

CHAPITRE V

Onduleurs Multi-Niveaux

V.1. Introduction

Un convertisseur statique est dit ‘multi-niveaux’ lorsqu’il génère une tension découpée de sortie composée d’au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D’une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu’il est à l’état bloqué, supporte une fraction d’autant plus faible de la pleine tension continue que le nombre de niveaux est élevé. D’autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d’importantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l’amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. L’amplitude des raies harmoniques est, par conséquent, d’autant moins élevée.

Pour contourner la limitation en tension de blocage des principaux interrupteurs de puissance, de nouvelles techniques dites multiniveaux ainsi que de nouvelles topologies. Celles-ci sont une association série-parallèle des semi-conducteurs existants. Elles permettent de générer plusieurs niveaux de tension à la sortie du convertisseur. Le nombre de semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ces topologies augmente avec le nombre de niveaux désirés. La complexité de leur structure s’en trouve augmentée et leur fiabilité réduite.

V.2. Différentes topologies des onduleurs multiniveaux

Trois topologies de base des onduleurs multiniveaux

- a. La topologie à diode de bouclage (à diode clampé par le neutre NPC)
- b. La topologie à condensateur flottant
- c. La topologie en cascade

V.2.1. Topologie à diodes clampées (NPC-Neutral Point Clamped)

C’est une topologie à potentiel distribué. Des diodes de bouclage (Clamping Diodes) sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence. Les onduleurs NPC, en particulier la structure à trois niveaux, ont une grande popularité dans les applications d’entraînement des moteurs, comparé aux autres topologies d’onduleurs multiniveaux.

V.2.1.1. Principe de fonctionnement

Un bras d’onduleur NPC à trois niveaux est constitué de six diodes et quatre interrupteurs contrôlables, S_j , $j = 1, 2, \dots, 4$. Les interrupteurs S_1 et S_3 , ainsi que S_2 et S_4 , sont complémentaires. De plus, les deux interrupteurs extérieurs S_1 et S_4 ne sont pas autorisés à être activés simultanément.

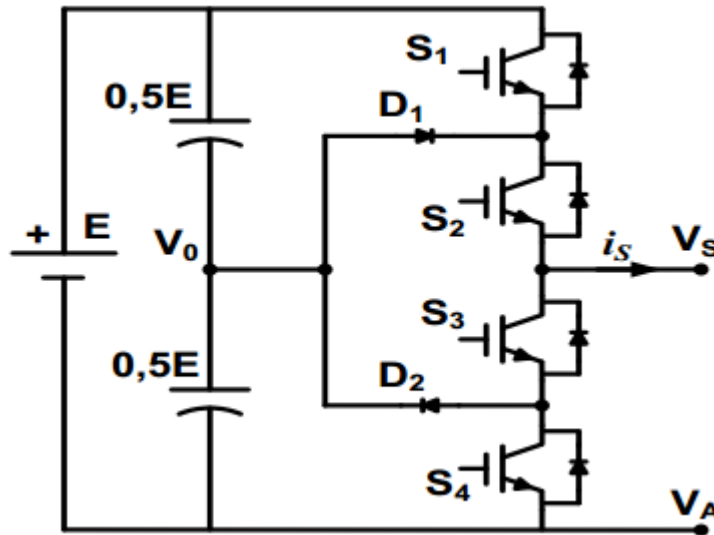


Fig 5.1. Onduleur NPC à Trois Niveaux

Les deux diodes de bouclage (Clamping Diode) D_1 et D_2 , permettent de relier les étages intermédiaires au point milieu V_0 .

Lorsque $S_1 = S_2$, les deux diodes D_1 et D_2 ne conduisent pas et ce montage fonctionne alors comme un pont en H générant les niveaux 0 et E entre les points V_S et V_A .

Lorsque $S_2 = S_3 = 1$, la diode D_1 lie le point milieu V_1 à la sortie V_S pour les courants sortants (pour $i_S > 0$ sur la figure II.1). La diode D_2 lie le point milieu V_1 à la sortie V_S pour les courants rentrants. Ceci permet de générer une tension de $1/2 E$ entre les points V_S et V_A . Les 3 états de commutation possibles sont résumés au Tableau II.1. La sortie est prise entre les points V_S et V_0 .

Tableau 5.1: États des commutations et tension de sortie d'un onduleur NPC à trois niveaux

S_1	S_2	$V_S - V_0$
0	0	$-1/2 E$
0	1	0
1	1	$1/2 E$

La topologie NPC peut être étendue à un nombre plus élevé de niveaux. $(N - 1)$ capacités sont nécessaires pour générer une onde de sortie à N niveaux. Les $(N - 1)$ condensateurs permettent de diviser la tension d'entrée. Les tensions aux bornes des condensateurs doivent être égales. On fera, également, appel à $2(N - 1)$ Transistor et le même nombre de diodes montées en parallèle inverse sur chaque Transistor. $2(N - 2)$ diodes de bouclage sont nécessaires. Un exemple d'une topologie NPC à cinq niveaux est représenté sur la Figure 5.2.

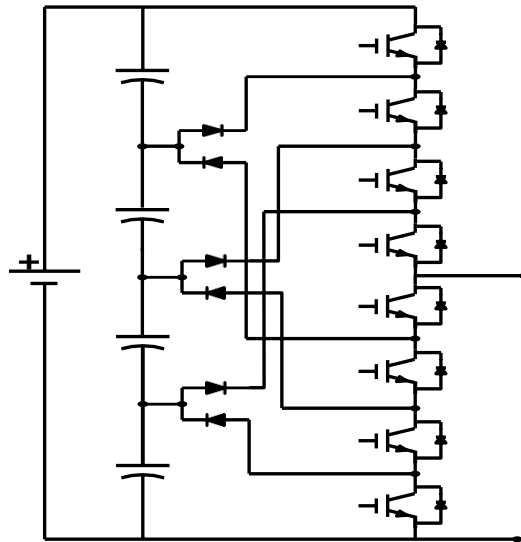


Fig 5.2. Onduleur NPC à Cinq Niveaux

Il est toutefois judicieux de signaler que la topologie NPC, dans sa version de base, n'assure pas l'équilibrage des tensions aux bornes des capacités. En effet, Compte tenu de l'inégalité de la durée de conduction des interrupteurs, la durée de charge ou de décharge des condensateurs s'entrouvre affectée. L'onde de sortie en subit une modification à cause de la non-uniformité de sa valeur entre deux niveaux consécutifs, ainsi qu'une augmentation du dV/dt . Ce déséquilibre des tensions formant le pont diviseur d'alimentation est l'un des inconvénients majeurs des onduleurs NPC.

V.2.2. Topologie à capacités flottantes (FC-Flying Capacitor)

Un onduleur à Condensateurs Flottants (Flying Capacitor Multilevel Inverters) résulte de la connexion de $(N - 1)$ sources de tensions flottantes placées en série de façon à obtenir N niveaux distincts de tension de sortie. Les sources de tensions sont la tension du bus d'alimentation, E et $(N - 2)$ condensateurs utilisés comme sources flottantes. À chaque source continue, on associe une cellule de commutation formée de deux interrupteurs à trois segments. La structure d'un onduleur à condensateurs flottants à quatre niveaux est représentée sur la Figure 5.3. La tension du bus continue, E , est ici scindée en deux pour former un point de référence.

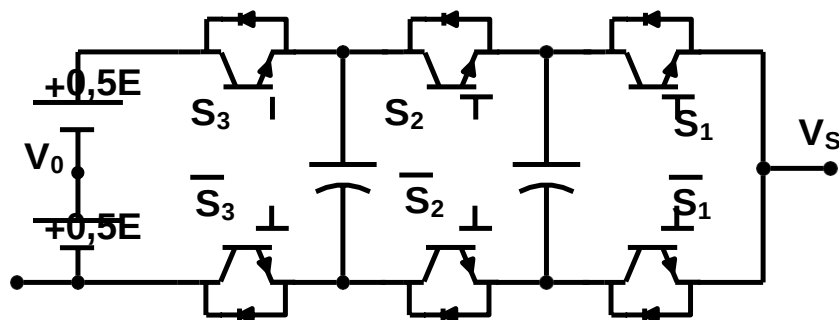


Fig5.3. Onduleur à Condensateurs Flottants quatre niveaux (Trois cellules de commutation)

L'onduleur FC à quatre niveaux est constitué de trois cellules imbriquées ; chaque paire d'interrupteurs forment une cellule élémentaire de commutations. Ces interrupteurs seront donc commandés de manière complémentaire afin d'éviter un court-circuit au niveau des sources de tension. Toutes les combinaisons de signaux de commande respectant cette complémentarité sont autorisées. En admettant que les tensions des condensateurs sont correctement régulées, la tension aux bornes du condensateur formant la cellule de rang j , vaut:

$$V_{Cj} = \frac{j}{(N-1)} E, \quad j = 1, 2, 3, \dots, (N-2) \quad (5.1)$$

Ainsi chaque interrupteur bloque la même tension inverse, soit: $\frac{\Delta V}{N-1}$

Le Tableau 5.2 donne, pour un Onduleur à quatre niveaux, les configurations possibles pour chaque niveau de la tension de sortie. On remarque que $2^{(N-1)}$ commutations sont possibles ; mais seulement N niveaux de tensions sont synthétisables en sortie. Les états redondants peuvent être exploités pour l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs.

Tableau 5.2: États des commutations et tension de sortie d'un onduleur FC à quatre niveaux

$V_S - V_A$	$V_S - V_0$	S_1	S_2	S_3
0	- 1/2 E	0	0	0
1/3 E	- 1/6 E	1	0	0
		0	1	0
		0	0	1
2/3 E	1/6 E	1	1	0
		0	1	1
		1	0	1
E	1/2 E	1	1	1

Le principal inconvénient pour l'augmentation du nombre de niveaux d'un onduleur FC, réside dans le fait que cette structure nécessite un nombre élevé de condensateurs. Pour des applications à forte puissance, ces derniers seront volumineux et coûteux ; donc peu rentables. D'autre part, l'augmentation du nombre de condensateurs augmente la complexité de réglage des tensions continues.

V.2.3. Onduleurs Multiniveaux Cascadés

Le schéma général d'un onduleur cascadié simple phase est donné en figure 5.4. Il s'agit de la mise en série de n ponts en H. chaque pont en H, ou cellule élémentaire, possède sa propre tension continue d'alimentation. Les alimentations continues doivent être galvaniquement isolées les unes des autres, afin d'éviter un court-circuit lors de leur mise en série. La tension totale de sortie est obtenue en additionnant les tensions de toutes les cellules. Chaque pont en H possède quatre états de commutations possibles, donnant lieu à trois niveaux de tension de sortie.

La tension de sortie de la cellule élémentaire de rang k est donnée par :

$$V_{Hk} = S_k V_{dc_k} S_k \in \{-1, 0, 1\} \quad (5.2)$$

Ainsi la structure globale, formée de n pont en H connectés en série, possèdera $4n$ états de commutations possibles ; pouvant engendrer $3n$ niveaux de tensions.

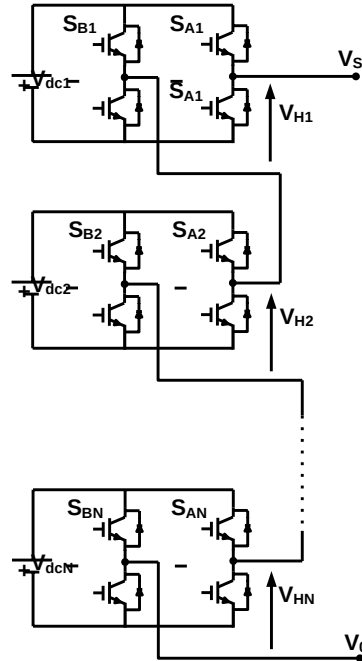


Fig 5.4. Onduleur Cascadé en H

Pour synthétiser les tensions d'alimentations, Ceci nous conduit à considérer :

- Onduleurs cascades symétriques
- Onduleurs Cascades Asymétriques

❖ Onduleur multiniveaux binaire

Les tensions d'alimentation s'expriment par :

$$V_{dc_n} = E * 2^{(n-1)} \quad (5.3)$$

$(2^{(n+1)} - 1)$ niveaux distincts peuvent être générés par ce type d'onduleurs.

❖ Onduleur Cascadé quasi-linéaire

Les tensions d'alimentation des cellules partielles peuvent être exprimées par :

$$V_{dc_n} = E \times 2 \times 3^{(n-1)} \quad (5.4)$$

Un onduleur cascadé quasi-linéaire, à cellules élémentaires, permet de générer $(2 \times 3^{(n-1)} + 1)$ niveaux distincts en sortie.

❖ Onduleur Cascadé Trinaire

Les tensions d'alimentation des cellules partielles sont exprimées par:

$$V_{dc_n} = E \times 3^{(n-1)} \quad (5.5)$$

L'onduleur multi niveau Cascadé Trinaire génère une tension ayant (3^n) niveaux différents. C'est la configuration possédant le plus grand nombre de niveaux synthétisables.

❖ Onduleur cascadé hybride

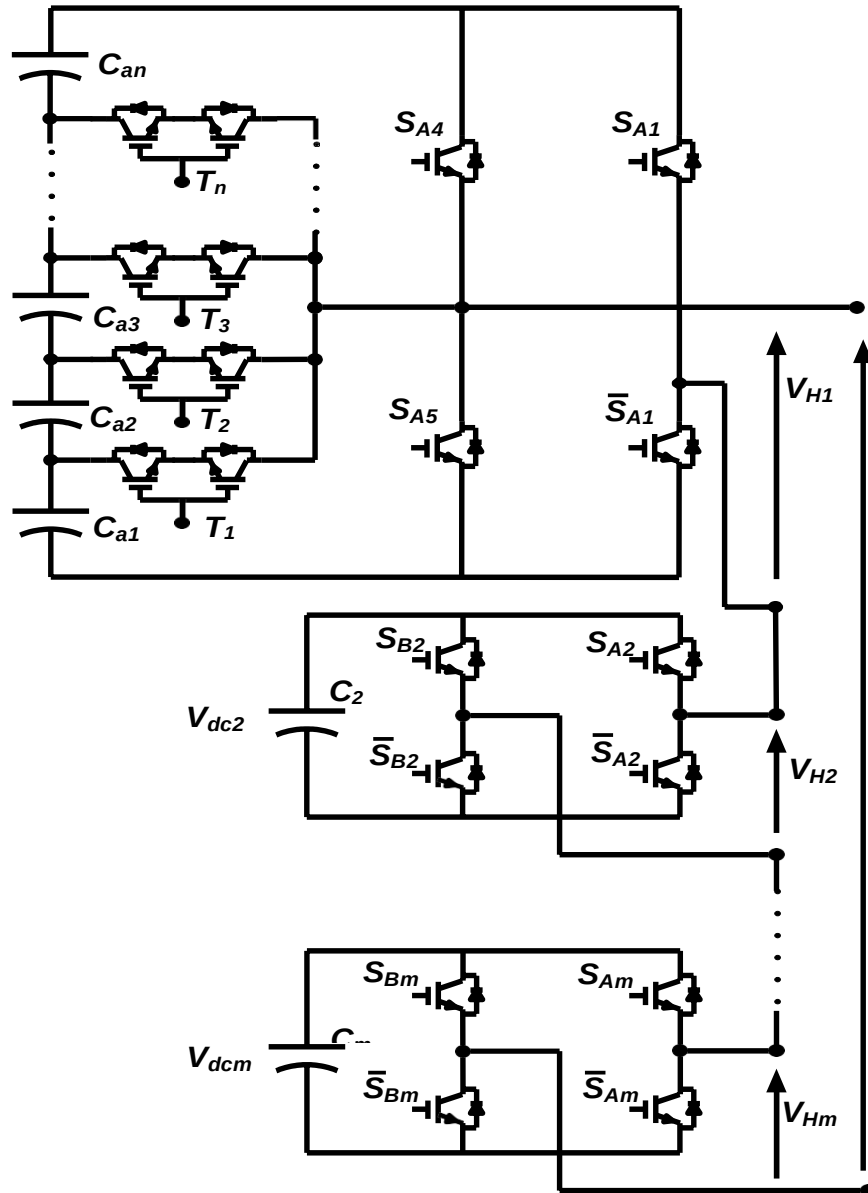


Fig 5.5. Onduleur Cascadé Hybride à $(2n+1)3^{(n-1)}$ Niveaux

V.3. Application des onduleurs multi niveauxcascadés et asymétriques

Onduleur deux ponts H connectés en série et deux chaînes photovoltaïques

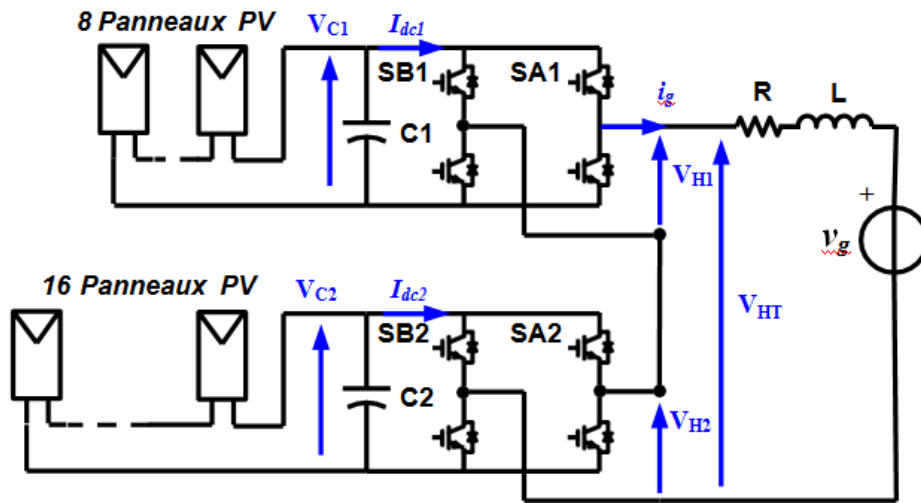


Fig 5.6. Onduleur PV Cascadé et Asymétrique

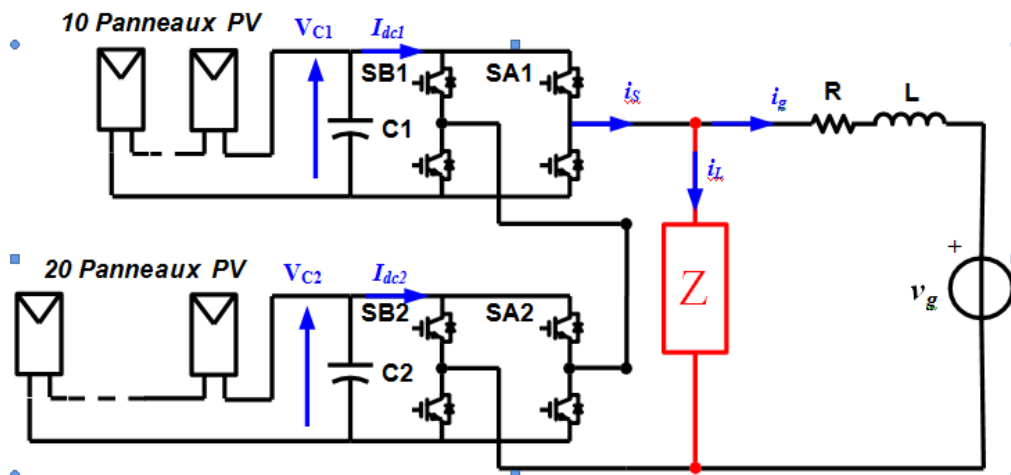


Fig 5.7. Onduleur PV Asymétrique et charge non linéaire

V.4. Conclusion

Lors de cette partie on a survolé les différentes topologies d'onduleurs multiniveaux. L'onduleur cascadé a retenu notre attention. L'intérêt porté à ce dernier réside dans sa capacité à générer des formes d'ondes de très bonne qualité ; tout en sollicitant un nombre réduit de composants électriques. Le principal inconvénient de l'onduleur cascadé est le grand nombre de tensions continues isolées exigées pour chaque pont. Cependant, lorsque chaque pont en H est alimenté par une source d'énergie renouvelable, tels que des panneaux photovoltaïques, l'isolation galvanique entre les bus continus est intrinsèquement assurée. Ceci fait de l'onduleur cascadé un candidat par excellence à l'interfaçage de l'énergie photovoltaïque.

REFERENCES

1. [K.ZAOUCHE](#) « Modélisation et Commande d'un Convertisseur Multiniveaux alimenté par un Système Multi-Sources » Thèse de Doctorat en Sciences Université Des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2018.
2. [K. BERKOUNE](#), « Approche Mathématique pour la Modulation de Largeur d'Impulsion pour la conversion statique de l'énergie électrique : Application aux onduleurs multiniveaux. », Doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2016.
3. [I.BOUYAKOUB](#), « Polycopié du Module : Électronique de Puissance Avancée » Université Hassiba Ben Bouali De Chlef.