

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Populaire et Démocratique Algérienne République

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Ecole Supérieure des Sciences Appliquées
d'Alger



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
المدرسة العليا في العلوم التطبيقية بالجزائر

Département du second cycle

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Traction électrique

Thème :

**Problème d'équilibrage de la tension des deux condensateurs des
bus continu dans l'onduleur trois niveaux T-NPC.**

Présenté par : BOUTTEFARA Housem

Encadré (e) par : Dr. BENACHOUR Ali

Soutenu le : 17/07/2021

Devant le jury composé de :

M TEFFAHI Abdelkader
M GUELLAL Amar
M BENACHOUR Ali

Président (e)
Examineur (rice)
Encadreur (e)

Binôme N° : 11 /Master /TR/ 2021

ملخص

ومن بين مساوئ المنعكسات المتعددة المستويات للمكثفات T-NPC اختلال توازن الفولتات للمكثفات المكونة للمكثفات المستمرة. والهدف من هذا العمل هو الدراسة البيبليوغرافية لمختلف الأساليب المستخدمة لمعالجة هذه المشكلة. **الكلمات المفتاحية:** محول مصفوفة غير مباشر ثلاثي المستوى ، SVM ، متواصل فولتية حافلة.

Abstract

Among the disadvantages of the T-NPC multi-level inverters is the imbalance of the voltages of the two capacitors forming the continuous bus. This imbalance can result in distortions and imbalance of the inverter output voltages. The aim of this work is the bibliographical study of the different methods used to treat this problem.

Keywords: Three-level indirect matrix converter, SVM, continuous bus voltage.

Résumé

Parmi les inconvénients des onduleurs multi-niveaux T-NPC est le déséquilibre des tensions des deux condensateurs formant le bus continu. Ce déséquilibre peut engendrer des distorsions et un déséquilibre des tensions de sortie de l'onduleur. Le but de ce travail est l'étude bibliographique des différentes méthodes utilisées pour traiter ce problème.

Mots clés : Convertisseur matriciel indirect trois niveaux, SVM, tension de bus continu.

Remerciement

Nous remercions Allah, le tout puissant pour nous avoir alloué suffisamment de volonté, nous avoir accordé la toute la patience et la santé durant toutes ces années d'études du cursus de formation.

Nous remercions de manière exceptionnelle et singulière le Docteur BENACHOUR Ali, notre encadreur pour les efforts qu'il n'a pas manqué de consentir envers nous, pour l'apport déterminant et valeureux qu'il a bien voulu nous accorder et pour le soutien scientifique et moral.

Nos remerciements vont à Monsieur SAKHRI Sabri, pour les conseils qu'il n'a pas manqué de nous donner, pour l'appui technique et moral.

Nous n'oublions pas remercier le binôme de l'Ecole Polytechnique d'Alger pour la collaboration et la concertation que nous avons eu le long de l'élaboration de notre travail de recherche.

Nous remercions le collectif des enseignants de l'Ecole Supérieure des Sciences Appliquées d'Alger ESSA d'Alger, qui nous enseigné les techniques et les procédés de l'électrotechnique et de la traction électrique. Nos remerciements, les plus chaleureux, vont au Staff de la direction de l'Ecole et l'ensemble du personnel administratif et d'exécution.

Enfin, nos remerciements à nos camarades de l'Ecole ESSA, pour qui nous souhaitons toute la réussite dans leurs études et leur vie professionnelle.

N'oublions pas nos parents qui nous ont soutenu passionnellement et se sont inquiété tout le long de notre formation d'ingénieur

Dédicace

Le présent travail est dédié à tous les hommes et toutes les femmes de la Science qui ont mis leur intelligence, leur génie et leur savoir au service de l'humanité. Ceux qui ont inventé l'énergie électrique et qui ont œuvré pour son développement et son épanouissement dans le but de faire avancer toute l'humanité vers des horizons plus hauts et plus confortables. C'est grâce à leur génie et leur savoir-faire, que les humains disposent aujourd'hui du confort et des bienfaits d'une énergie propre dite l'énergie électrique.

Il est dédié au Professeur BENACHOUR Ali, notre promoteur pour son soutien déterminant, pour son accompagnement le long de l'élaboration de ce travail. Il lui est dédié au titre de son apport technique et moral, inégalable et incomparable.

Il est dédié à nos parents pour les sacrifices qu'ils ont bien voulu consentir pour que nous aboutissions à cette fin de cycle d'ingénieur. Il est dédié à nos frères et sœurs pour leur soutien moral et matériel.

Table de matière

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: THEORIQUE DES ONDULEURS ETUDE MULTINIVEAUX	
I-1 INTERET ET CONCEPT DES ONDULEURS MULTI-NIVEAUX.....	2
I.1 LES DIFFERENTES TOPOLOGIES DES ONDULEURS MULTI NIVEAUX.....	4
I.1.1 Onduleur clampé par le neutre (Neutral Point Clamped NPC)	4
I.1.2 La topologie au condensateur flotteur (Flying Capacitor FC).....	6
I.1.3 La topologie en pont H cascadi.....	8
I.1.4 1Onduleur clampé activement par le neutre (Active Neutral Point Clamped ANPC) : 10	
I.1.5 Onduleur NPC raccordé au rseau Z-source	10
I.1.6 Onduleur multiniveau compact à condensateur commuté interconnecté (C3-SCMLI) Topologie avec un nombre de commutateurs rduit	10
I.1.7 Un onduleur à 13 niveaux à condensateur commuté avec un nombre rduit de commutateurs)	11
I.1.8 La topologie à plusieurs niveaux Avec nombre rduit (4S-15L) de commutateurs)	12
I.2 ONDULEURS MULTINIVEAUX A STRUCTURES T-NPC	12
I.2.1 Avantages de la topologie T-NPC.....	15
I.2.2 Inconvénient de la topologie T-NPC.....	16
I.3 COMPARAISON ENTRE LES TOPOLOGIES NPC, T-NPC ET ANPC	16
I.4 APPLICATIONS DES ONDULEURS MULTINIVEAUX.....	18
I.4.1 Amélioration de la qualité de l'énergie.....	19
I.4.2 Interconnexion des énergies renouvelables	19
I.4.3 Variateurs de vitesse.....	20
I.5 ÉTAT DE L'ART DES STRATEGIES DE MODULATION	20
I.6 PROBLEME D'EQUILIBRAGE DE LA TENSION DES DEUX CONDENSATEURS DES BUS CONTINU DANS L'ONDULEUR TROIS NIVEAUX T-NPC	22
I.6.1 Topologie d'un onduleur à trois niveaux de type T	22

I.6.2	Problème d'équilibrage du point milieu du bus continu	22
I.7	CONCLUSION	26

Listes des figures et tableaux

LISTE DES FIGURES

Figure I- 1 :Schéma d'un bras d'onduleur à (a) deux niveaux, (b) trois niveaux, (c) neuf niveaux	3
Figure I- 2: La tension de sortie d'un bras d'onduleur à (a) deux niveaux, (b) trois niveaux, (c) neuf niveaux	3
Figure I- 3: Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux	4
Figure I- 4 : Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux	5
Figure I- 5 : Structure de l'onduleur FC à 3 niveaux triphasé	7
Figure I- 6 : Structure de l'onduleur H-bridge à 3 niveaux triphasé	8
Figure I- 7 : Onduleur T-NPC proposé à base de condensateurs commutés (SC-MTI).....	15
Figure I- 8 : Rendement mesuré du NPC et du T-NPC pour différentes fréquences des commutation et puissances de sortie [46].....	17
Figure I- 9 : Topologies de connexion pour les dispositifs de puissance personnalisés : (a) DSTATCOM, (b) DVR, et (c) UPQC	19
Figure I- 10 : classement des méthodes de modulation courantes pour les onduleurs multiniveaux.....	21

LISTE DES TABLEAUX

Table I- 1 : États possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux.....	5
Table I- 2 : États de fonctionnement possibles pour l'onduleur FC à 3 niveaux triphasé	7
Table I- 3 : États de fonctionnement possibles de l'onduleur H-bridge à 3 niveaux triphasé [18].	9
Table I- 4 : Comparaison entre les structures NPC, T-NPC et ANPC	18
L'onduleur T-NPC possède du vecteur zéro, petit, moyen et grand basés sur la magnitude. Il y a au total 27 états de commutation dont six grands vecteurs, six moyens vecteurs, six petits vecteurs et un vecteur zéro comme le montre le Tableau I- 5. Les deux vecteurs zéro et petit ont un état de commutation redondant.....	23
Table I- 5 :Relation entre l'état de commutation et le mode commun	23
Table I- 6 : relation entre les vecteurs de commutation et la tension mode commun.....	25

Etas de l'art :

INTRODUCTION GENERALE

Après presque deux siècles passés dans l'oubli, la SRM revient en force pour prendre sa place à côté des autres machines. Grâce aux progrès prodigieux accomplis dans le domaine de l'électronique de puissance et le développement spectaculaire de l'informatique, et de la microélectronique ainsi que les découvertes réalisées sur les matériaux, la machine à reluctance variable est devenue une concurrente des machines à champs tournants dans certaines applications industrielles [1,15].

En effet, la SRG présente un grand intérêt dans les applications caractérisées par de larges zones de fonctionnement dans la caractéristique couple-vitesse. On la rencontre dans les systèmes d'alimentation dans les avions et les automobiles hybrides qui sont généralement caractérisés par leur fonctionnement à grandes vitesses. La SRG est un bon candidat pour ces applications grâce à son rotor de structure simple (pas de bobinage ni aimants) qui peut tolérer le fonctionnement à grandes vitesses et des températures élevées. Par ailleurs, la SRG est aussi utilisée pour l'application éolienne ou elle fonctionne à basses vitesses.

THEORIQUE DES ONDULEURS ETUDE MULTINIVEAUX

Les convertisseurs multiniveaux représentent une technologie bien établie pour les applications moyenne tension haute puissance. Ils permettent de générer une tension découpée à leur sortie, composée d'au moins trois niveaux [1].

Ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés, dont le plus connu sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part sur le développement des composants à semi-conducteur entièrement commandables, puissants, robuste et rapides et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion [2]

Trois topologies différentes ont été proposées pour les onduleurs multiniveaux: Onduleur clampé par le neutre (Neutral Point Clamped NPC) [3], onduleur à condensateurs flottants (Flying Capacitor FC) [4], onduleur en pont H cascadié (Cascaded H bridge CHB) [4]. De plus, plusieurs stratégies de modulation et de contrôle ont été développées ou adoptées pour les onduleurs multiniveaux, y compris les suivantes: Modulation à largeur d'impulsion triangulo-sinusoïdale (SPWM), modulation à largeur d'impulsion avec injection d'harmonique de rang 3 (THIPWM), modulation à largeur d'impulsion vectorielle (SVPWM), modulation à largeur d'impulsion calculée et la commande pleine onde [5].

I-1 Intérêt et concept des onduleurs multi-niveaux

Les onduleurs à plusieurs niveaux comprennent un ensemble de semi-conducteurs de puissance et de condensateur de sources de tension où on a $(N - 1)$ sources de tension de valeur $\frac{VDC}{N-1}$ (N est le nombre de niveaux du convertisseur) [1], dont la sortie génère des tensions avec des formes d'onde échelonnées. La commutation des interrupteurs permet l'addition des tensions des condensateurs, qui atteignent une haute tension à la sortie [5].

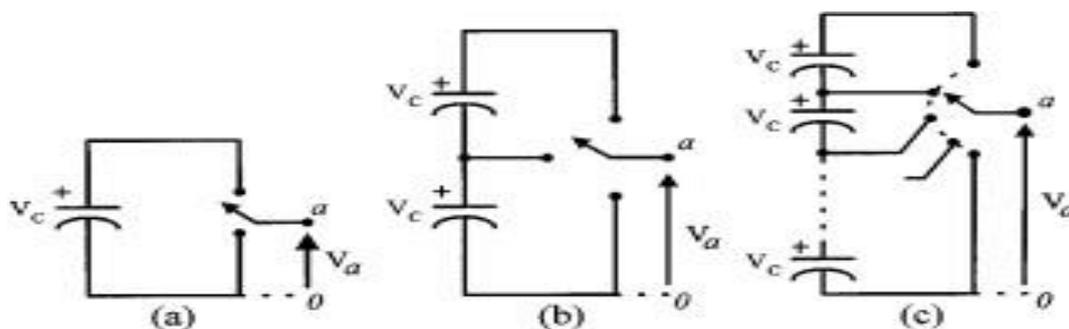


Figure I- 1 :Schéma d'un bras d'onduleur à (a) deux niveaux, (b) trois niveaux, (c) neuf niveaux

Le semi-conducteur est représenté par un commutateur idéal avec plusieurs positions. Un onduleur à deux niveaux génère une tension de sortie avec deux valeurs (niveaux) [voir Figure I-2], tandis que l'onduleur à trois niveaux génère trois tensions, ainsi de suite [5]

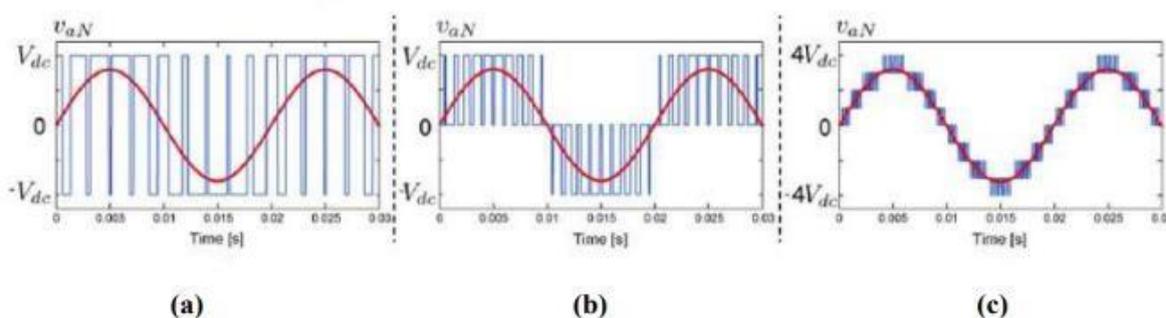


Figure I- 2: La tension de sortie d'un bras d'onduleur à (a) deux niveaux, (b) trois niveaux, (c) neuf niveaux

Le terme multi niveau commence par l'onduleur à trois niveaux introduit par Nabae et al. [3]. En augmentant le nombre de niveaux dans l'onduleur, les tensions de sortie ont plus d'étapes générant une forme d'onde en escalier, qui a une distorsion harmonique réduite.

Cependant, un nombre élevé de niveaux augmente la complexité de la commande et introduit des problèmes de déséquilibre de tension [1] [5].

En général, les onduleurs de tension multi-niveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets.

Les caractéristiques les plus intéressantes des onduleurs multiniveaux sont les suivantes [5]:

- Ils peuvent générer des tensions de sortie avec des distorsions plus basses.
- Ils consomment le courant d'entrée avec une très faible distorsion.

- Ils génèrent une tension de mode commun (CM) plus petite, ainsi réduire la contrainte dans les enroulements du moteur. En outre, utilisant des méthodes de modulation sophistiquées, des tensions CM peut être éliminé [6].
- Ils peuvent fonctionner avec une fréquence de commutation plus basse.

La figure 2 représente les trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.

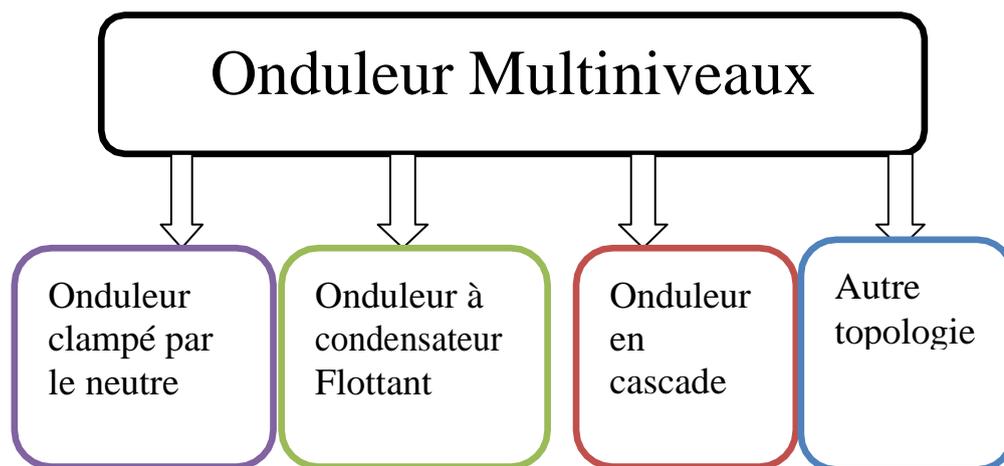


Figure I- 3: Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

- La topologie clampé par le neutre (Neutral Point Clamped NPC)
- La topologie à condensateur Flottant (Flying Capacitor FC).
- La topologie en pont H cascadié (Cascaded H bridge CHB).
- Autres topologies.

I.1 Les différentes topologies des onduleurs multi niveaux :

I.1.1 Onduleur clampé par le neutre (Neutral Point Clamped NPC):

L'onduleur PWM clampé au point neutre (onduleur NPC-PWM), qui convient Pour un système d'entraînement motorisé à haut rendement. Sa tension de sortie Contient moins d'harmoniques que celui d'un onduleur conventionnel.

L'onduleur NPC à trois niveaux est représenté sur **la figure-3**. Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C1 et C2), formant un point milieu noté (O) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux. La tension totale du bus continu vaut E, dans les conditions normales de

fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension $E/2$ à leurs bornes. Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (K1, K2, K3 et K4 pour le bras a) et deux diodes de maintien connectées au point milieu du bus continu [7] [8] [9].

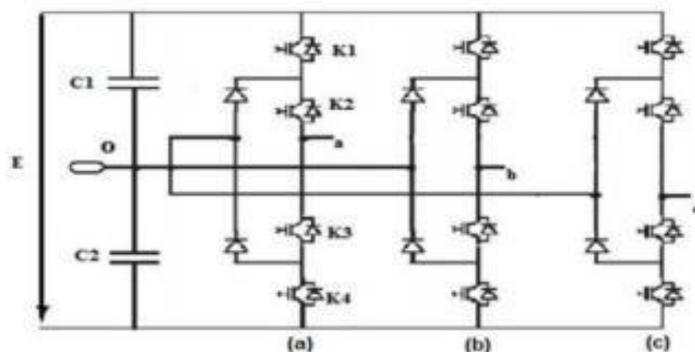


Figure I- 4 : Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux

I.1.1.1 Principe de fonctionnement des onduleurs à structure NPC :

Les séquences possibles de fonctionnement de l'onduleur NPC à 3 niveaux sont mis en évidence à travers le tableau suivants [10]:

Table I- 1 : États possibles de l'onduleur NPC à 3 niveaux

Séquences	<u>K1</u>	<u>K2</u>	<u>K3</u>	<u>K4</u>	<u>Tension de sortie</u>
Génération du niveau maximum	1	1	0	0	$E/2$
Génération du niveau intermédiaire	0	1	1	0	0
Génération du niveau minimum	0	0	1	1	$- E/2$

I.1.1.2 Avantages de la topologie NPC

Cette topologie offre l'avantage d'étendre les principes employés sur un onduleur à trois niveaux jusqu'à des nombres plus élevés, étant donné qu'elle est généralisable [11].

Chaque interrupteur supporte la moitié de la tension du bus continu [12]. Le partage équitable de la tension du bus continu sur l'ensemble des phases de l'onduleur, rend la configuration buck-to-buck non seulement possible, mais également pratique pour de nombreux usages notamment la variation de vitesse et l'interconnexion buck-to-buck à haute tension [13].

I.1.1.3 Inconvénients de la topologie NPC

La structure NPC est utilisée en industrie pour trois niveaux uniquement en raison de la difficulté à maintenir l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs du bus ainsi que l'augmentation de la complexité de la commande [13].

L'augmentation du nombre de niveaux engendre l'élévation excessive du nombre de diodes de clamp.

I.1.2 La topologie au condensateur flotteur (Flying Capacitor FC) :

La topologie de l'onduleur multi niveau à cellule imbriquées ou à condensateurs flottant (flying capacitor or multi level inverter), a été proposée par Meynard et Foch en 1992[14]. Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de l'équilibre des tensions, et d'autre part pour réduire le nombre excessif de diodes. Dans cette topologie, les capacités remplacent les diodes de bouclage, d'où l'appellation « onduleur à condensateur flottants »[15].

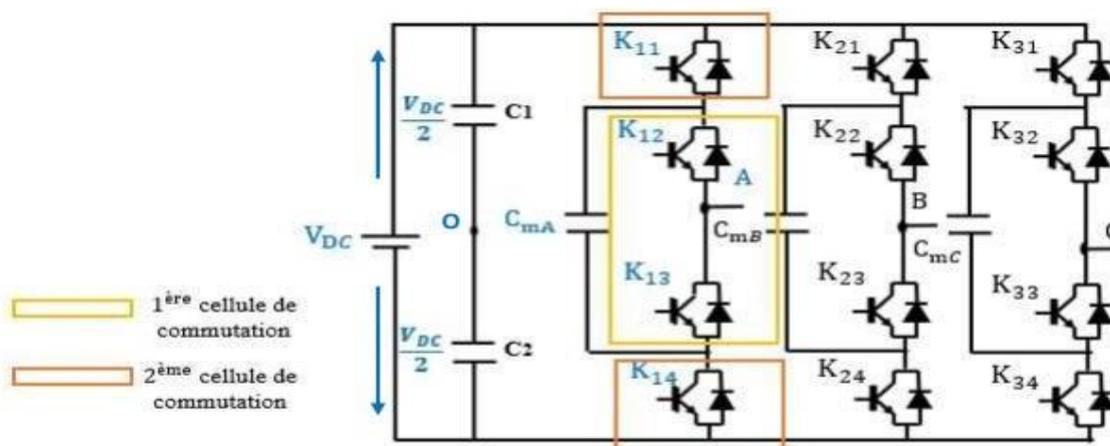


Figure I- 5 : Structure de l'onduleur FC à 3 niveaux triphasé

I.1.2.1 Principe de fonctionnement de la topologie FC :

Pour un onduleur FC à trois niveaux de tension, quatre séquences de fonctionnement sont distinguées :

Table I- 2 : États de fonctionnement possibles pour l'onduleur FC à 3 niveaux triphasé

Séquences	<u>K1</u>	<u>K2</u>	<u>K3</u>	<u>K4</u>	<u>Tension de sortie</u>
Génération du niveau maximum	1	1	0	0	$E/2$
Génération du niveau intermédiaire	1	0	0	1	0
	0	1	1	0	
Génération du niveau minimum	0	0	1	1	$- E/2$

I.1.2.2 Avantages de la topologie FC

- Limitation naturelle des contraintes en tension imposées aux composants de puissance (faible valeur de $\frac{dv}{dt}$ aux bornes des composants) [16] [1].
- Une seule source continue DC est nécessaire par phase [16].

- Possibilité d'obtenir un nombre pair, comme impair de niveaux [16].
- Présence de redondances de commutation dans les séquences de fonctionnement implique des états pouvant être utilisés pour le maintien de l'équilibre de la tension aux bornes des condensateurs [15] [14].

I.1.2.3 Inconvénients de la topologie FC

- Nécessité d'un équilibrage des tensions flottantes afin de répartir uniformément la tension du bus DC entre les cellules de commutation [15].
- Nécessité d'un contrôle plus complexe pour maintenir les tensions aux bornes des condensateurs flottants à leurs niveaux de fonctionnement cible [14].
- Nécessité d'un nombre élevé de condensateurs de stockage à haute tension (beaucoup plus nombreux que d'autres topologies), ce qui conduit à la diminution de la fiabilité et à l'augmentation du coût [9].

I.1.3 La topologie en pont H cascadié

Parmi les convertisseurs utilisés dans l'industrie sont les onduleurs multi-niveaux en cascade ou en série. La dénomination complète de cette topologie, introduite par Marchesoni, [17] devrait être onduleurs multi-niveaux symétriques à cellules en série. Ces onduleurs sont également connus sous l'appellation onduleurs multi-niveaux cascadiés (cascade multilevel inverter).

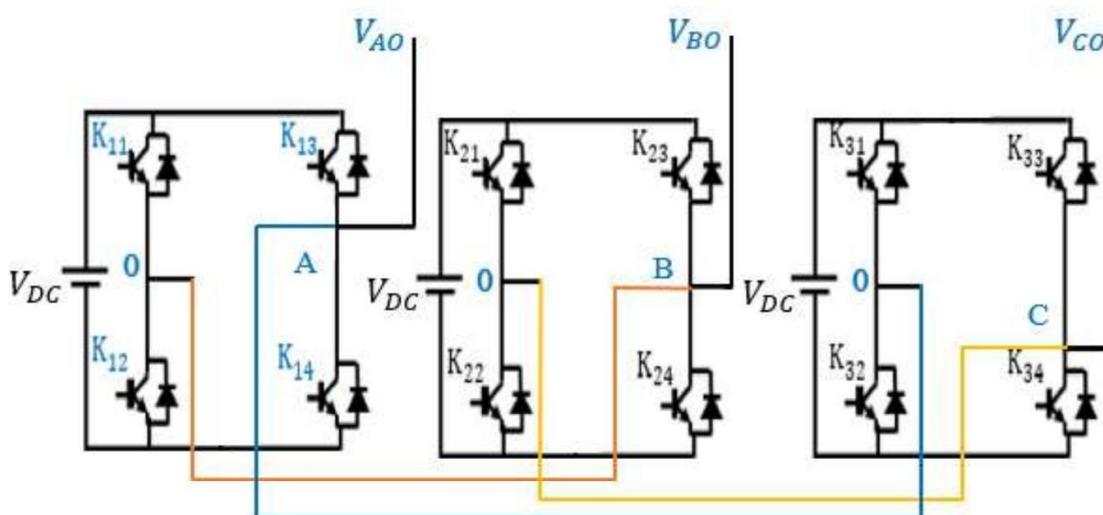


Figure I- 6 : Structure de l'onduleur H-bridge à 3 niveaux triphasé

I.1.3.1 Principe de fonctionnement d'une cellule

Pour un onduleur de type cascadié à trois niveaux, trois séquences de fonctionnement sont distinguées. Elles sont présentées dans le tableau suivant :

Table I- 3 : États de fonctionnement possibles de l'onduleur H-bridge à 3 niveaux triphasé [18].

Séquences	<u>T11</u>	<u>T'11</u>	<u>T12</u>	<u>T'12</u>	<u>Tension de sortie</u>
Génération du niveau maximum	1	0	0	1	Vdc
Génération du niveau intermédiaire		1	0	1	0
Génération du niveau minimum	0	0	1	1	- Vdc

I.1.3.2 Avantages de la topologie CHB

- Possibilité d'alimenter une charge en haute ou moyenne tension à partir d'une ou plusieurs alimentations basse tension [1].
- La connexion en série des sorties de l'onduleur en pont H permet de synthétiser une onde de tension à partir de la sommation des tensions de sortie [1].
- Possibilité de délivrer deux fois plus de puissance puisqu'il s'agit de $-V_{DC}$ et V_{DC} comme valeurs extrêmes de tension de sortie et non pas $-V_{DC}/2$ et $V_{DC}/2$ [19].

I.1.3.3 Inconvénients de la topologie CHB

- Nécessité d'un grand nombre de tension continues DC isolées pour chaque pont, ce qui limite l'expansion industrielle de cette structure [20] [21] car en pratique, ces sources continues isolées sont réalisées à l'aide d'un transformateur multi-secondaires, nécessitant un entretien régulier en plus d'être coûteux et volumineux [1].

- Augmentation considérable de la taille du convertisseur avec la progression du nombre de niveaux de la tension de sortie [22]
- Nécessité d'un contrôle supplémentaire et une commutation accrue pour maintenir les tensions des condensateurs constantes [21]

:

I.1.4 Onduleur clampé activement par le neutre (Active Neutral Point Clamped ANPC) :

La répartition inéquitable des pertes entre les interrupteurs de puissance de l'onduleur multi niveaux NPC, représente l'un de ses inconvénients majeurs. Pour remédier à ce problème, les chercheurs ont prévu de remplacer les diodes de clamp par des interrupteurs bidirectionnel en courant (IGBT et diode en antiparallèle) (fig6-(a)) [23]c'est ainsi, que la topologie clampée activement par le neutre est apparue en 2005, par bernet et al [23].

Le remplacement effectué au niveau de la topologie NPC, permet d'avoir plusieurs modes de commande, ce qui donne la possibilité de choisir le type de modulation le plus adéquat pour équilibrer les pertes par commutation[24].

I.1.5 Onduleur NPC raccordé au réseau Z-source :

En 2007, Mrs Loh, Feng, Blaabjerg et Soon ont proposé un onduleur NPC raccordé à une source de type « Z » comme le montre la (fig6- (b)), pour que l'onduleur à trois niveaux garantisse la fonction « Buck-boost » permettant de ce fait, de varier considérablement la tension du bus continu[25]. Le réseau Z-source, peut fonctionner en mode « Buck-boost » et également en cas de court-circuit ou de circuit ouvert permettant selon le besoin, la manipulation de la tension par le convertisseur multiniveau [26].

I.1.6 Onduleur multiniveau compact à condensateur commuté interconnecté (C3-SCMLI) Topologie avec un nombre de commutateurs réduit :

Les onduleurs multiniveaux sont devenus si importants dans les applications industrielles, les onduleurs multiniveaux ont des topologies différentes, mais ces topologies présentent de nombreux inconvénients, le plus important la contrainte de la haute tension sur les commutateurs, qui est égale à la tension de sortie maximale. C'est pourquoi une étude sur une

topologie C2SC (fig6- (d)) et sa topologie dérivé C3SC (fig6- (c)) dans le but minimiser cette contrainte sur les interrupteurs [27].

Avec l'évolution de la technologie les SC-MLI sont devenus bien connus avec leur capacité de tension de suralimentation et l'utilisation de cellules à condensateur (SCC) pour éviter les capteurs cela nous permettra de réduire le nombre de des commutateurs conducteurs. La cellule CCS proposée utilise quatre commutateurs et deux diodes pour interconnecter la source d'entrée DC et les condensateurs flottants (FC). Un onduleur neuf- niveau est dérivé de la cellule C2SC proposée ne nécessitant que dix commutateurs et deux FC[27].

Les onduleurs basés sur les cellules C3SC proposés sont auto-équilibrés et ont un gain de tension de deux. Ces topologies sont plus efficaces en raison de la capacité d'équilibrage des condensateurs Fc [27].

I.1.7 Un onduleur à 13 niveaux à condensateur commuté avec un nombre réduit de commutateurs):

Les onduleurs multiniveaux sont largement utilisés dans les industries pour la conversion de puissance des sources d'énergie. Ils ont trois topologies principales cependant lorsque le niveau de sortie augmente, ils souffrent de l'augmentation du nombre de commutateurs et du nombre de sources DC ou de la diminution du niveau de suralimentation [28].

Dans Ces dernières années, l'onduleur multiniveau à condensateur commuté (SC) (SCMLI) est apparu avec une possibilité d'augmenter le nombre de niveaux de sortie et d'augmenter les tensions d'entrée sans utiliser aucun transformateur. Le condensateur commuté a été utilisé de différentes manières ces dernières années comme :

La topologie T type basée sur (SC) avec l'avantage de maintenir l'équilibre de tension de condensateurs sans circuits d'équilibrage auxiliaires, mais la nécessité d'utiliser 2 sources DC[30] .

SC onduleur à neuf niveaux avec une seule source d'alimentation DC [31]qui peut réaliser l'équilibrage de tension des condensateurs sans circuits auxiliaires mais avec une basse élévation de gain de tension égale à 2 [29].

Cela nous amène à un nouveau type d'onduleurs qui apporte une solution à ces inconvénients appelés Onduleur à condensateur commuté à 13 niveaux (13L) (13LSCI) (fig6-

(e)) avec un certain nombre d'avantages tels que: diminution de nombre de commutateurs et du coût (14 commutateurs), un gain de tension élevé de 6, l'auto-équilibrage de la tension des condensateurs et la faible tension de stress pour les commutateurs qui est inférieure à la moitié de la tension de charge maximale, tout cela en utilisant une seule source DC[28].

Des simulations valide la faisabilité de cette topologie avec des attentes élevées pour l'utilisation aux systèmes de haute tension avec des sources d'entrée à faible courant [28].

I.1.8 La topologie à plusieurs niveaux Avec nombre réduit (4S-15L) de commutateurs) :

Deux nouvelles topologies pour la génération de tension de sortie en escalier ont été proposées avec un nombre inférieur de commutateurs requis. La première topologie 3S-15L (fig6- (f)) nécessite trois sources de tension continue et dix commutateurs pour synthétiser 15 niveaux à travers la charge. L'extension de la première topologie a été proposée comme seconde topologie 4S-25L, qui se compose de quatre sources de tension continue et de 12 commutateurs pour atteindre 25 niveaux en sortie. Les deux topologies, en plus d'avoir un nombre inférieur de commutateurs, présentent des avantages en termes de réduction des contraintes de tension sur les commutateurs. [32]

I.2 Onduleurs multiniveaux à structures T-NPC :

La topologie T-NPC, nommée également par T-Type, est l'une des topologies avancées de la structure NPC, elle a été proposée pour la première fois en 2010, par Schweizer [33]. La topologie T-NPC est plus pratique pour les applications basse tension et plus efficace que le NPC onduleur [34]. Le T-NPC utilise un commutateur bidirectionnel actif vers le Point milieu de la tension de liaison DC et s'entend avec deux diodes par bras de pont. La topologie T-NPC combine les aspects positifs du convertisseur à 2 niveaux tels que les faibles perte de conduction, nombre réduit des commutateur et un simple principe de fonctionnement avec les avantages du convertisseur 3 niveaux tel que le rendement élevé et la qualité de la tension [35].

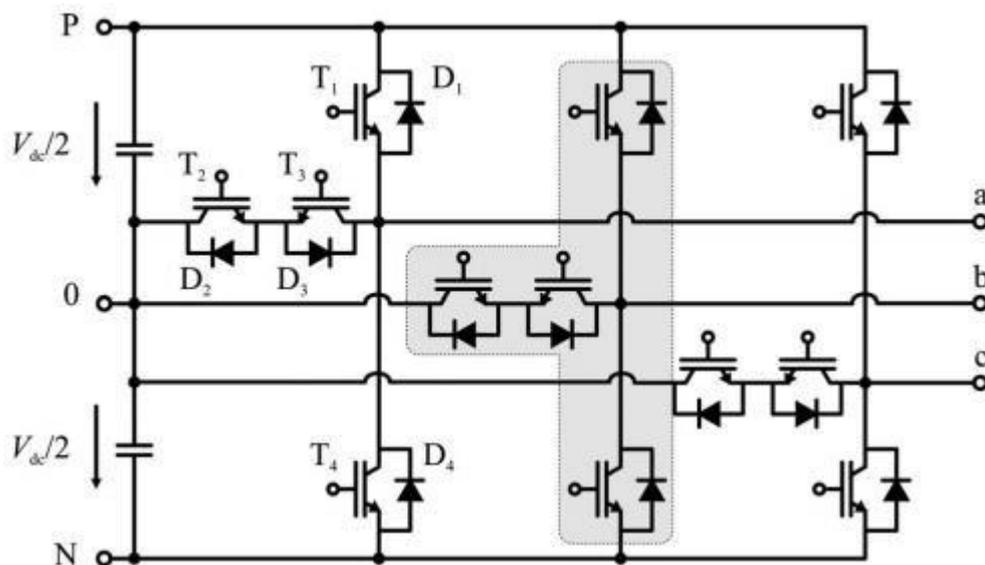


Figure 0-1 : Structures des onduleurs T-NPC

Des travaux ont été menés par E. Gurpinar and A. Castellazzi en 2015 dans le but d'étudier les performances des onduleurs monophasé T-NPC (performance de commutation, performances d'efficacité de l'onduleur, volume du filtre de sortie et effet de temps mort) en utilisant les technologies suivantes : Si IGBT, SiC MOSFET et GaN HEMT à 600V. Cette étude nous montre que GaN a les meilleures performances de commutation parmi les trois technologies elle permettent à avoir un rendement élevé pour les applications à haute fréquence (L'onduleur basé sur GaN fonctionne à 160 kHz) [36].

Dans la même année Xiong Li, Bilal Akin, and Kaushik Rajashekara, propose une nouvelle méthode de compensation vectorielle des temps morts pour les convertisseurs de T-type à trois niveaux pour éliminer la distorsion du temps mort dans chaque phase. La méthode de compensation des temps morts basé sur le vecteur proposé peut être appliquée aux convertisseurs multi-niveaux avec n'importe quel nombre de niveaux de tension utilisant n'importe quel type de modulation. Avec la stratégie de compensation proposée, la perte d'impulsion peut être résolu en douceur [37].

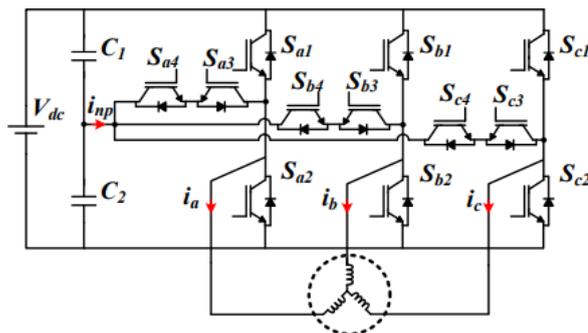


Figure 0-2 : diagramme vectoriel spatial d'un convertisseur de type T à trois niveaux

Une autre étude se fait en 2016 par Hyeon-Sik Kim et al sur la non-linéarité d'un onduleur de type T à trois niveaux. Les méthodes de compensation basées sur la PWM de l'onduleur de T-type pour atténuer sa non-linéarité, ces méthodes proposées pourraient être facilement mis en œuvre en ajoutant des tensions de décalage appropriées à la tension références de l'onduleur en PWM. De plus, la méthode d'équilibrage de tension neutre d'un onduleur de type T à trois niveaux a été proposé en conjonction avec les méthodes PWM proposées. Grâce à des tests expérimentaux approfondis. Les composantes 5e et 7e harmoniques du courant sont nettement réduit avec les harmoniques paires[38].

Une topologie d'onduleur quasi-Z (qZSI) triphasé à plusieurs niveaux fonctionnant en mode normal et en défaut est donnée par V. Fernão Pires et al en 2016, Cette structure est composée de deux réseaux de sources symétriques quasi-Z et un onduleur T-NPC triphasé. la structure proposée est également caractérisée par sa capacité de tolérance aux pannes des semi-conducteurs[40]

Ces dernières années Les onduleurs multiniveaux à base de condensateurs commutés ont fait l'objet d'une attention croissante en raison de leur (voltage-boosting capability) et des propriétés de (selfbalancing) des condensateurs. Cependant, les topologies existantes, qui comprennent des cellules à condensateurs commutés en amont et un pont en H en aval, entraînent une durée de décharge plus longue pour certains de leurs condensateurs commutés. En outre, l'adoption d'un pont en H arrière introduit une tension de mode commun et nécessite plusieurs sources de courant continu pour l'extension du niveau de tension. Pour résoudre ces problèmes, Lee, S. S., & Lee, K.-B. propose une nouvelle topologie comprenant un onduleur de type T et n cellules à condensateurs commutées en cascade. Elle ne nécessite qu'une seule source de courant continu et parvient à atténuer la tension de mode commun en connectant le neutre de la sortie alternative au point médian du lien continu. Tous les condensateurs

commutés dans la topologie proposée sont assurés d'être chargés pendant au moins la moitié de la période fondamentale pour atténuer les ondulations de tension et les pointes de courant du condensateur

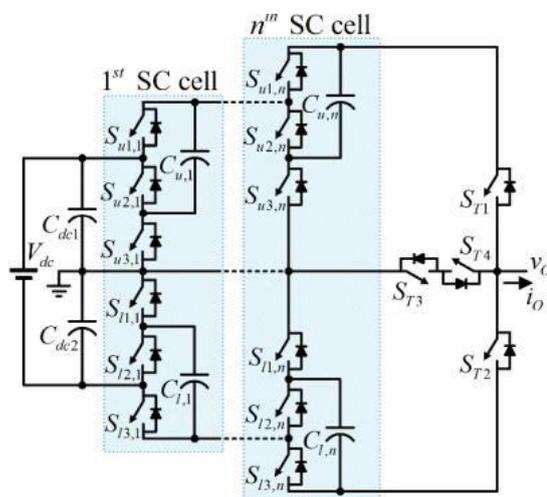


Figure I- 7 : Onduleur T-NPC proposé à base de condensateurs commutés (SC-MTI)

Les cellules SC sont insérées entre la source DC et un onduleur de type T pour augmenter le gain et les niveaux de tension génération. Les condensateurs supérieur et inférieur de chaque cellule SC sont responsables de la génération de niveaux de tension positifs et négatifs, respectivement. Les avantages supplémentaires du SC-MTI proposé comprennent l'exigence d'une seule source continue, l'élimination de la tension en mode commun et des durées de charge prolongées pour les SC[41].

I.2.1 Avantages de la topologie T-NPC :

- Réduire les pertes de conduction par rapport à l'onduleur NPC [42].
- Tolérance de panne vu que la topologie T-NPC a la possibilité de fonctionner en mode onduleur à 2 niveaux, lorsqu'un de ses interrupteurs du point milieu est endommagé [33]
- Augmentation du rendement énergétique de l'onduleur T-NPC ainsi que la durée de vie des composants semi-conducteurs en raison de la réduction des pertes par conduction au niveau de ce convertisseur [33].

I.2.2 Inconvénient de la topologie T-NPC :

- Nécessité de dimensionner les deux interrupteurs verticaux ainsi que ceux du point milieu vu qu'ils ne subissent pas les mêmes contraintes de tension [33].
- Nécessité des interrupteurs supportant la totalité du bus continu [33]
- Si les tensions des condensateurs ne sont pas équilibrées à l'aide des techniques d'équilibrage, la tension de sortie de l'onduleur sera déformée [43].
- Risque de court-circuiter la source $V_{DC} / 2$ lors des états haut ou bas en cas d'un temps mort perturbé au niveau des interrupteurs[44].

I.3 Comparaison entre les topologies NPC, T-NPC et ANPC :

La topologie NPC malgré ces avantages elle souffre d'une distribution inégale des pertes entre les commutateurs à cause de sa stratégie de commutation fixe[45].

Par rapport à cette dernière, la topologie T-NPC est basé sur le remplacement des diodes de clamp par des interrupteurs bidirectionnel en courant (IGBT et diode en antiparallèle) Pour remédier au problème de la répartition inéquitable des pertes entre les interrupteurs de puissance de l'onduleur multi niveaux NPC[23].

La figure I-12 présente deux approches, la première consiste à observer le comportement des deux topologies, NPC et T-NPC en fonction du rendement en termes de la puissance pour une fréquence de commutation de 16[kHz] et la seconde pour une fréquence de commutation de 30 [kHz].

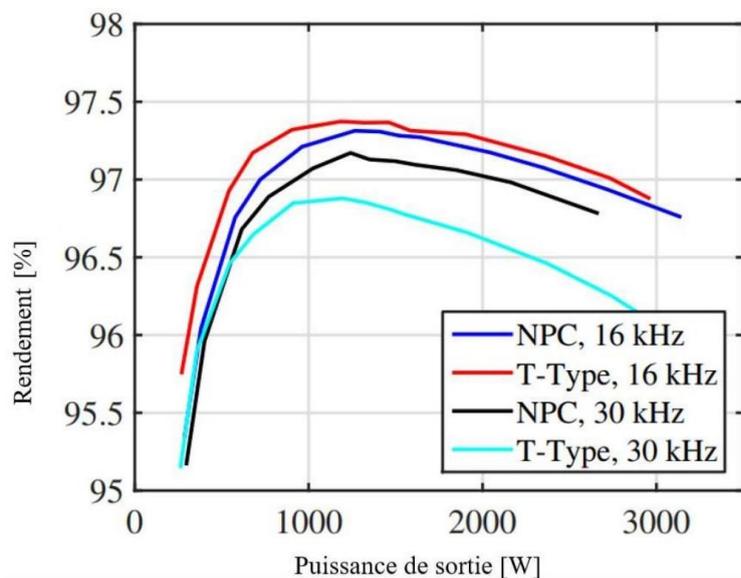


Figure I- 8 : Rendement mesuré du NPC et du T-NPC pour différentes fréquences des commutation et puissances de sortie [46]

La fréquence de commutation représente un paramètre important tel que quand elle augmente les pertes de commutation deviennent dominantes pour le convertisseur T-NPC, ce qui diminue son rendement global.

Les résultats nous montrent aussi que pour la même fréquence de commutation le convertisseur T-NPC présente un meilleur rendement par rapport au convertisseur NPC [46].

Table I- 4 : Comparaison entre les structures NPC, T-NPC et ANPC

Convertisseurs	T-NPC 3N	NPC 3N
Nombre d'interrupteurs	12	12
Nombre de diodes	0	6
Nombre d'alimentations DC isolées du conducteur	7	10
Tension maximale de l'interrupteur	Vdc	Vdc/2
Tension maximale de la diode	0	Vdc/2
Pertes de conduction	Considérablement réduites	Élevées
Fréquence de commutation	Moins élevée	Plus élevée
La capacité de tolérance de pannes	Élevée	Moyenne

I.4 Applications des onduleurs multiniveaux

Les convertisseurs multiniveaux sont une technologie habilitante pour les procédés industriels alimentés par des systèmes d'entraînement électrique. Ils sont potentiellement utiles pour un large éventail d'applications : transport (traction de train, propulsion de navire et automobile applications), conversion d'énergie, fabrication, exploitation minière et pétrochimie pour n'en nommer que quelques-uns. [1]

Il existe 3 principales applications des onduleurs multiniveaux aux industries [22]

I.4.1 Amélioration de la qualité de l'énergie

Les réseaux électriques sont soumis à plusieurs types de perturbations qui dégradent la qualité de l'alimentation (PQ) des systèmes d'alimentation. En fonction de leur magnitude, les consommateurs critiques peuvent être considérablement affectés. La dégradation du PQ peut être caractérisée comme des transitoires de tension, des fléchissements, des gonflements, des interruptions, des distorsions de tension, les scintillements et les déséquilibres de tension, entre autres.[22]

Les dispositifs de puissance personnalisés (DPP) ont été conçus pour améliorer le PQ du système électrique. Il existe différentes modes de connexion des systèmes de compensation au réseau, qui permettent de traiter plus efficacement chaque perturbation particulière de la qualité du réseau. Il existe trois topologies principales de connexion. La figure 1.3 montre les trois types de compensateurs agissant au point de couplage commun (PCC) [22] .

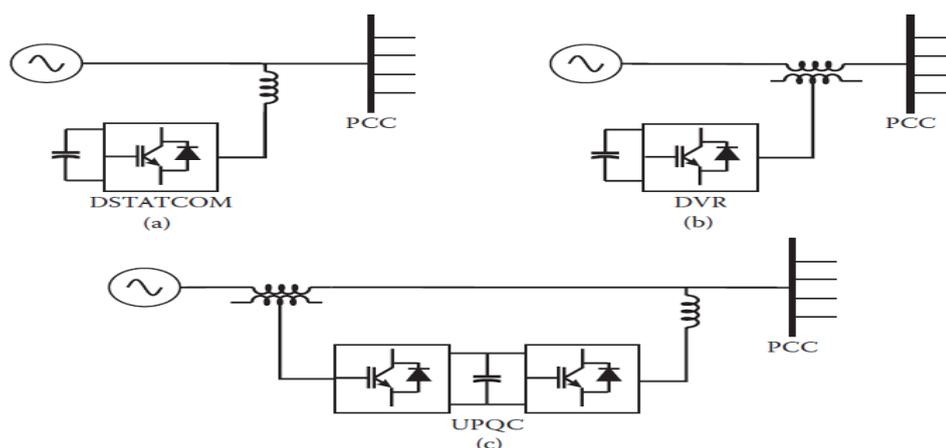


Figure I- 9 : Topologies de connexion pour les dispositifs de puissance personnalisés : (a) DSTATCOM, (b) DVR, et (c) UPQC.

I.4.2 Interconnexion des énergies renouvelables

Un autre domaine de recherche croissante et d'implication des convertisseurs multiniveaux correspond aux systèmes d'énergies renouvelables, principalement motivés pour résoudre les problèmes d'interconnexion entre des sources d'énergie alternatives comme solaire, éolien ou hydrogène et les réseaux électriques. Une interface électronique de puissance polyvalente entre la source et le réseau nous permet d'optimiser l'extraction d'énergie avec un contrôle simultané de plusieurs variables du système, offrant des normes de qualité de puissance élevées et même des services auxiliaires. Cela impose des défis pour le contrôle des paramètres du réseau, et

dans ce sens, le variateur de vitesse apparaît comme un composant clé des systèmes de contrôle, en particulier dans la gamme MV[22].

I.4.3 Variateurs de vitesse

Les entraînements à courant alternatif de forte puissance sont un sujet majeur dans l'environnement industriel, et les variateurs de vitesse font également leur apparition. L'entraînement des pompes pour le transport par pipeline dans l'industrie pétrolière, le traitement de l'eau et des eaux usées, les soufflantes de grande puissance dans l'industrie du ciment, les machines minières et les équipements de traction pour le transport ferroviaire et naval nécessitent des niveaux élevés de puissance. D'autre part, la nécessité d'améliorer la polyvalence et les performances de la conversion de puissance conduit au développement de convertisseurs électroniques de puissance avec des stratégies de contrôle intelligentes. [22]

La conception d'un convertisseur électronique de puissance pour les applications d'entraînement de moteur doit prendre en compte plusieurs questions concernant les exigences de contrôle et la qualité de l'alimentation des deux côtés du convertisseur (côté ligne et côté charge). Et, simultanément, la mise en œuvre et la fiabilité. Lorsque la puissance de conversion atteint plusieurs mégawatts, le fonctionnement à moyenne tension jusqu'à 10 kV devient un choix avantageux. [22]

I.5 État de l'art des stratégies de modulation :

En collaboration avec le développement des topologies de l'onduleur à plusieurs niveaux sont apparues les défis d'étendre les méthodes de modulation au cas multi niveaux. D'un côté, la complexité supplémentaire inhérente d'avoir plus d'appareils électroniques de puissance à contrôler, et d'autre part la possibilité pour profiter des degrés de liberté supplémentaires fournis par les états de commutation supplémentaires générés par ces topologies. En conséquence, un grand nombre de modulations différentes, des algorithmes ont été adaptés ou développés en fonction des applications et la topologie du convertisseur, chacun ayant des avantages et des inconvénients uniques [1]

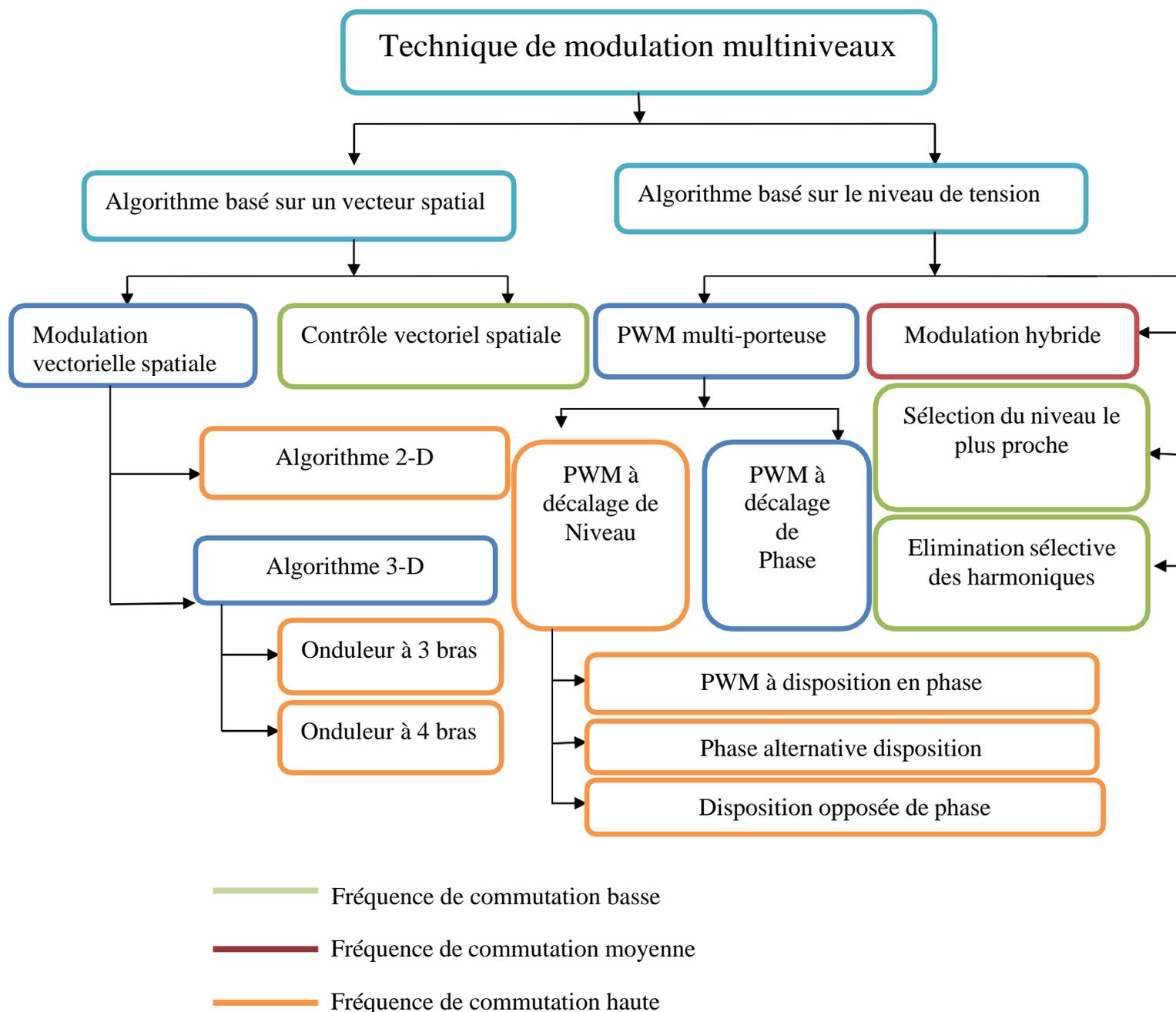


Figure I- 10 : classement des méthodes de modulation courantes pour les onduleurs multiniveaux

Les algorithmes de modulation sont ici classés en fonction de la fréquence de découpage moyenne avec qu'ils opèrent, c'est-à-dire haut ou bas. Pour une puissance élevée les fréquences de commutation élevées sont considérées comme au-dessus de 1 kHz.

I.6 Problème d'équilibrage de la tension des deux condensateurs des bus continu dans l'onduleur trois niveaux T-NPC

I.6.1 Topologie d'un onduleur à trois niveaux de type T.

Le circuit principal de l'onduleur à trois niveaux de type T recherché est illustré dans la figure 1.

Chaque branche de pont simple est composée de quatre dispositifs de commutation de puissance (IGBT).

Par rapport à la topologie traditionnelle NPC à trois niveaux, la topologie à trois niveaux de type T change la position de deux commutateurs de chaque branche et supprime six diodes., ce qui réduit la taille et le coût du système [35].

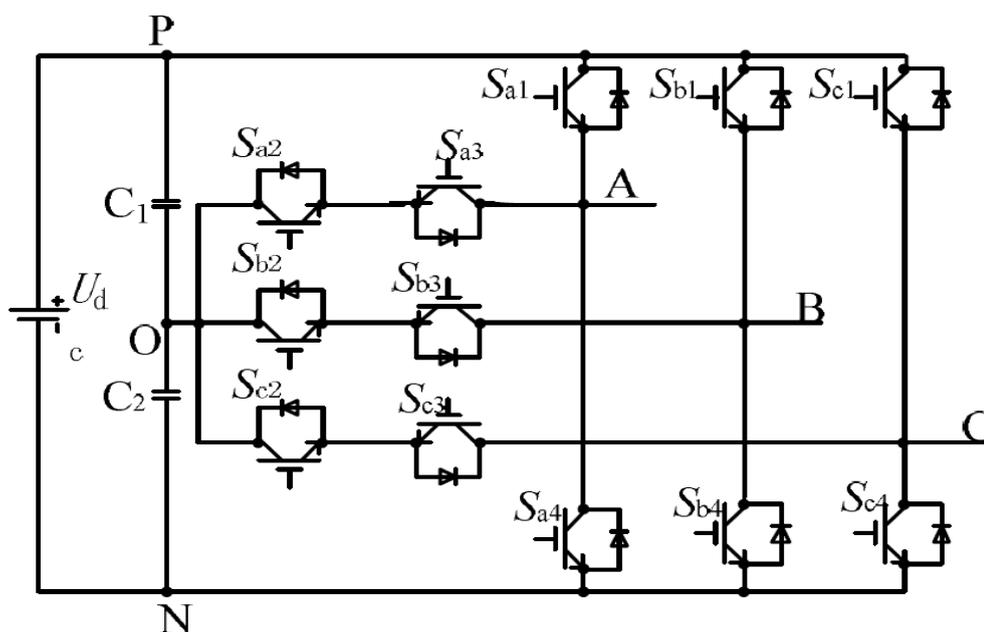


Figure I-3 : Topologie d'un onduleur à trois niveaux de type T.

I.6.2 Problème d'équilibrage du point milieu du bus continu

Le problème d'équilibrage des tensions du bus continu est probable en pratique étant donné qu'il peut être causé soit, lors d'un déséquilibre des capacités ou des résistances de décharge [70] soit par plusieurs facteurs à savoir [5]:

- Déséquilibre des condensateurs à courant continu en raison des tolérances de fabrication ;
- Incohérence des caractéristiques des appareils de commutation ;
- Déséquilibre du fonctionnement du système triphasé ;
- Connexion des vecteurs moyens et petits au point neutre [5],[26]. Pour pallier à ce problème pertinent, différentes solutions ont été proposées dans [25].

Ont étudié ce dernier point :

L'onduleur T-NPC possède du vecteur zéro, petit, moyen et grand basés sur la magnitude. Il y a au total 27 états de commutation dont six grands vecteurs, six moyens vecteurs, six petits vecteurs et un vecteur zéro comme le montre le Tableau I- 5. Les deux vecteurs zéro et petit ont un état de commutation redondant.

Table I- 6 :Relation entre l'état de commutation et le mode commun

vecteur	Magnitude	Etats de commutation		
Zero vector	0	[PPP]	[OOO]	[NNN]
Petit vecteur	$\frac{1}{3}V_{dc}$	P-type		N-type
		[POO]	[ONN]	
		[PPO]	[OON]	
		[OPO]	[NON]	
		[OPP]	[NOO]	
		[POP]	[ONO]	
		[OOP]	[NNO]	
moyen vecteur	$\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$	[PON]		
		[OPN]		
		[NPO]		
		[NOP]		
		[ONP]		
		[PNO]		
Large vector	$\frac{2}{3}V_{dc}$	[PNN]		
		[PPN]		
		[NPN]		
		[NPP]		
		[NNP]		
		[PNP]		

La relation entre les états de commutation et les vecteurs de tension vecteurs de tension spatiale est présentée à la figure 4.

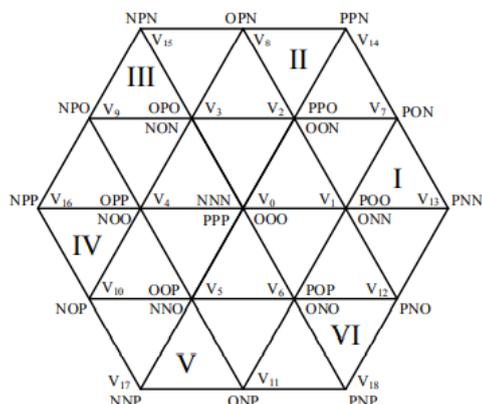


Figure I-4 : vecteur espace de l'onduleur 3N T-NPC

Le grand vecteur de tension [PNN] n'affecte pas la tension du point milieu O car ce dernier n'est pas connecté à droite comme le montre la Fig.6(a). Bien que le vecteur de tension nulle [OOO] soit connecté au point milieu O, il n'affecte pas la tension dans ce point parce que la somme des courants d'entrées triphasés est égale à la somme des courants de sortie triphasés et égale à zéro Comme il est illustré à la Fig. 6(b).

Si le 3LT2 I est exploité avec le petit vecteur [POO] illustré à la figure 6(c), le courant neutre circule du point positif du lien continu P au point neutre O, ce qui entraîne une diminution de la tension du condensateur supérieur.

De la même manière, les autres petits vecteurs de type P sont indiqués dans le tableau I- 6 diminuent la tension du condensateur supérieur. Inversement, l'état de commutation [ONN] des petits vecteurs diminue la tension du condensateur inférieur puisque le courant neutre circule du point neutre O vers le courant continu négatif. Comme le montre la Fig. 6(d).

L'état de commutation [PON] des vectrices moyennes tensions est illustré à la Fig. 6(e). Il est difficile de contrôler la tension NP car le sens du courant neutre est incertain. [26].

Table I- 7 : relation entre les vecteurs de commutation et la tension mode commun [26].

Vsmall (N-type)	V_{CM}	Vmedium	V_{CM}
$V_1(ONN)$	$-2V_{dc}/6$	$V_7(PON)$	0
$V_2(OON)$	$-V_{dc}/6$	$V_8(OPN)$	0
$V_3(NON)$	$-2V_{dc}/6$	$V_9(NPO)$	0
$V_4(NOO)$	$-V_{dc}/6$	$V_{10}(NOP)$	0
$V_5(NNO)$	$-2V_{dc}/6$	$V_{11}(NOP)$	0
$V_6(ONO)$	$-V_{dc}/6$	$V_{12}(PON)$	0
Vsmall (p-type)		Vlarge	V_{CM}
$V_1(POO)$	$V_{dc}/6$	$V_{13}(PNN)$	$-V_{dc}/6$
$V_2(PPO)$	$2V_{dc}/6$	$V_{14}(PPN)$	$V_{dc}/6$
$V_3(OPO)$	$V_{dc}/6$	$V_{15}(NPN)$	$-V_{dc}/6$
$V_4(OPP)$	$2V_{dc}/6$	$V_{16}(NPP)$	$V_{dc}/6$
$V_5(OOP)$	$V_{dc}/6$	$V_{17}(NNP)$	$-V_{dc}/6$
$V_6(POP)$	$2V_{dc}/6$	$V_{18}(PNP)$	$V_{dc}/6$
V_{zero}	V_{cM}		
$V_0(OOO)$	0		
$V_0(PPP)$	$3V_{dc}/6$		
$V_0(NNN)$	$-3V_{dc}/6$		

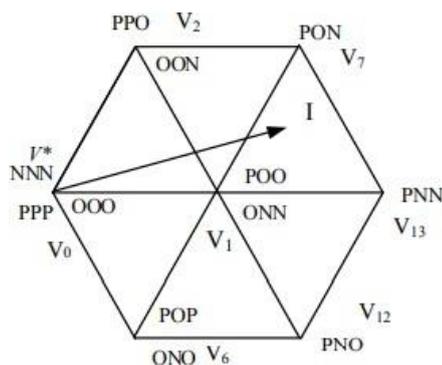


Figure I-5 : espace de vecteur diagramme de la section 1 d'onduleur T-NPC[26].

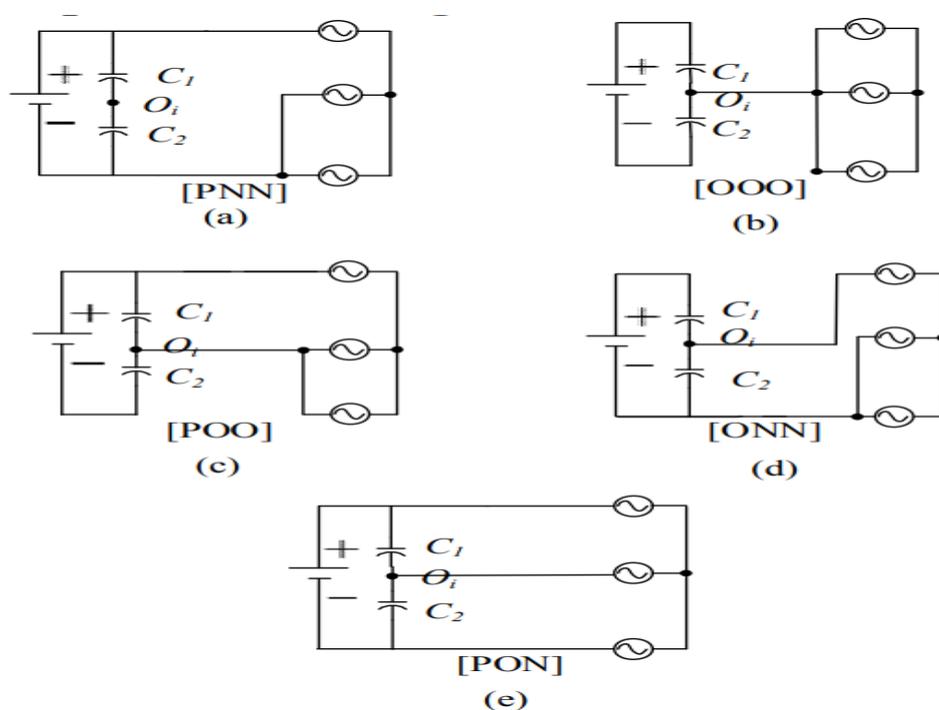


Figure I-6 : effet de la commutation sur le point milieu dans le 3N T-NPC. a)Gande voltage vecteur [PNN],(b) zero voltage vecteur [OOO],(c) petit voltage vecteur [POO], (d) petit voltage vector [ONN], (e)moyen voltage vector [PON].[26]

I.7 Conclusion :

Le premier chapitre traite l'état de l'art sur les onduleurs multi niveaux ainsi que sur les différentes stratégies de modulation.

Premièrement, on a traité les différentes topologies qui ont été proposées pour les onduleurs multiniveaux et leur principe de fonctionnement, à savoir : La topologie NPC, la

topologie FC et la topologie H-Bridge, celles-ci représentent les topologies de base et à partir de ces topologies on a créé de nouvelles topologies appelés topologies dérivées comme la topologie ANPC, NPC raccordé au réseau Z-source et la topologie hybride.

La topologie T-NPC est l'axe de notre recherche. Elle représente une topologie développée de la structure de base NPC, elle permet, grâce à sa structure, d'éliminer les diodes de clamp, de diminuer les pertes par commutation et par conséquent, de réduire la taille du convertisseur, elle permet également l'obtention d'une bonne qualité de l'onde de la tension de sortie[26].

Références

- [1] J. Rodriguez *et al.*, « Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications », *Proc. IEEE*, vol. 97, n° 11, p. 1786-1817, 2009.
- [2] J. Rodriguez, J.-S. Lai, et F. Z. Peng, « Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, n° 4, p. 724-738, 2002.
- [3] E. Cengelci, S. Sulistijo, B. Woo, P. Enjeti, R. Teoderescu, et F. Blaabjerg, « A new medium-voltage PWM inverter topology for adjustable-speed drives », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, n° 3, p. 628-637, 1999.
- [4] B. K. Bose, « Power electronics and AC drives », *Englewood Cliffs*, 1986.
- [5] A. Nabae, I. Takahashi, et H. Akagi, « A new neutral-point-clamped PWM inverter », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, n° 5, p. 518-523, 1981.
- [6] J.-S. Lai et F. Z. Peng, « Multilevel converters-a new breed of power converters », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, n° 3, p. 509-517, 1996.
- [7] M. Baldé, « Etude d'un compensateur statique pour éoliennes à vitesse fixe à base de génératrice asynchrone à cage », 2010.
- [8] D. P. Duggapu et S. Nulakajodu, « Comparison between diode clamped and H-bridge multilevel inverter (5 to 15 odd levels) », *Int J Electr. Electron. Comm Eng.*, vol. 1, n° 4, 2012.
- [9] D. Prajapati, V. Ravindran, J. Sutaria, et P. Patel, « A comparative study of three phase 2-level VSI with 3-level and 5-level diode clamped multilevel inverter », *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 4, n° 4, p. 708-713, 2014.
- [10] C. Benzazah, M. A. Lafkih, et L. Lazrak, « Etude comparative entre deux topologies d'onduleurs triphasés, classique à 2-niveaux et NPC à 3-niveaux avec deux différentes méthodes de commande MLI-ST et SWM [Comparative study between two topologies three-phase inverters, conventional 2-level and NPC 3-level with two methods different of control, SPWM and SWM] », *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, vol. 9, n° 2, p. 841, 2014.
- [11] J. Song Manguelle, « Convertisseurs multiniveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi-secondaires basse-fréquence », EPFL, 2004.
- [12] Y. Cheng, C. Qian, M. L. Crow, S. Pekarek, et S. Atcitty, « A comparison of diode-clamped and cascaded multilevel converters for a STATCOM with energy storage », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, n° 5, p. 1512-1521, 2006.

- [13] Q.-X. Guan *et al.*, « An extremely high efficient three-level active neutral-point-clamped converter comprising SiC and Si hybrid power stages », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, n° 10, p. 8341-8352, 2017.
- [14] D. G. Holmes et T. A. Lipo, *Pulse width modulation for power converters: principles and practice*, vol. 18. John Wiley & Sons, 2003.
- [15] X. Yuang, H. Stemmler, et I. Barbi, « Self-balancing of the clamping-capacitor-voltages in the multilevel capacitor-clamping-inverter under sub-harmonic PWM modulation », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, n° 2, p. 256-263, 2001.
- [16] M. Aimé, « Evaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques: Application aux nouvelles structures multicellulaires », 2003.
- [17] R. N. Andriamalala, « Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I », p. 239.
- [18] M. Benguanem, « Etude et commande numérique d'un STATCOM à base d'onduleurs multi niveaux », 2007.
- [19] J. Ebrahimi, E. Babaei, et G. B. Gharehpetian, « A new multilevel converter topology with reduced number of power electronic components », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, n° 2, p. 655-667, 2011.
- [20] F. Z. Peng, J.-S. Lai, J. W. McKeever, et J. VanCoevering, « A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, n° 5, p. 1130-1138, 1996.
- [21] A. Nami, F. Zare, et F. Blaabjerg, « A Hybrid Cascade Converter Topology with Series-Connected Symmetrical and Asymmetrical Diode-Clamped H-Bridge Cells| IEEE Transactions on Power Electronics », 2011.
- [22] S. A. Gonzalez, S. A. Verne, et M. I. Valla, *Multilevel converters for industrial applications*. CRC Press, 2013.
- [23] W. Jinxin, C. Mu, L. Ning, et Z. Dan, « Comparative Research on Common-mode Voltage of T-type Three-level Converter Caused by Modulation Strategy », in *2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, déc. 2018, p. 432-435, doi: 10.1109/ITOEC.2018.8740510.
- [24] S. Busquets-Monge, J. Bordonau, D. Boroyevich, et S. Somavilla, « The nearest three virtual space vector PWM - a modulation for the comprehensive neutral-point balancing in the three-level NPC inverter », *IEEE Power Electron. Lett.*, vol. 2, no 1, p. 11-15, mars 2004, doi: 10.1109/LPEL.2004.828445.

- [25] N. Celanovic et D. Boroyevich, « A comprehensive study of neutral-point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped voltage source PWM inverters », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no 2, p. 242-249, mars 2000, doi: 10.1109/63.838096.
- [26] Xing, X., Chen, A., Zhang, Z., Chen, J., & Zhang, C. (2016). *Model predictive control method to reduce common-mode voltage and balance the neutral-point voltage in three-level T-type inverter*. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). doi:10.1109/apec.2016.7468363
- [27] Xiaoming Yuang, H. Stemmler, et I. Barbi, « Self-balancing of the clamping-capacitor-voltages in the multilevel capacitor-clamping-inverter under sub-harmonic PWM modulation », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, no 2, p. 256-263, mars 2001, doi: 10.1109/63.911150.
- [28] J. Ebrahimi, E. Babaei, et G. B. Gharehpetian, « A new multilevel converter topology with reduced number of power electronic components », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no 2, p. 655-667, 2011.
- [29] Fang Zheng Peng, Jih-Sheng Lai, J. W. McKeever, et J. VanCoevering, « A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static VAr generation », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no 5, p. 1130-1138, oct. 1996, doi: 10.1109/28.536875.
- [30] A. Nami, F. Zare, A. Ghosh, et F. Blaabjerg, « A Hybrid Cascade Converter Topology With Series Connected Symmetrical and Asymmetrical Diode-Clamped H-Bridge Cells », *Power Electron. IEEE Trans. On*, vol. 26, p. 51-65, févr. 2011, doi: 10.1109/TPEL.2009.2031115.
- [31] T. Bruckner, S. Bernet, et H. Guldner, « The active NPC converter and its loss-balancing control », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no 3, p. 855-868, juin 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.847586.
- [32] T. Bruckner et S. Bernet, « The active NPC converter for medium-voltage applications », 2005, vol. 1, p. 84-91.
- [33] C. M. Wu, W. H. Lau, et H. Chung, « A five-level neutral-point-clamped H-bridge PWM inverter with superior harmonics suppression: a theoretical analysis », in *ISCAS'99. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Circuits and Systems VLSI (Cat. No.99CH36349)*, Orlando, FL, USA, 1999, vol. 5, p. 198-201, doi: 10.1109/ISCAS.1999.777544.
- [34] O. D. Bidas, L. Bitjoka, et M. Song, « Etude comparative des convertisseurs statiques », p. 10.
- [35] C. M. Wu, « Etude prospective de la topologie MMC et du packaging 3D pour la réalisation d'un variateur de vitesse en moyenne tension », 2015.

- [36] P. Kamani et M. Mulla, « A new multilevel inverter topology with reduced device count and blocking voltage », juin 2016, p. 1-6, doi: 10.1109/IEEEIC.2016.7555722.
- [37] Y. Ounejjar, K. Al-Haddad, et L.-A. Gregoire, « Packed U cells multilevel converter topology: theoretical study and experimental validation », IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no 4, p. 1294-1306, 2010.
- [38] S. S. Lee et K.-B. Lee, « Dual-T-type seven-level boost active-neutral-point-clamped inverter », IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no 7, p. 6031-6035, 2019.
- [39] A. Salem Mohamed Salem, « Design and analysis of five-level T-type power converters for rotating field drives », 2015.
- [40] « (15) (PDF) Five-Level T-Type Inverter Based on Multistate Switching Cell », ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/270742650_Five-Level_T_Type_Inverter_Based_on_Multistate_Switching_Cell (consulté le août 25, 2020).
- [41] U.-M. Choi, F. Blaabjerg, et K.-B. Lee, « Reliability improvement of a T-type three-level inverter with fault-tolerant control strategy », IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no 5, p. 2660-2673, 2014.
- [42] A. L. Lyngdoh, Y. Suh, B.-G. Park, et J. Kim, « Comparative Performance Evaluation of 10kV IGCTs in 3L ANPC and TNPC Converters in PMSG MV Wind Turbines », 전력전자학회논문지, vol. 24, no 6, p. 419-427, 2019.