C'est pourquoi une optimisation de la configuration impose d'utiliser les deux premiers chemins proposés.

De manière générale, pour un nombre quelconque de niveaux, les deux chemins choisis pour connecter le point j au point A sont représentés en figure 11. Ce choix permet bien d'obtenir pour les interrupteurs situés à l'intérieur de la cellule, des caractéristiques statiques unidirectionnelles en courant. De plus, on peut remarquer que la différence de potentiel entre un point de la source de tension et le point A est toujours égale à la tension élémentaire $E/(N_c - 1)$ multipliée par le nombre de composants bloqués disposés en série entre ces deux points. Ainsi, d'après la figure 11, la tension aux bornes des $(j - n)$ interrupteurs en série reliant le point n aux interrupteurs impliqués dans la connexion de j à A est égale à $(j - n) \frac{E}{(N_c - 1)}$ (pour $n < j$).

Il est maintenant possible de déterminer la caractéristique statique de chacun des interrupteurs de la cellule étudiée. Pour ce faire, il suffit d'identifier la caractéristique statique des interrupteurs intervenant dans la connexion du point j au point A à celle de l'interrupteur k_j de la structure précédente (cellule à N_c interrupteurs) puisqu'elles réalisent la même connexion.

4.1.1. Détermination des caractéristiques statiques des interrupteurs de la cellule. — L'association d'interrupteurs permettant la connexion du point 1 au point A doit avoir la même caractéristique statique que l'interrupteur k_1 de la cellule à N_c interrupteurs (cf. Fig. 6). Ces interrupteurs étant en série, chacun d'eux doit avoir cette caractéristique statique.

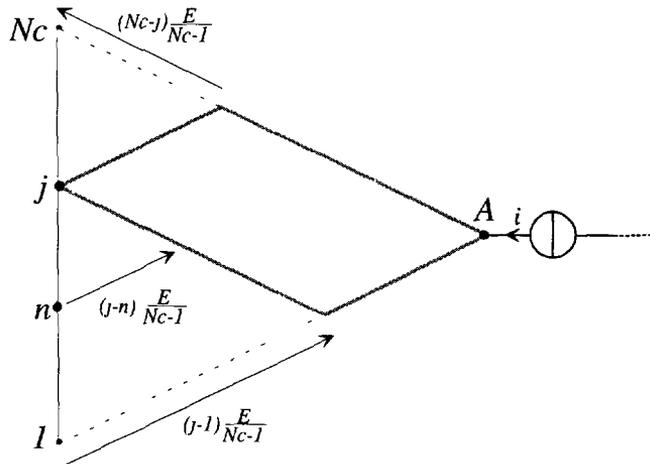


Fig. 11. — Représentation des chemins choisis pour connecter le point j au point A.
 [Representation of the ways chosen for the connection of the point j to A.]

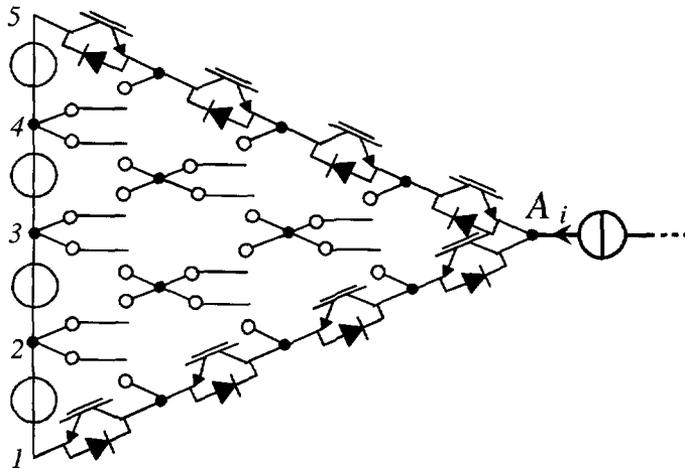


Fig. 12. — La cellule 5-niveaux avec ses interrupteurs périphériques définis
 [The 5-level cell with its peripheral switches.]

Le même raisonnement peut être effectué pour les interrupteurs reliant le point N_c au point A. La figure 12 donne la nature des interrupteurs périphériques

La caractéristique statique des interrupteurs k_j de la cellule réversible à N_c interrupteurs est de type 4 segments, il faut donc que la caractéristique statique de l'association d'interrupteurs réalisant la même connexion le soit aussi.

Dans l'exemple d'une cellule 5 niveaux (Fig. 13) les interrupteurs permettant la connexion des points A et 4 sont représentés en "gras". Cette connexion est réalisée à l'aide d'une mise en parallèle de deux associations d'interrupteurs connectés en série ($k_{12}, k_{24}, k_{36}, k_{47}$) et ($k_{11}, k_{22}, k_{34}, k_{46}$).

Or, dans une association d'interrupteurs en série, pour qu'un segment de courant soit obtenu,

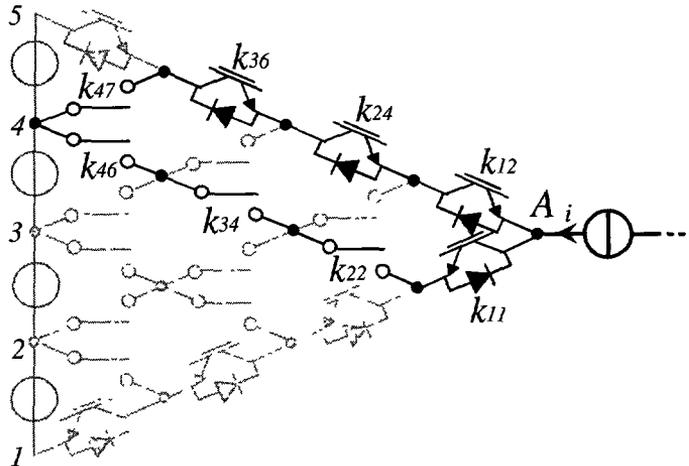


Fig. 13. — Les interrupteurs impliqués dans la connexion des points 4 et A.

[The switches implicated in the connection of the points 4 and A.]

il est nécessaire que ce segment apparaisse dans la caractéristique statique de chacun des interrupteurs. Pour qu'un segment de tension soit obtenu, il suffit qu'il apparaisse dans l'une des caractéristiques. La règle duale est obtenue dans le cas d'une association d'interrupteurs en parallèle.

La caractéristique statique de l'association d'interrupteurs permettant la connexion du point 4 au point A est représentée figure 14. Elle est obtenue par une mise en parallèle de 2 associations de type 3 segments, unidirectionnelles en courant.

Puisque les interrupteurs déjà définis sont commandables, il est possible de ne pas introduire d'interrupteurs commandables supplémentaires. Pour cela il suffit de choisir pour l'association d'interrupteurs k_{12} , k_{24} , k_{36} , k_{47} la caractéristique 3 segments laissant passer les courants négatifs, et pour l'association k_{11} , k_{22} , k_{34} , k_{46} la caractéristique 3 segments laissant passer les courants positifs.

Les caractéristiques statiques de chacun des interrupteurs commandés (k_{12} , k_{24} , k_{36} pour une voie et k_{11} pour l'autre voie) étant déjà définies, les autres interrupteurs peuvent être de simples diodes connectées dans un sens pour une voie, en sens inverse pour l'autre (Fig. 14).

On procède de la même manière pour tous les interrupteurs situés à l'intérieur de la cellule. On obtient la cellule donnée figure 15a dans laquelle tous les interrupteurs commandés se situent à la périphérie de la structure.

En limitant à 3 le nombre de niveaux, on retrouve la structure NPC 3 niveaux [10, 11] (Fig. 15b). Pour $N_c > 3$, le remplacement des diodes en série par une seule diode (devant supporter des tensions plus élevées) donne la cellule NPC généralisée [10, 16] représentée figure 15c.

4.2. CAS DE LA CELLULE NON RÉVERSIBLE. — Comme au paragraphe précédent, il s'agit, à partir de la trame de la cellule représentée figure 9, de redéfinir les caractéristiques statiques des interrupteurs en tenant compte des contraintes liées au sens de circulation du courant du fait de la non réversibilité de la structure.

Dans le cas général, les caractéristiques statiques des interrupteurs réalisant les connexions entre les extrémités de la source de tension (1 et N_c) à la source de courant nous ont conduit

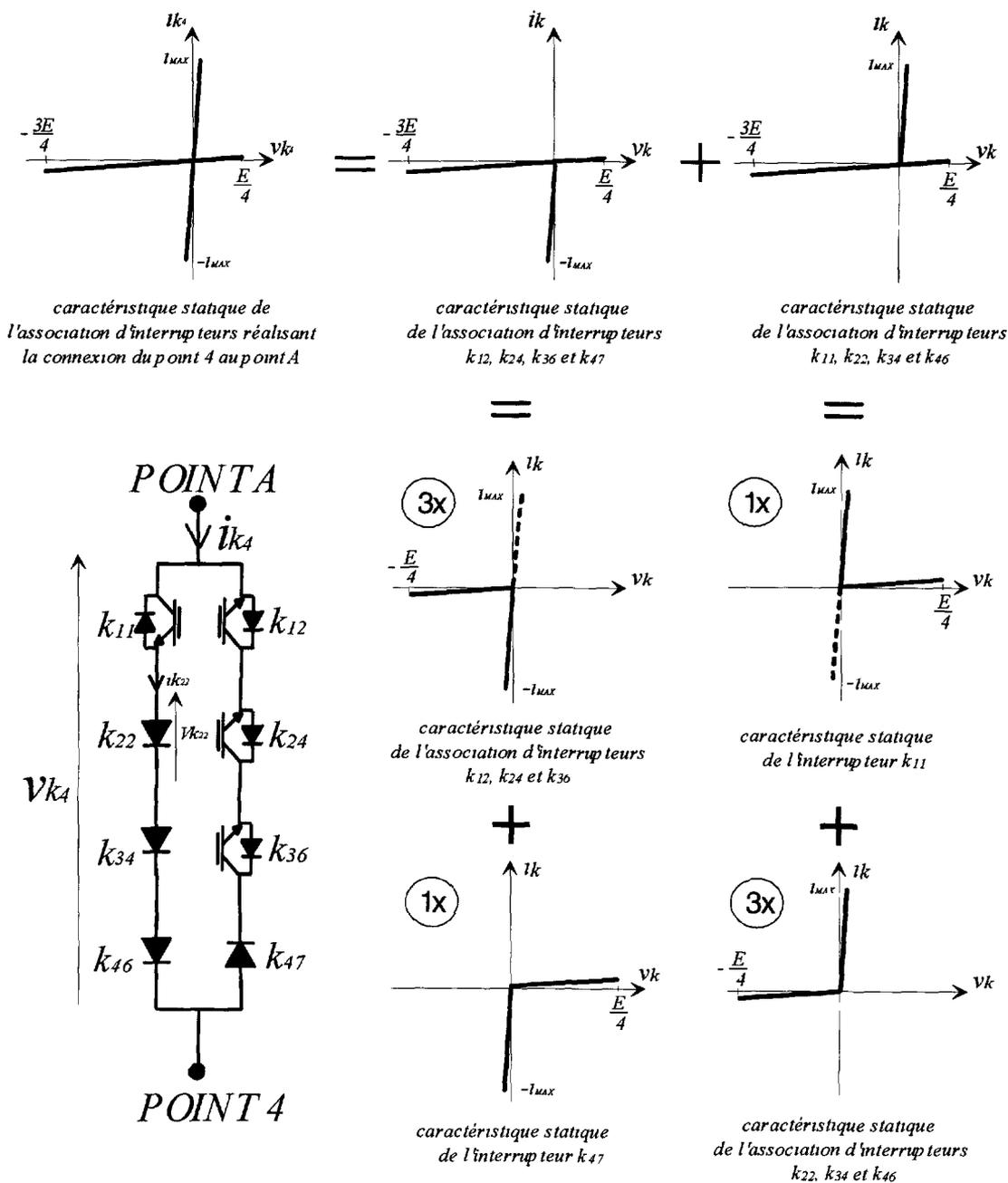


Fig. 14. — Illustration de la méthode de choix des caractéristiques statiques des interrupteurs situés à l'intérieur de la cellule

[Illustration of the way to define the static characteristics of the switches located inside the cell.]

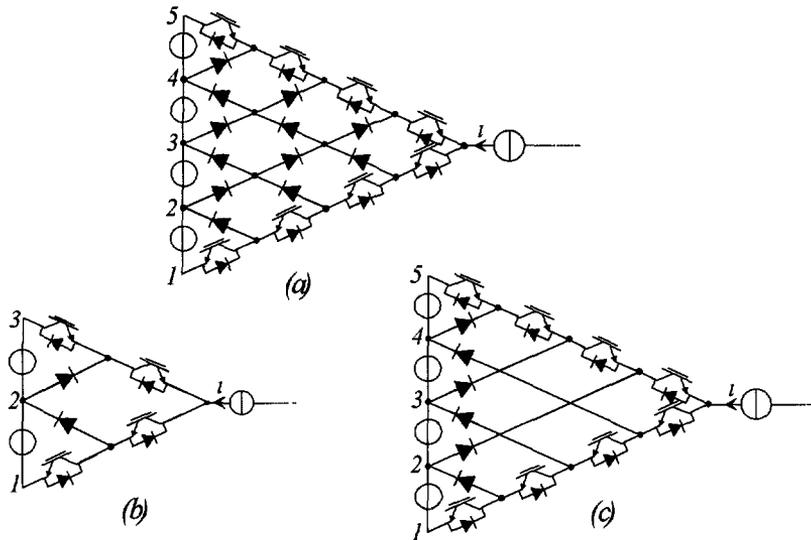


Fig. 15 — Les cellules NPC et NPC généralisées

[The NPC and generalised NPC cells]

à placer les interrupteurs commandables à la périphérie de la cellule.

Si la structure est non réversible, les points 1 et N_c ne sont connectés que pour 1 seul sens de circulation du courant. Ainsi, les interrupteurs commandables peuvent être placés soit à la périphérie, soit à l'intérieur de la cellule, ce qui conduit à deux types de structures :

Pour la première, la détermination de la nature des interrupteurs peut être obtenue par simplification de la structure réversible tenant compte des sens de circulation de courant autorisés pour les cellules non réversibles.

Pour la seconde, la détermination nécessite une redéfinition des caractéristiques statiques des interrupteurs en prenant en compte la non réversibilité.

4.2.1. Première structure : les interrupteurs commandables sont placés en périphérie de la cellule. — Avec les mêmes hypothèses que celles retenues pour les cellules à N_c interrupteurs, toutes les liaisons entre A et les bornes de la source de tension sont unidirectionnelles en courant à l'exception de celle avec le point milieu (cf. Paragr. 3). Cette remarque permet la suppression des interrupteurs devenus inutiles ce qui conduit aux structures données figure 16 pour les cas $N_c = 5$ et 3. Il est évidemment possible de remplacer les diodes en série par une seule diode (Fig. 16c), devant supporter des tensions plus importantes.

4.2.2. Seconde structure : les interrupteurs commandables sont placés à l'intérieur de la cellule. Pour les connexions entre la source de courant et les extrémités de la source de tension, les associations d'interrupteurs doivent avoir la même caractéristique statique que les interrupteurs k_1 et k_{N_c} de la cellule à N_c interrupteurs non réversible représentée figure 8. Chacun des interrupteurs doit posséder cette caractéristique ; ce sont donc des diodes. La cellule ainsi obtenue est représentée figure 17a.

On observe que lorsque N_c est supérieur ou égal à 5, certaines connexions peuvent être supprimées (Fig. 17b). Ces simplifications sont dues au fait que les diodes situées aux extrémités des premières couches de la cellule aiguillent les courants vers les points dont les potentiels sont les seuls autorisés. Ce principe d'aiguillage des courants permet une prédisposition des

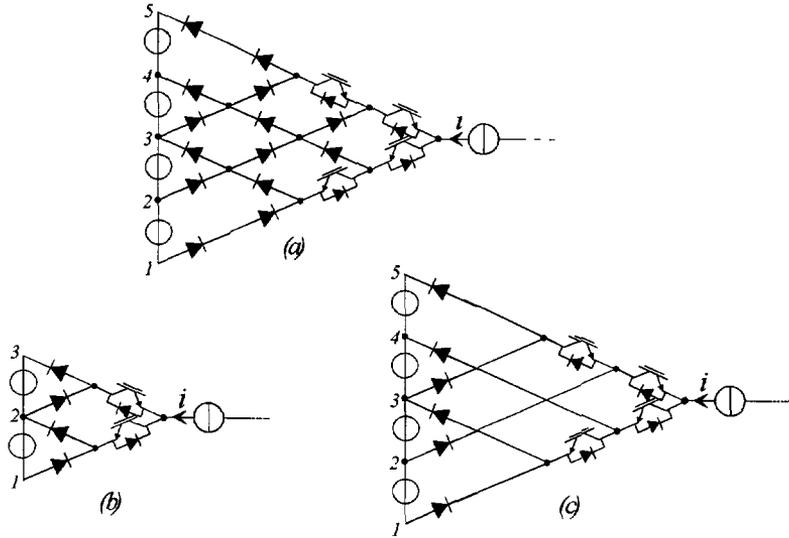


Fig. 16. — Les cellules NPC non réversibles.
 [The NPC non-reversible cells.]

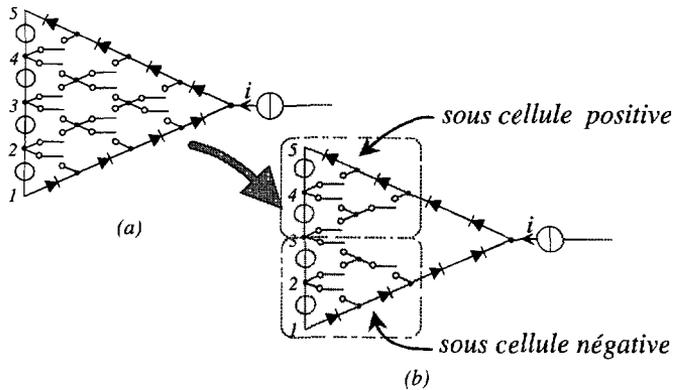


Fig 17. — Décomposition de la cellule en deux “sous-cellules”.
 [Decomposition of the cell in two “subcells”]

connexions. Celle-ci présente deux avantages. Les diodes qui réalisent cet aiguillage commutent à la fréquence de la source de courant et n'ont donc pas besoin d'être rapides. De plus l'unidirectionnalité en courant permet d'éviter l'utilisation d'interrupteurs 3 segments.

La cellule peut alors être définie comme une association de deux “sous-cellules” unidirectionnelles en courant : la première est formée de l'ensemble des interrupteurs connectés aux bornes à potentiel positif ou nul (3, 4, 5). Son alimentation à travers des diodes permet de la supposer connectée à une source de courant positif ou nul (Fig. 18). La seconde formée des interrupteurs connectés aux bornes 1, 2, 3. Elle peut être considérée comme alimentée par une source de courant négatif ou nul.

Pour chacune des sous-cellules, on définit les caractéristiques statiques des interrupteurs

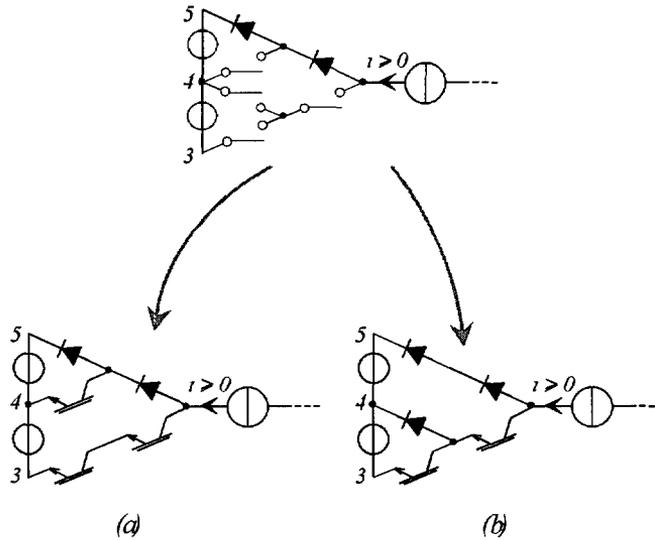


Fig. 18. — Structure de la “sous-cellule” positive.

[Structure of the positive “subcell”.]

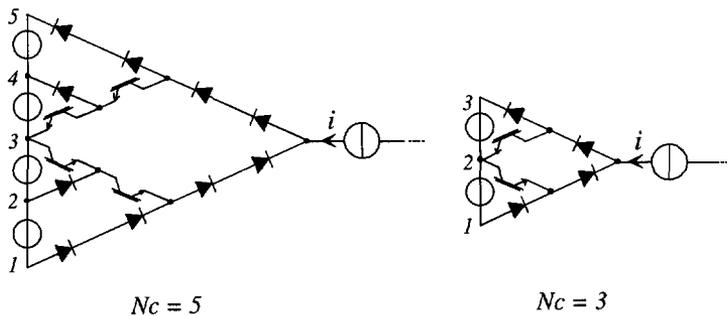


Fig 19. — Cellules non réversibles 3 et 5-niveaux.

[Non-reversible 3 and 5-level cells.]

impliqués dans la connexion de la source de courant à une borne de la source de tension. Pour la sous-cellule alimentée par des courants positifs par exemple, la connexion de la source de courant à la borne 5 est réalisée par deux diodes. La connexion de la source de courant à la borne 3 doit être unidirectionnelle en tension et en courant et doit être commandée, les deux interrupteurs sont donc des transistors. La connexion de la source de courant à la borne 4 doit être bidirectionnelle en tension et unidirectionnelle en courant. Elle peut être réalisée de deux manières comme le montre la figure 18. Notons que la configuration de la figure 18b est plus intéressante car elle ne met en jeu que deux transistors.

Les cellules 5 et 3 niveaux sont représentées figure 19.

4.3. CONCLUSION. — Nous avons, aux paragraphes 3 et 4, montré que la non réversibilité des structures de conversion apporte une simplification des cellules de commutation multi-niveaux. Trois types de cellules non réversibles ont été définies. La cellule à N_c interrupteurs impose

de fortes contraintes en tension aux composants commandables ; cet inconvénient n'apparaît cependant pas dans le cas où $N_c = 3$. Quant aux deux cellules définies au paragraphe 4, elles présentent le même nombre d'interrupteurs commandables, mais le nombre de diodes de la dernière structure (Fig. 19) est moindre.

5. Application aux redresseurs multi-niveaux

Les différentes cellules non réversibles présentées peuvent être utilisées pour des applications de type redresseur non réversible en monophasé et en triphasé. La ou les sources de courant peuvent être réalisée(s) par la mise en série d'inductance(s) avec le réseau d'alimentation. La source de tension continue est obtenue par un assemblage de condensateurs de même capacité connectés en série.

5.1. CAS DES REDRESSEURS MONOPHASÉS. — Le redresseur monophasé peut être obtenu soit en utilisant une seule cellule, soit en en associant deux. L'utilisation d'une seule cellule présente plusieurs inconvénients liés à la mauvaise répartition des énergies injectées aux condensateurs au cours d'une période de la source alternative mais également aux tensions importantes appliquées aux interrupteurs. Nous ne présentons donc que les solutions faisant appel à deux cellules.

La tension générée par ce convertisseur composé de deux cellules peut atteindre $2N_c - 1$ niveaux. Cette solution ne semble malheureusement pas envisageable pour une application de type non réversible dans le cas où N_c est supérieur ou égal à 5. En effet, des études ont montré que les cellules avec mise en série de sources de tension posaient des problèmes d'équilibrage de tension continues [17–19], à l'exception des cas suivants :

- fonctionnement en compensateur d'énergie réactive [19] ;
- association d'un redresseur et d'un onduleur constitués de cellules 5-niveaux. L'équilibrage des tensions est dans ce cas obtenu par le déphasage du courant secteur [18].

Cette solution ne peut donc être envisagée pour des applications de type redresseur non-réversible. *Seule l'association de cellules 3 niveaux a donc été retenue.* Une association de 2 de ces cellules permet toutefois de générer 5 niveaux de tension (E , $+\frac{E}{2}$, 0 , $-\frac{E}{2}$ et $-E$).

5.1.1. *Présentation des différents types de redresseurs 5 niveaux.* — Trois types de redresseurs sont considérés. Ils correspondent aux trois types de cellules 3 niveaux non réversibles qui ont été définis.

Redresseur à association de cellules à N_c interrupteurs. — Ce redresseur, représenté figure 20, est constitué de 4 diodes et de 2 interrupteurs 4 segments, qui peuvent être synthétisés de différentes manières. Cette structure a fait l'objet d'un dépôt de brevet [21] et d'études approfondies [20, 22, 23].

Redresseur à association de cellules de type NPC non réversibles. — Ce redresseur, représenté figure 21, est constitué de 8 diodes et de 4 transistors associés à des diodes placées en anti-parallèle.

Redresseur à association de cellules à aiguillage de courant. — Il est représenté figure 22. Pour cette configuration, des simplifications peuvent être effectuées. Lorsque le courant est positif, les "sous-cellules" C_{11} et C_{22} sont sollicitées ; lorsque le courant est négatif, ce sont les "sous-cellules" C_{12} et C_{21} qui le sont. Les points a et a' d'une part, b et b' d'autre part, peuvent être connectés sans provoquer de dysfonctionnement de la structure, puisque, selon le signe du courant, l'un des 2 potentiels est flottant. Cette simplification permet de diviser par 2 le nombre de composants commandables. La structure devient donc l'association d'un redresseur à diodes et d'un hacheur 3 niveaux permettant le contrôle du transfert de puissance.

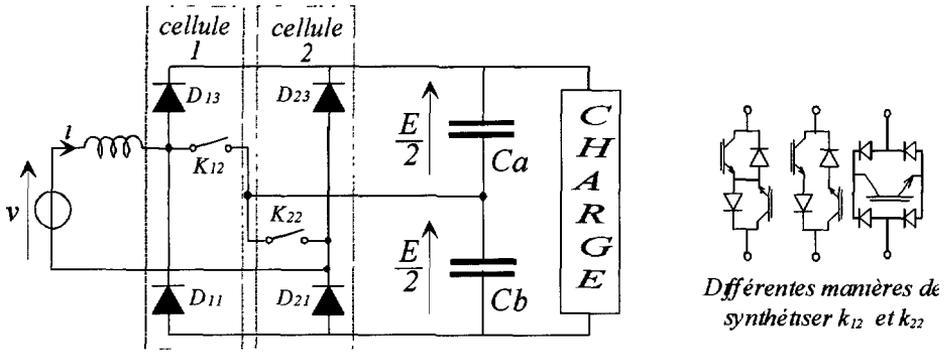


Fig. 20. — Redresseur 5-niveaux à cellules à N_c interrupteurs.
 [5-level rectifier with “ N_c -switch” cells.]

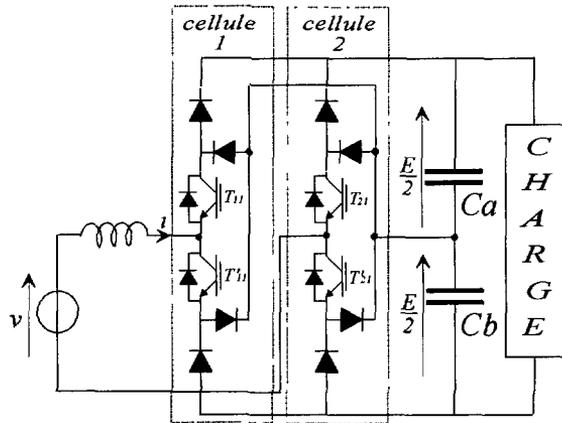


Fig. 21. — Redresseur 5-niveaux à cellules NPC non réversibles.
 [5-level rectifier with non-reversible NPC cells.]

La source de courant étant réalisée par la mise en série de la tension d'alimentation et de l'inductance L , il est possible de modifier la position de cette dernière. En la plaçant entre les deux convertisseurs (Fig. 23), les fonctionnements du redresseur et du hacheur sont ainsi découplés ; le redresseur devient redresseur de tension, ce qui limite les tensions aux bornes des diodes puisque celles-ci sont imposées par la tension de la source alternative, toujours inférieure à la tension continue. La place de l'inductance a également une influence sur la forme d'onde du courant alternatif, perceptible uniquement lorsque sa valeur est importante (lorsque la fréquence de commutation des semi-conducteurs est fortement réduite) [24].

Cette structure a fait très récemment l'objet de quelques travaux en fonctionnement multi-niveaux [25-27].

5.2. CAS DES REDRESSEURS TRIPHASÉS. — En associant 3 cellules non réversibles 3 niveaux, il est possible de réaliser des redresseurs triphasés non réversibles à 5 niveaux de tension entre phases. Ces redresseurs sont représentés figure 24.

- La première structure (Fig. 24a) a fait l'objet d'une étude dans notre laboratoire [28]. Elle

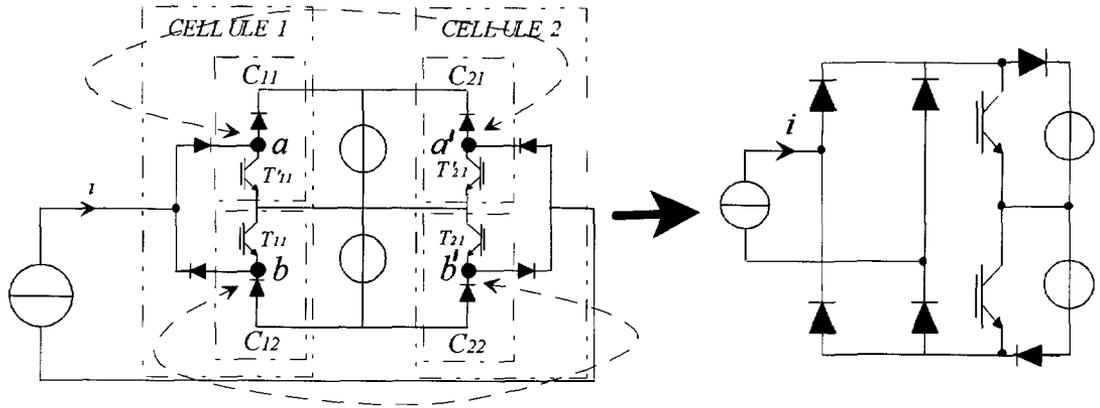


Fig. 22. — Simplifications obtenues pour le redresseur 5 niveaux à cellules à “aguillage de courant”.
 [Simplifications obtained for the 5-level rectifier composed of the “current shunting” cells.]

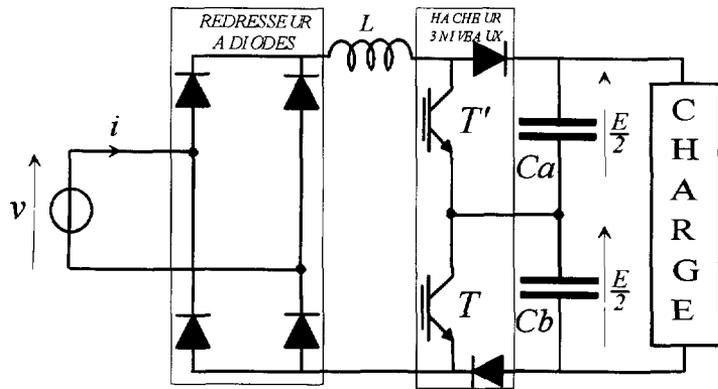


Fig. 23. — Redresseur composé d'un redresseur à diodes et d'un hacheur 3-niveaux
 [Rectifier composed of a diode rectifier and a 3-level chopper.]

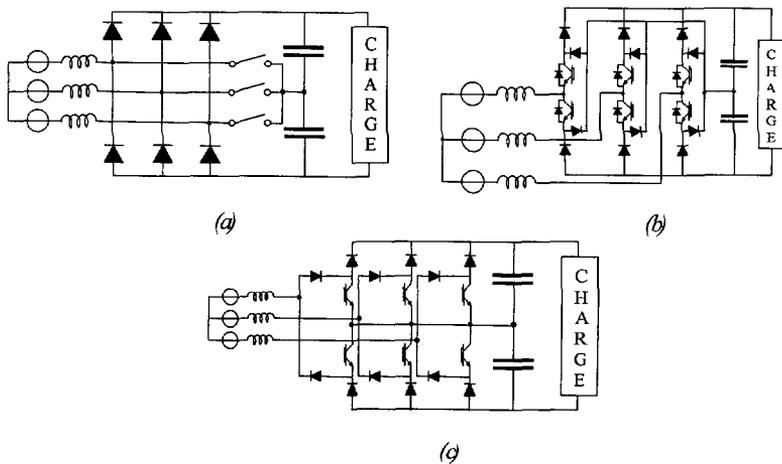


Fig. 24. — Les différents redresseurs triphasés à cellules 3-niveaux
 [The different 3-phase rectifiers composed of 3-level cells.]

a montré tout son intérêt en fonctionnement triphasé. Il est possible, dans certaines conditions, de placer la tension en phase avec le courant de manière à fonctionner à facteur de déplacement unitaire.

- La seconde structure (Fig. 24b) n'a, à notre connaissance, jamais été étudiée.
- La troisième (Fig. 24c) a fait l'objet d'une étude [29], conduisant à un comportement similaire à celui de la première structure.

6. Conclusion

Cet article a montré une méthodologie de définition des cellules multi-niveaux à association de sources de tension en série. La méthode a permis de définir ces cellules à partir de trames d'interrupteurs. Des montages bien connus tel le NPC ont été redéfinis par cette méthode de synthèse. Elle a aussi permis d'envisager de nouvelles structures pouvant être mises en œuvre dans des applications de type redresseur non réversible par exemple. La notion de non réversibilité du convertisseur a été utilisée afin de simplifier ces structures dont la complexité est fortement accrue par la multiplication du nombre de niveaux.

Cette méthode ne prétend pas à l'exhaustivité, puisque seules deux trames d'interrupteurs ont été considérées. Elle constitue néanmoins une amorce de synthèse des structures multi-niveaux.

Bibliographie

- [1] Foch H., Meynard T., Arches R. et Metz M., Étude comparative de techniques de mise en série dans les convertisseurs alimentés en haute tension, EPF Marseille (1992).
- [2] Bartholoméüs P. and Le Moigne P., A simple method for the valuation of the harmonics generated by multilevel converters, ELECTRIMACS, Nantes (1996) pp. 871-876.
- [3] Bartholoméüs P., Le Moigne P. et Rombaut C., Étude des limitations en puissance des convertisseurs et apport des techniques multi-niveaux, E.P.F Grenoble (1996) 121-126.
- [4] Walker L.H., 10 MW GTO converter for battery peaking, *IEEE Trans. Industry Appl.* **26** (1990) 63-72.
- [5] Boisirou P., Amplificateur 1.5 MW à IGBT, EPF Marseille (1992).
- [6] Hembert F., Le Moigne P. et Cambronne J.P., Series association of VSI in high power active filtering, *IEEE PESC Conf.* **1** (1996) 759-764.
- [7] Meynard T. and Foch H., Multi-Level choppers for High Voltage Applications, *EPE J.* **2** (1992) 45-50.
- [8] Meynard T. and Foch H., Imbricated cells Multi-Level Voltage Source Inverters for High Voltage Applications, *EPE J* **3** (1993) 99-106.
- [9] Bhagwat P.M. and Stefanovic V.R., Generalized Structure of a Multilevel PWM Inverter, *IEEE Trans. Industry Appl.* **19**(1983) 1057-1069.
- [10] Baker R. H., Bridge converter circuit, (Exxon Research & Engineering), brevet USA 4.270.163, (1979)
- [11] Nabae A., Takahashi I. and Akagy H., A neutral point clamped PWM inverter, *IEEE Trans. Industry Appl.* **1** (1981) 518-523.
- [12] Bächle Ch., Bauer H.P. and Steger T., Requirements on the control of a three-level four quadrant power converter in a traction application, *EPE Aachen* **2** (1989) 577-581

- [13] Steinke J.K., Switching frequency optimal PWM control of a three-level inverter, *IEEE Trans. power electronics* **7** (1992) 487-496.
- [14] Tamai S., Koyama M., Fujii T., Mizoguchi S. and Kawabata T., 3-level GTO converter-inverter pair system for large capacity induction motor drive, *EPE Brighton* (1993) **5** 45-50.
- [15] Carpita M., Bacigalupo C. and Cali R., Multilevel voltage source converters for medium voltage adjustable speed drives, *IEEE ISIE Conf.* **1** (1995) 91-98.
- [16] Carpita M., Tenconi S.M. and Fracchia M., A novel multilevel structure for Voltage Source Inverter, *EPE Florence* **1** (1991) 90-94.
- [17] Menzies R.W., Steimer P. and Steinke J.K., Five-level GTO inverters for large induction motor drives *IEEE Trans. Industry Appl.* **30** (1994) 938-943.
- [18] Peng Z.P., Lai J.S., McKeever J. and VanCoevering J., A multilevel voltage-source converter with balanced DC voltages, *IEEE PESC Conf.* **2** (1995) 1144-1150.
- [19] Chen Y. and Ooi B.T., Advanced static VAR compensator using multimodules of multilevel converter with equalization control of DC voltage levels, *IEEE PESC Conf.* **1** (1996) 747-752.
- [20] Bartholoméüs P., Contribution à l'étude des redresseurs à facteur de puissance quasi unitaire fonctionnant en mode multi-niveaux. Application au chargeur de batteries, Thèse de Doctorat (Lille 1996).
- [21] Le Moigne P., Circuit redresseur de tension alternative, (brevet : OLDHAM France S.A, L2EP) brevet France n°9410863 (1994).
- [22] Bartholoméüs P. and Le Moigne P., A new monophasé multilevel rectifier : structure and control, à paraître dans *EPE J.*
- [23] Bartholoméüs P. and Le Moigne P., High-power-factor battery charger using multilevel techniques, à paraître dans *EPE J.*
- [24] Salmon J.C., Techniques for minimizing the input current distortion of current-controlled single-phase Boost rectifiers, *IEEE Trans. power electronics* **8** (1993) 509-520
- [25] Zhang M.T., Jiang Y. and Lee F.C., Single-phase three-level Boost power factor correction converter, *IEEE APEC Conf.* **1** (1995) 434-439.
- [26] Pinheiro J.R., Vidor D.L.R. and Grundling H.A., Dual output three-level boost power factor correction converter with unbalanced loads, *IEEE PESC Conf.* (1996) 733-739.
- [27] Bartholoméüs P. and Le Moigne P., A 3kW unit-power-factor multilevel rectifier based on a double-Boost converter, à paraître au congrès *EPE Trondheim* (1997).
- [28] Midavaine H., Le Moigne P. and Bartholoméüs P., Multilevel three-phase rectifier with sinusoidal input currents, *IEEE PESC Conf.* **2** (1996) 1595-1600.
- [29] Yifan Zhao, Yue Li and Thomas A. Lipo, Force Commutated Three Level Boost Type Rectifier, *IEEE Trans. Industry Appl.* **31** (1995) 155-161.