

الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية بالجزائر

Ecole Supérieure des Sciences Appliquées
Alger

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Ecole Nationale
Polytechnique



Département du second cycle



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Traction électrique

Thème :

**Etat de l'art sur les convertisseurs AC-AC
multiniveaux**

Présenté par : M^{lle} Omar Amrani Rania.

Encadré par : M. BENACHOUR Ali.

Co-encadré par : M. IFFOUZAR Koussaila.

Soutenu le : 01/09/2010

Devant le jury composé de :

Dr DEBOUCHA Abdelhakim

Président

Dr BENACHOUR Ali

Encadreur

Dr IFFOUZAR Koussaila

Examinateur

Dr HAMACHE Amar

Examinateur

Ecole Supérieure des Sciences Appliquées d'Alger

Binôme N° : 10 /Master / 2020

الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية بالجزائر

Ecole Supérieure des Sciences Appliquées
Alger

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

Ecole Nationale
Polytechnique



Département du second cycle



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Traction électrique

Thème :

**Etat de l'art sur les convertisseurs AC-AC
multiniveaux**

Présenté par : M^{lle} Omar Amrani Rania.

Encadré par : M. BENACHOUR Ali.

Co-encadré par : M. IFFOUZAR Koussaila.

Soutenu le : 01/09/2010

Devant le jury composé de :

Dr DEBOUCHA Abdelhakim

Président

Dr BENACHOUR Ali

Encadreur

Dr IFFOUZAR Koussaila

Examinateur

Dr HAMACHE Amar

Examinateur

Ecole Supérieure des Sciences Appliquées d'Alger

Binôme N° : 10 /Master / 2020

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu le Bon Dieu, Tout Puissant et Miséricordieux de m'avoir maintenu en bonne santé, de m'avoir donné la chance de pouvoir vivre des moments émouvants tout au long de notre cursus universitaire, de m'avoir doté de motivation et de persévérance afin de mener à bien cet humble travail.

Je voudrais manifester, en second lieu, ma sincère reconnaissance à mon encadreur, Monsieur **BENACHOUR Ali** ainsi que pour mon co-encadreur Monsieur **IFFOUZAR Kousseila** pour les efforts et l'abnégation qu'ils ont affichés à mon égard, pour les conseils avisés et les orientations judicieuses qu'ils nous ont prodigués, pour leurs encouragements, leur soutien et surtout, pour leur permanente disponibilité tout au long de la préparation de mon master.

Je remercie profondément Monsieur **DEBOUCHA Abdelhakim** qui nous a fait l'honneur de présider le jury. Je suis également très honorée que Monsieur **HAMACHE Amar** ait accepté d'examiner mon travail et de faire partie des membres de jury.

Ma gratitude va aussi à l'ensemble des enseignants du second cycle de l'Ecole Supérieure En Sciences Appliquées D'ALGER, département de génie électrique, de m'avoir suivi durant toute ma formation universitaire afin de m'assurer un apprentissage de qualité et de m'inculquer les valeurs d'un métier si noble.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans citer mes proches. Je ne remercierai jamais assez mes très chers parents, la prunelle de mes yeux, ma chère maman et mon cher sacrifiant papa pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être, pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance. Je vous aime inconditionnellement. Merci mon adorable frère et ma douce sœur pour leur appui, leurs encouragements permanents et leur soutien moral ainsi que pour toute la complicité et l'entente qui nous unissent. Merci mon cher et unique oncle, mon second père et mon appui, mes mots ne suffiront jamais pour décrire l'amour et la reconnaissance que je vous dois. Enfin, je pense toujours à mes défunts grands parents qui auraient souhaité voir ce jour, qui ont toujours été là pour moi. Que Dieu vous accueille dans son éternel paradis.

Ma binome chérie, **AKKOUCHE Dalel**, je tiens à te remercier du fond du cœur pour tout ce que nous avons passé ensemble et accompli.

ملخص:

يتمحور هذا العمل حول المحولات متعددة المستويات، نظرا لولوجها عالم الصناعة بقوة واستقطابها للعديد من المجالات بفضل جودة الطاقة التي تحررها و نطاقاتها الواسعة والعديد من المزايا التي جعلت لها صوتا واسعا الاصداء. تقوم المحولات متعددة المستويات حول ثلاث هندسات اساسية مصممة خصيصا لتطبيقات التوتر المتوسط مع الجهد المتوسط و العالي ملبية لطلبات الصناعة. كجزء لا يتجزأ، لا يقوم عمل هذه المحولات بدون استراتيجيات التحكم التي لقيت بدورها اقبالا و نهاتفا على تطويرها بصفة مثالية لاكتمال هذه الثورة التقنية، اخيرا، التوافق بين طوبولوجيات المحولات و استراتيجيات التحكم لا يلبي دائما بأمكانية التطبيق لهذا تمت مناقشة حول الموضوع متبوعة باستنتاج عام.

الكلمات الدالة : المحولات متعددة المستويات , محولات NPC , محولات FC , محولات CHB

Abstract :

The main objective of this work is to present a state of the art of multi-level inverters, converters based on three fundamental topologies NPC, FC and CHB which have the captivating features in terms of power quality, power range, modularity and other features to achieve high quality output signals, being specially designed for medium voltage to medium and high-power applications. Secondly, our work highlighted the direct and indirect AC-AC converter to end with a gathering of multilevel inverters and matrix converters to obtain multilevel converters, followed by a general conclusion.

Key words: multi-level inverters, multilevel converter, NPC multilevel inverter, FC multilevel inverter, CHB multilevel inverter.

Résumé :

L'objectif principale de ce travail est de présenter un état de l'art des onduleurs multiniveaux, des convertisseurs se basent sur trois topologies fondamentales NPC, FC et CHB qui possèdent les caractéristiques captivantes en termes de qualité d'énergie, de gamme de puissance, de modularité et d'autres caractéristiques permettant d'obtenir des signaux de sortie de haute qualité, étant spécialement conçues pour les applications de moyenne tension à moyenne et haute puissance. Au second lieu, notre travail mis en exergue la convertisseur AC-AC direct et indirect pour terminer par un rassemblement des onduleur multiniveaux et les convertisseurs matriciels pour obtenir les convertisseurs multiniveaux, suivie par une conclusion générale.

Mots clés : Onduleur multiniveaux, convertisseur multiniveau, Onduleur multiniveaux NPC, Onduleur multiniveaux FC, onduleur multiniveaux CHB

TABLE DES MATIERS

REMERCIEMENTS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE.....	1
I. ETAT DE L'ART DES ONDULEURS MULTINIVEAUX.....	3
INTRODUCTION	3
I.1 HISTORIQUE SUR LES ONDULEURS MULTINIVEAUX.....	3
I.2 TOPOLOGIES CLASSIQUES DES ONDULEURS MULTINIVEAUX.....	5
I.2.1 Onduleur clampé par le neutre (Neutral Point Clamped NPC).....	5
I.2.2 Onduleur à condensateurs flottants (Flying Capacitor FC)	8
I.2.3 Onduleur en pont H cascadié (Cascaded H bridge CHB).....	11
I.3 ONDULEURS MULTINIVEAUX A SOURCE IMPEDANTE	14
I.3.1 Onduleur multiniveaux NPC à Z-source.....	15
I.4 NOUVELLES TOPOLOGIES	17
II. ETAT DE L'ART DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX	19
INTRODUCTION	19
II.1 CONVERTISSEURS MONOPHASES CONVENTIONNELS	20
II.2 CONVERTISSEURS AC-AC TRIPHASES	21
II.2.1 Convertisseur AC-AC indirecte (à fréquence intermédiaire (AC / DC / AC)).....	21
II.2.2 Convertisseurs AC-AC directs.....	22
II.3 CONVERTISSEURS MATRICIELS MULTINIVEAUX MMC.....	25
II.3.1 Convertisseurs multiniveaux à NPC	26
II.3.2 Convertisseur matriciel multi-niveaux H-bridge	27
II.4 APPLICATION DES CONVERTISSEURS MATRICIELS	28
CONCLUSION GENERALE.....	29
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	30

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I-1: ETATS DE FONCTIONNEMENT POSSIBLE POUR L'ONDULEUR NPC A 3
NIVEAUX[6][16][17].6
TABLEAU I-2 : ETATS DE FONCTIONNEMENT POSSIBLE POUR L'ONDULEUR FC A 3 NIVEAUX[22]......9
TABLEAU I-3 : LES ETATS DE FONCTIONNEMENT POSSIBLES DE L'ONDULEUR H-BRIDGE A 3 NIVEAUX.
.....12

LISTE DES FIGURES

FIGURE I-1 : CLASSIFICATION DES ONDULEURS MULTINIVEAUX.	4
FIGURE I-2: STRUCTURE DE L'ONDULEUR NPC A 3N [6].	5
FIGURE I-3 : STRUCTURE DE L'ONDULEUR NPC A (a) 5 NIVEAUX (b) N NIVEAUX[18].	7
FIGURE I-4 : STRUCTURE DE L'ONDULEUR FC A 3 NIVEAUX [23].	9
FIGURE I-5: STRUCTURE DE L'ONDULEUR FC A N NIVEAUX [22].	10
FIGURE I-6: STRUCTURE D'UN BRAS DE L'ONDULEUR H-BRIDGE A 3 NIVEAUX.	11
FIGURE I-7: STRUCTURE D'UN BRAS DE L'ONDULEUR H-BRIDGE A N NIVEAUX.	13
FIGURE I-8:STRUCTURE DE L'ONDULEUR TRIPHASE NPC AU RESEAU Z-SOURCE	15
FIGURE I-9 : STRUCTURE A (A) 4 SOURCES DE TENSION POUR LA GENERATION DE 25N DE TENSION (B) 3 SOURCES DE TENSION POUR LA GENERATION DE 5N DE TENSION [28] [29].	17
FIGURE I-10 : STRUCTURE D'UN BRAS DE L'ONDULEUR E-TYPE A 5N [31].	18
FIGURE II-1: CLASSIFICATION DES CONVERTISSEURS AC-AC.....	19
FIGURE II-2: CM MONOPHASE CONVENTIONNEL	22
FIGURE II-3: CONVERTISSEUR AC-AC INDIRECT AVEC CIRCUIT INTERMEDIAIRE[31]	22
FIGURE II-4: CONVERTISSEUR AC-AC INDIRECT SANS CIRCUIT INTERMEDIAIRE[31]	22
FIGURE II-5: LE CYCLO-CONVERTISSEUR	23
FIGURE II-6: CONVERTISSEUR MATRICIEL CLASSIQUE A ENTREE TRIPHASEE ET SORTIE TRIPHASEE (3 × 3) [32].	24
FIGURE II-7: CLASSIFICATION DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX[34].	25
FIGURE II-8: CONVERTISSEUR MATRICIEL MULTINIVEAUX A NPCI3LMC [34].	25
FIGURE II-9: CONVERTISSEUR MATRICIEL MULTINIVEAUX A NPC [34].	25
FIGURE II-10: UNE PHASE DU CONVERTISSEUR MATRICIEL PONT-H [34]. ..	25

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

NPC	Neutral pointed clamped
FC	Flying capacitor
CHB	Cascaded H-Bridge
ANPC	Actif Neutral Point Clamped
DC	Direct current
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
V_{DC}	Tension du bus continu
CSI	Current source inverter
VSI	Voltage source inverter
PWM	Pulse Width Modulation
MMC	Convertisseurs Matriciels multiniveaux
CM	Convertisseur matriciel
DMC	Direct multilevel converter
IMC	Indirect multilevel converter

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dernières décennies, le développement technologique dans l'industrie a accru la demande de sources de haute puissance à fréquence variable et de sources de moyenne à haute tension. Cela a rendu les convertisseurs électroniques de puissance très importants pour contrôler les charges industrielles et domestiques. Le réseau intelligent est considéré comme l'une des applications les plus importantes d'aujourd'hui. Il nécessite souvent un flux de puissance bidirectionnel et un réseau électrique entièrement contrôlé (de la production au client). Il faut donc s'attendre à ce que les convertisseurs électroniques de puissance représentent jusqu'à 70-80% de la puissance totale du réseau [1]

Les convertisseurs à deux niveaux souffrent de la forte teneur en harmoniques de la tension de sortie qui rend nécessaire l'utilisation d'un filtre. Ce filtre de puissance est un coût supplémentaire pour le convertisseur. En augmentant la fréquence de commutation du PWM, le contenu harmonique peut être réduit, mais cette technique augmente la perte de commutation du convertisseur [2]. Ces inconvénients majeurs motivent les chercheurs à trouver un convertisseur de puissance alternatif tel que le convertisseur multiniveau. Ce convertisseur peut fonctionner à une puissance élevée, à une tension moyenne et permet d'obtenir une tension de sortie avec un contenu harmonique réduit par rapport à un convertisseur à deux niveaux [3].

Trois topologies des onduleurs multiniveaux représentent les structures fondamentales dans ce domaine, c'est-à-dire que plusieurs topologies récentes ne sont que des structures modifiées ou hybride de ces onduleurs qui sont : l'onduleur en pont «H » en série (CHB), l'onduleur clampé par le neutre (NPC) ou l'onduleur des condensateurs flottants (FC). Qui sont tous des onduleurs a source de tension. Une vue différente a permis de modifier la source des convertisseurs et réussir à dépasser plusieurs obstacles avec les sources anciennes, en dévoilant ce qu'on appelle les onduleurs multiniveaux à Z-source et à T-source.

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance en régime de découpage pour traiter l'énergie électrique à haut rendement et assurer les fonctionnalités suivantes [7]:

- Transformation : génération d'une tension alternative à partir d'une source continue et *vice versa*.
- Régulation : alimentation constante d'une charge à partir d'une source variable.
- Adaptation : alimentation d'une charge basse tension à partir d'une source haute tension et *vice versa*

Malgré la révolution industrielle mise en place grâce à les convertisseurs multiniveaux, ces derniers présentent pas mal d'inconvénients, commençant par la complexité des algorithmes de contrôle et du circuit de puissance, les pertes de commutation ainsi que le coût élevé du convertisseur. Les recherches récentes se concentrent sur leur optimisation. Cette optimisation peut être réalisée par la simplification du circuit de commande ou de puissance, et c'est la raison pour laquelle différentes topologies sont apparues à la seine de la conversion multiniveaux, et par conséquents plusieurs techniques de control [8] .

Dans le but de récolté la conversion multiniveau, ce travail expose les structures classiques des onduleurs multiniveaux avec leur historique, les structures hybrides les plus courantes, et un brief aperçu sur les onduleurs multiniveaux à Z-source. D'autre part les convertisseurs AC-AC sont présentés par les deux topologies direct et indirect [30], pour en conclure Avec le rassemblement des convertisseurs matriciels et les onduleurs multiniveaux afin d'obtenir les convertisseur AC-AC multiniveaux MMC [9].

I. ETAT DE L'ART DES ONDULEURS MULTINIVEAUX

INTRODUCTION

Durant les dernières années, les convertisseurs multiniveaux ont connu un succès dans diverses applications de la moyenne tension, grâce à leur capacité à améliorer la forme d'onde de la tension délivrée à la charge.

En effet, contrairement aux convertisseurs classiques où autrement dit, les convertisseurs à 2 niveaux, ceux à multi-niveaux permettent d'atteindre des amplitudes élevées de la tension à leur sortie, par le moyen de commutateurs de puissance adéquats à chaque application.

Dans les titres qui suivent, nous aborderons les différentes topologies qui appartiennent aux convertisseurs multi-niveaux ainsi que leurs domaines d'applications.

I.1 Historique sur les onduleurs multiniveaux

Dans les années soixante, Mr C. W. Flairty a mis en série plusieurs onduleurs en pont H, avec un déphasage entre eux réalisé au moyen d'un transformateur[4]. Ensuite, Mr W.M. Murray enchaina avec une étude, en 1971, portant sur la mise en série de l'onduleur monophasé à 3N, en pont H [5].

Ce n'est qu' au début des années quatre-vingt que la nouvelle topologie à neutre clampé (*Neutral Point Clamped NPC*) a fait son apparition, grâce aux efforts fournis par Mrs A. Nabae, I. Takahashi et H. Akagi [6]. Son appellation est inspirée du potentiel intermédiaire raccordé au neutre du réseau triphasé. Cette structure a été fortement utilisée dans les variateurs de vitesse de moyenne tension et elle est jusqu'à présent, considérée comme la plus répandue des topologies multiniveaux[7].

En dépit de l'arrivée de la structure NPC, les chercheurs n'ont pas cessé de mener leurs études afin d'optimiser davantage les structures multiniveaux. En 1992, Mrs T. Meynard et H. Foch ont mis en œuvre une topologie appelée : Onduleur à capacités flottantes (*Flying Capacitor FC*) ou convertisseurs multicellulaires série[10]. Son principe se résume par la mise en série de cellules de

commutation permettant ainsi, l'obtention des états redondants qui assurent l'équilibrage naturel des tensions flottantes [11].

Une décennie plus tard, est apparu la tendance des convertisseurs (*Modular Multilevel Converter* MCC) qui ne demandent pas une alimentation externe pour chaque module [12] ainsi que le réseau Z-source qui a été suivi en 2008, par le réseau Quasi Z-source crée par Mrs Anderson et al. [13], ce qui a ouvert des perspectives pour de nouvelles topologies multiniveaux à Z-source [14].

La topologie T-NPC, qui sera particulièrement traitée au cours de la réalisation de ce travail, a fait sa manifestation en 2010, par Mr Schweizer dans le but de répondre aux inconvénients de la topologie de base, NPC [15].

Ce bref passage historique s'achèvera par un organigramme résumant la classification de ces onduleurs multiniveaux (**Figure I-1**).

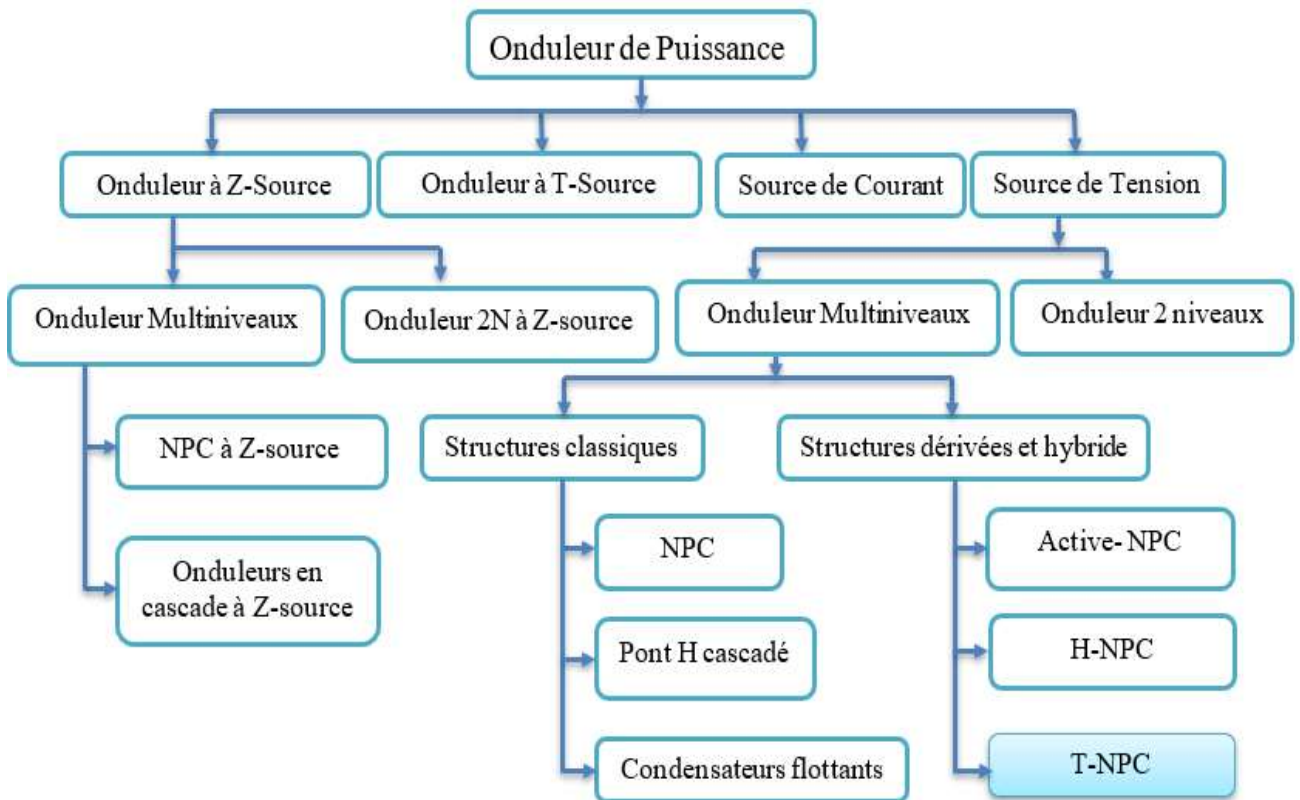


Figure I-1 : Classification des onduleurs multiniveaux.

I.2 Topologies classiques des onduleurs multiniveaux

Au fil du temps, de nombreuses topologies de convertisseurs multiniveaux ont été proposées les plus connues et établies d'entre elles, sont la topologie à point neutre clampé (NPC), la topologie à condensateurs flottants (FC) et la topologie en pont H cascadié (CHB). Chacune de ces dernières a été introduite pour la première fois dans [6] [10] [5], respectivement.

I.2.1 Onduleur clampé par le neutre (*Neutral Point Clamped NPC*)

Cette structure est très employée dans les applications de variation de vitesse à moyenne tension [14]. Elle a été proposée par A. Nabae et H. Akagi en 1981, dans le but de fournir, au moyen de l'onduleur, un signal de bonne qualité à la charge contenant des harmoniques de faible amplitude [6].

L'onduleur de topologie NPC est constitué de trois bras, dont chacun est muni de quatre interrupteurs bidirectionnels en courant et deux diodes. Ces interrupteurs sont regroupés de sorte à former deux cellules de commutation élémentaires : la première comprend les interrupteurs K_{i1} et K_{i2} et la seconde est constituée par les interrupteurs K_{i3} et K_{i4} , comme le montre la **figure I-2**.

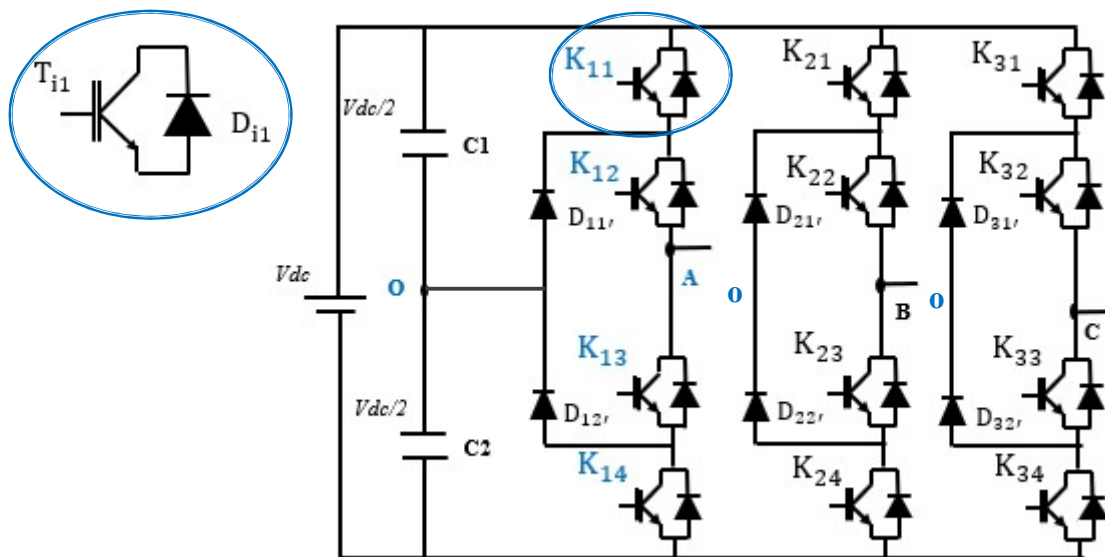


Figure I-2: Structure de l'onduleur NPC à 3N [6].

Du côté bus continu, nous retrouvons un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs C_1 et C_2 de même capacité dans le but d'obtenir deux sources de tension de valeur $\frac{V_{DC}}{2}$ ainsi qu'un neutre 0 auquel, les deux diodes D_{i1} , et D_{i2} , viennent se reccorder pour avoir un niveau supplémentaire par rapport à l'onduleur conventionnel à deux niveaux [17].

I.2.1.1 Principe de fonctionnement des onduleurs à structure NPC

Les états possibles de fonctionnement de l'onduleur NPC à 3 niveaux sont mis en évidence à travers le **Tableau I-1**.

Tableau I-1: Etats de fonctionnement possible pour l'onduleur NPC à 3 niveaux[6][18][19].

Tension de sortie	Interrupteurs passants	Sens du courant	Le courant passe par
$\frac{V_{dc}}{2}$	$T_{11} \text{ \& } T_{12}$	$I_k > 0$	$T_{11} \text{ \& } T_{12}$
		$I_k < 0$	$D_{11} \text{ \& } D_{12}$
0	$T_{12} \text{ \& } T_{13}$	$I_k > 0$	$D_1 \text{ \& } T_{12}$
		$I_k < 0$	$D_2 \text{ \& } T_{13}$
$-\frac{V_{dc}}{2}$	$T_{13} \text{ \& } T_{14}$	$I_k > 0$	$D_{14} \text{ \& } D_{13}$
		$I_k < 0$	$T_{14} \text{ \& } T_{13}$

I.2.1.2 Structure généralisée des onduleurs NPC

Le fait d'ajouter des interrupteurs de puissance et des diodes de verrouillage supplémentaires au niveau des bras de l'onduleur à la structure NPC, permet d'étendre celle-ci à des débits de puissance plus élevés et à des niveaux de tension de sortie plus importants. La structure généralisée de l'onduleur NPC est nommée : convertisseur multipoint à verrouillage (MPC)[20]. La figure ci-dessous montre une phase d'un convertisseur NPC à cinq niveaux et à N niveaux :

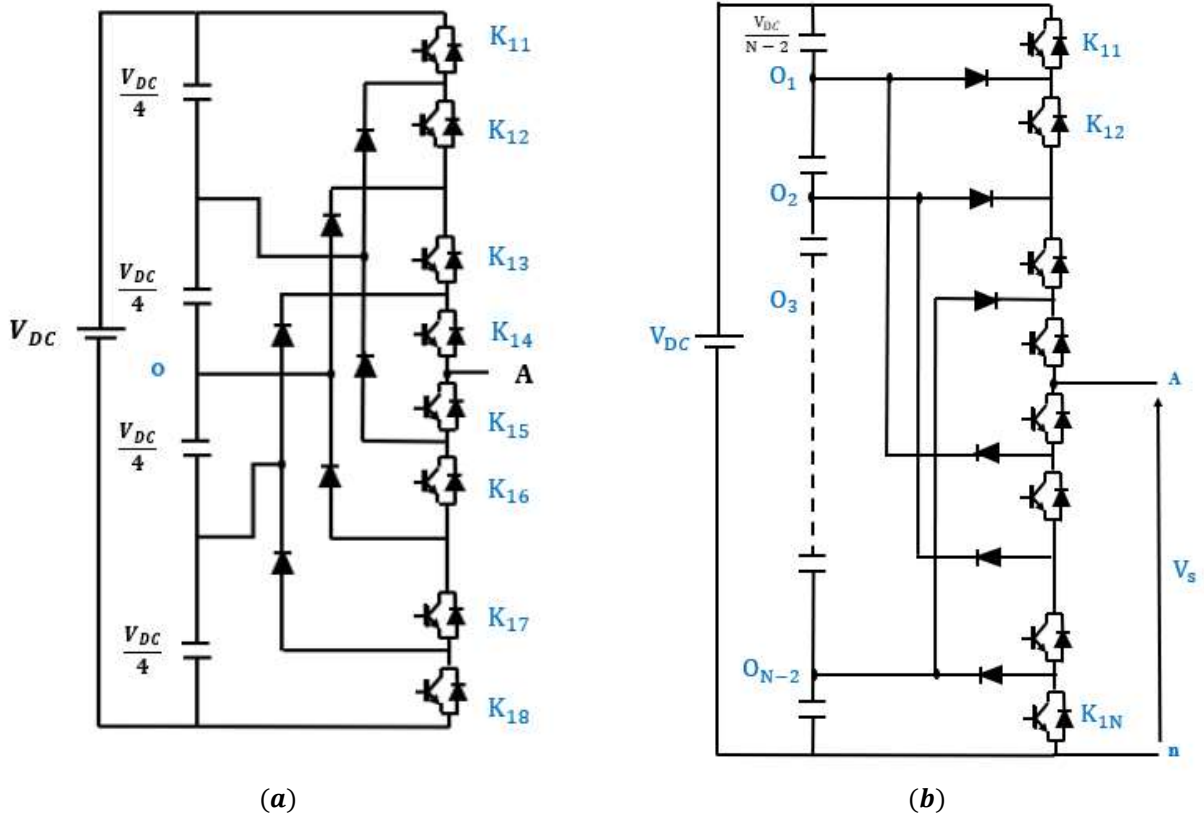


Figure I-3 : Structure de l'onduleur NPC à (a) 5 niveaux (b) N niveaux[20].

Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, il faut [20] [21] :

- $N - 1$ Condensateurs pour la création des points milieu capacitifs. Chaque condensateur doit être dimensionné pour une tension égale à $\frac{V_{dc}}{N-1}$ et pour un courant égal au courant maximal de la charge ;
- $6(N - 1)$ Interrupteurs de puissance semi-conducteur totalement commandable et bidirectionnel en courant ;
- $6(N - 1)$ diodes de clamp.

I.2.1.3 Avantages de la topologie NPC

- La possibilité d'étendre les principes employés dans cette topologie de l'onduleur jusqu'à des nombres plus élevés de niveaux, puisqu'elle est généralisable [22].
- Le partage équitable 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 [23].

I.2.1.4 Inconvénients de la topologie NPC

- La difficulté qui s'impose en contrôlant le déséquilibre des condensateurs du bus, fait en sorte que l'acceptation industrielle de la topologie NPC soit maintenue jusqu'à trois niveaux uniquement [23].
- L'augmentation du nombre de niveaux engendre l'élévation excessive du nombre de diodes

I.2.2 Onduleur à condensateurs flottants (*Flying Capacitor FC*)

La structure à condensateurs flottants, connue aussi sous le nom multicellulaire (MC) ou à cellules imbriquées, en raison de sa structure modulaire composée de plusieurs convertisseurs de puissance plus petits [19]. Elle a été proposée par T. Meynard et al. en 1992 [10], pour remédier au problème d'équilibrage des tensions du bus continu et diminuer le nombre excessif des diodes [24].

La structure de l'onduleur à capacité flottante est semblable à celle de l'onduleur NPC or, les diodes de clamp sont remplacées par des condensateurs de stockage d'énergie comme le montre la **figure I-4** en guise de sources de tension flottantes (Batteries) [11].

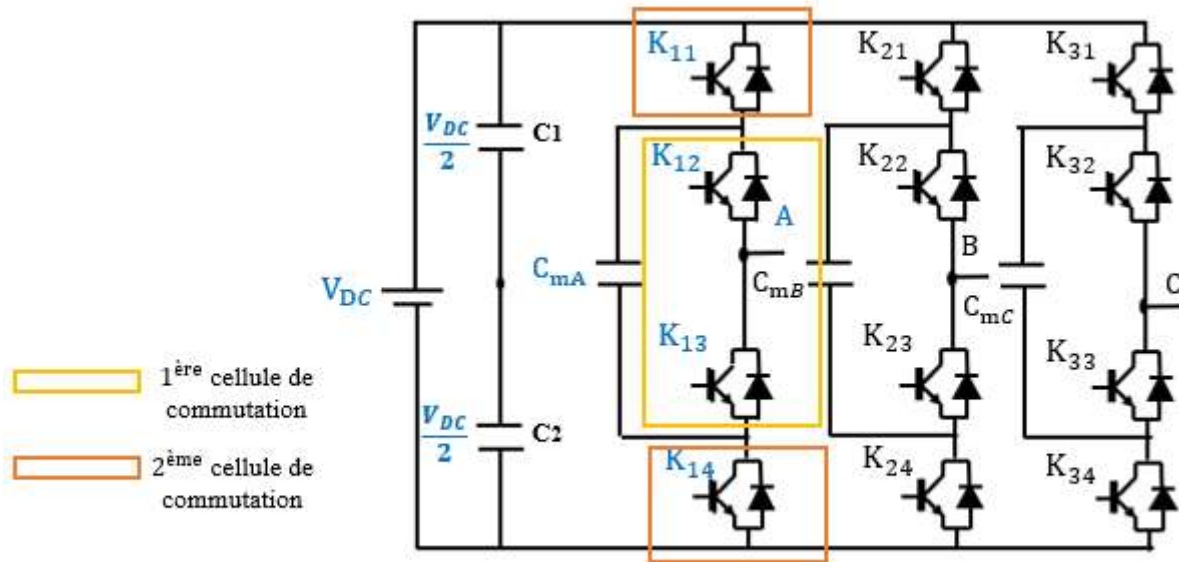


Figure I-4 : Structure de l'onduleur FC à 3 niveaux [25].

I.2.2.1 Principe de fonctionnement de la topologie FC

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

Tableau I-2 : Etats de fonctionnement possible pour l'onduleur FC à 3 niveaux[24].

Niveau de tension	Etat des interrupteurs				Le courant passe par
	T ₁₂	T ₁₁	T ₁₃	T ₁₄	
$\frac{V_{dc}}{2}$	1	1	0	0	T ₁₁ & T ₁₂
0	1	0	0	1	T ₁₂ & D ₁₄
	0	1	1	0	T ₁₁ & D ₁₃
$-\frac{V_{dc}}{2}$	0	0	1	1	D ₁₃ & D ₁₄

I.2.2.2 Structure généralisée des onduleurs FC

La **figure I-5** illustre le schéma de la structure de l'onduleur FC à N niveaux et à P cellules imbriquées, sachant que $P = N - 1$ [24] :

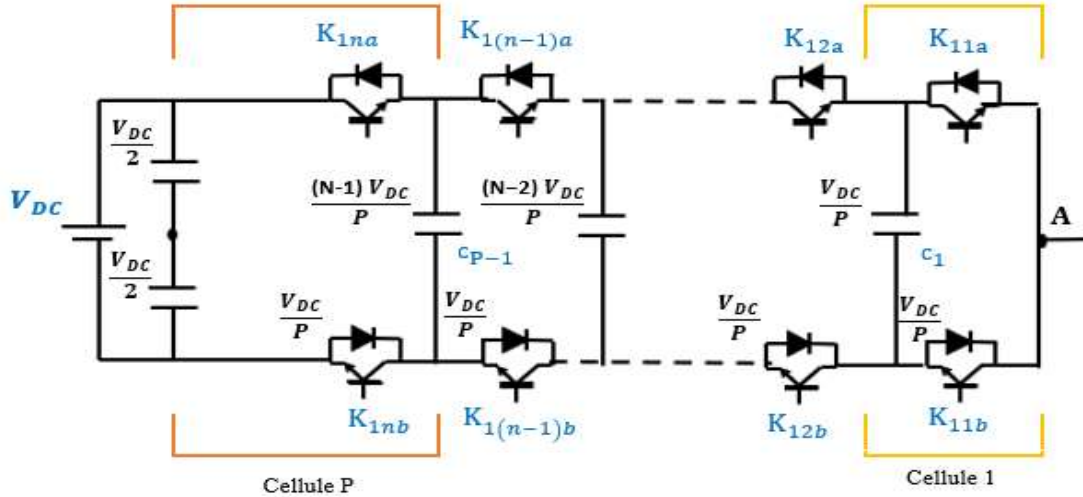


Figure I-5: Structure de l'onduleur FC à N niveaux [24].

Chaque paire d'interrupteurs situés sur la même verticale forme une cellule de commutation dont les interrupteurs sont commandés de manière complémentaire.

Pour garantir un fonctionnement correct des onduleurs multicellulaires, il est nécessaire que les tensions aux bornes des condensateurs flottants soient équilibrées à leur juste valeur [16] :

- La tension aux bornes du premier condensateur doit être égale à $\frac{V_{dc}}{p}$
- La tension aux bornes du deuxième condensateur doit être égale à $\frac{2V_{dc}}{p}$
- La tension aux bornes du $(P - 1)^{\text{ème}}$ condensateur doit être égale à $\frac{(p-1)V_{dc}}{p}$

I.2.2.3 Avantages de la topologie FC

- La réduction du volume du filtre en aval du convertisseur, vu que les premiers harmoniques se situent aux alentours de n fois la fréquence de découpage (soit n le nombre de cellules), dans le spectre de la tension de sortie de ce convertisseur[16].
- L'augmentation de la puissance et de la tension grâce à la connexion en série de cellules de commutation [24].

- La possibilité de configurer la structure de ces onduleurs afin de fonctionner en mode dégradé pour certaines défaillances[24].

I.2.2.4 Inconvénients de la topologie FC

- La nécessité d'un équilibrage des tensions flottantes, afin de répartir uniformément la tension du bus DC entre les cellules de commutation[24].
- La nécessité d'un contrôle plus complexe puisqu'il est recommandable de maintenir les tensions des condensateurs flottants à leurs niveaux de fonctionnement cible[19].
- La 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 l'augmentation du coût [11].

I.2.3 Onduleur en pont H cascadié (*Cascaded H bridge CHB*)

La topologie en pont H cascadié est la première décrite dans la littérature comme une structure de conversion multi-niveaux, elle est apparue en 1971 par WM. Murray [7]. Cette topologie résulte de la mise en série de plusieurs onduleurs monophasés, d'où le terme cascadié. Elle permet, grâce à sa modularité, d'obtenir en sortie une forme d'onde de tension en multi-niveaux, avec des sources de tension continues et isolées[25].

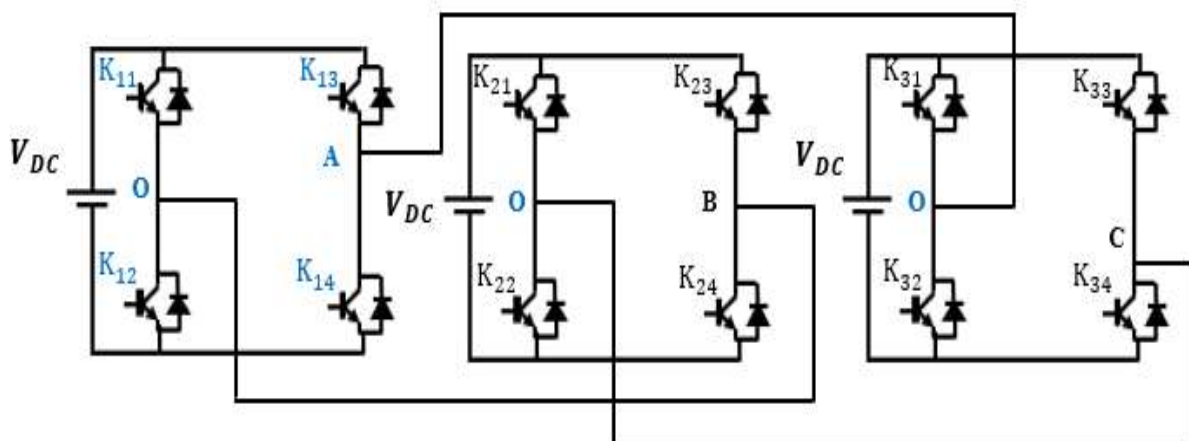


Figure I-6: Structure d'un bras de l'onduleur H-bridge à 3 niveaux.

Parmi les topologies classiques, la configuration en cascade a été utilisée pour les systèmes d'énergie renouvelable pour la moyenne et la haute tension comme le photovoltaïque, en raison de sa modularité et sa simple structure [22].

I.2.3.1 Principe de fonctionnement d'une cellule

Pour un onduleur de type cascade à trois niveaux, trois séquences de fonctionnement sont distinguées [25] :

Tableau I-3 : Les états de fonctionnement possibles de l'onduleur H-bridge à 3 niveaux.

Les séquences	Etat des interrupteurs				La tension de sortie V_s
	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{14}	
Niveau maximum	1	0	0	1	V_{DC}
Niveau intermédiaire	0	1	0	1	0
	1	0	1	0	
Niveau minimum	0	1	1	0	$-V_{DC}$

I.2.3.2 Structure généralisée de l'onduleur CHB

Pour généraliser, la mise en série de $\frac{(N-1)}{2}$ étages monophasés en pont H, pour chaque phase du convertisseurs CHB à N niveaux de tension, nous donne $(N - 1)$ cellules élémentaires au sein de chaque bras donc, $2(N - 1)$ interrupteurs.

La tension de sortie de l'onduleur est obtenue grâce à la sommation des différentes tensions obtenues à la sortie de chaque cellule.

$$V_s = \sum_{i=1}^{(N-1)/2} v_i \quad (I.1)$$

Donc, l'augmentation du nombre des cellules mises en série engendre l'augmentation du nombre de niveaux de la tension de sortie [26].

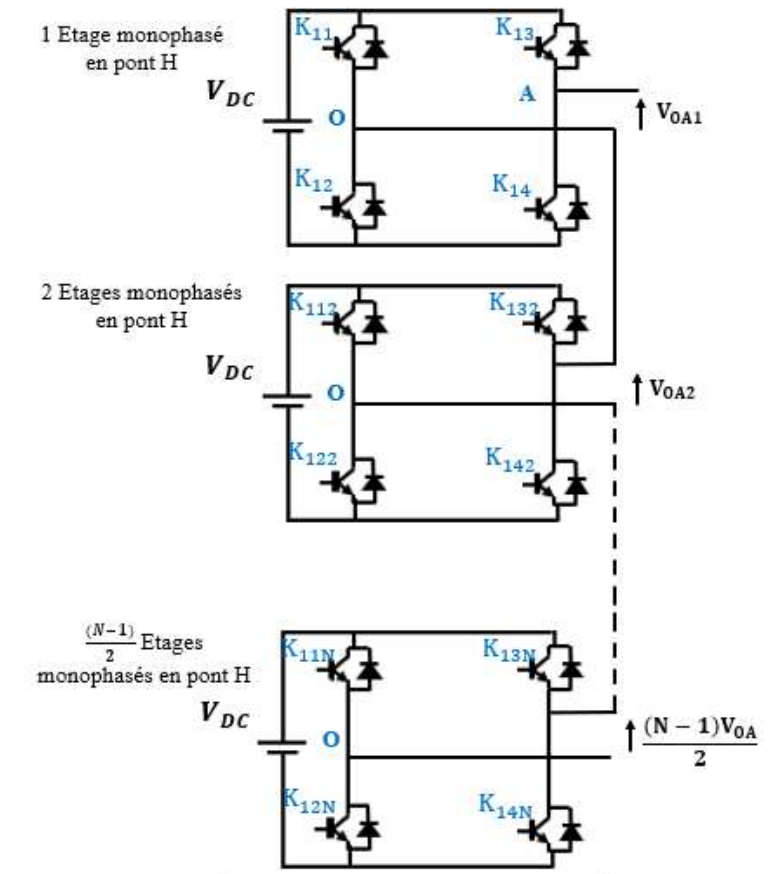


Figure I-7: Structure d'un bras de l'onduleur H-bridge à N niveaux.

I.2.3.3 Avantages de la topologie CHB

- La possibilité d'alimenter une charge en haute ou moyenne tension à partir d'une ou plusieurs alimentations basse tension [11].
- La 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 $V_{DC}/2$ [25].
- Le non nécessité d'équilibrage des tensions du bus continu ou l'adaptation de la tension des dispositifs de commutation[25].
- La simplicité de la structure ainsi que le nombre réduit des composants par rapports aux autres topologies de base [25].

I.2.3.4 Inconvénients de la topologie CHB

- La nécessité de sources d'alimentation galvaniquement séparées les unes des autres, ce qui limite encore son expansion industrielle [26][27]. Car en pratique, ces sources continues isolées sont réalisées à l'aide d'un transformateur multi-secondaire nécessitant un entretien régulier en outre d'être coûteux et volumineux [11].
- L'augmentation considérable de la taille du convertisseur avec l'augmentation du nombre de niveaux de la tension de sortie [17].
- Elle nécessite un contrôle supplémentaire et une commutation accrue pour maintenir les tensions des condensateurs constantes [27].

I.3 Onduleurs multiniveaux à source impédante

Les convertisseurs traditionnels à source de tension et à source de courant souffrent de deux problèmes majeurs et qui sont :

- Ils sont soit un Buck Converter ou un Boost-Converter, ne peuvent pas fournir un fonctionnement Buck-Boost, limitant ainsi leur plage de tension de sortie.
- Ils sont vulnérables au bruit **EMI** et ne peut tolérer ni court-circuit ni circuit ouvert, ce qui bouleverse leur fiabilité [13].

Le réseau Z-source représente un meilleur substituant tel que, La caractéristique unique de tous les convertisseurs à Z-source est la capacité « Buck-boost », où la tension de bus varie considérablement, en plus ils peuvent être court-circuité et ouvert qui fournit un mécanisme pour le convertisseur principal à manipuler la tension selon le besoin [13].

On distingue deux états principaux :

- Séquence de Shoot-Through : où le réseau Z-Source est en court-circuit.
- Séquence d'états actifs : où Le réseau d'impédances Z-Source transfère l'énergie à la charge à travers l'onduleur qui évolue de manière classique.

Les onduleurs multiniveaux des sources classiques représentaient un stade de recherche intéressant qui menait à fusionner le réseau Z source et les onduleurs multiniveaux, Il existe deux onduleurs multiniveaux à Z-source/quasi-Z-source qui font l'objet de recherches très poussées :

- L'onduleur clampé par le neutre à Z-source ;
- L'onduleur multiniveaux en cascade à Z-source ;

Le concept à Z-Source, qui s'intègre à ces onduleurs multiniveaux traditionnels, hérite des mérites des deux topologies avec une fiabilité accrue de l'onduleur grâce à l'immunité aux courts-circuits[18].

I.3.1 Onduleur multiniveaux NPC à Z-source

L'une des limitations des onduleurs NPC c'est qu'ils ne sont que des convertisseurs de type Buck. Pour cela des onduleurs NPC de Z-source ont été proposés par Loh, Feng, Blaabjerg et Soon (2007a) comme onduleurs à trois niveaux Buck-boost. Ces onduleurs utilisent deux réseaux de Z-source connectés aux liaisons DC supérieures et inférieures de l'onduleur NPC, chacune est alimentée par une source DC distincte [22].

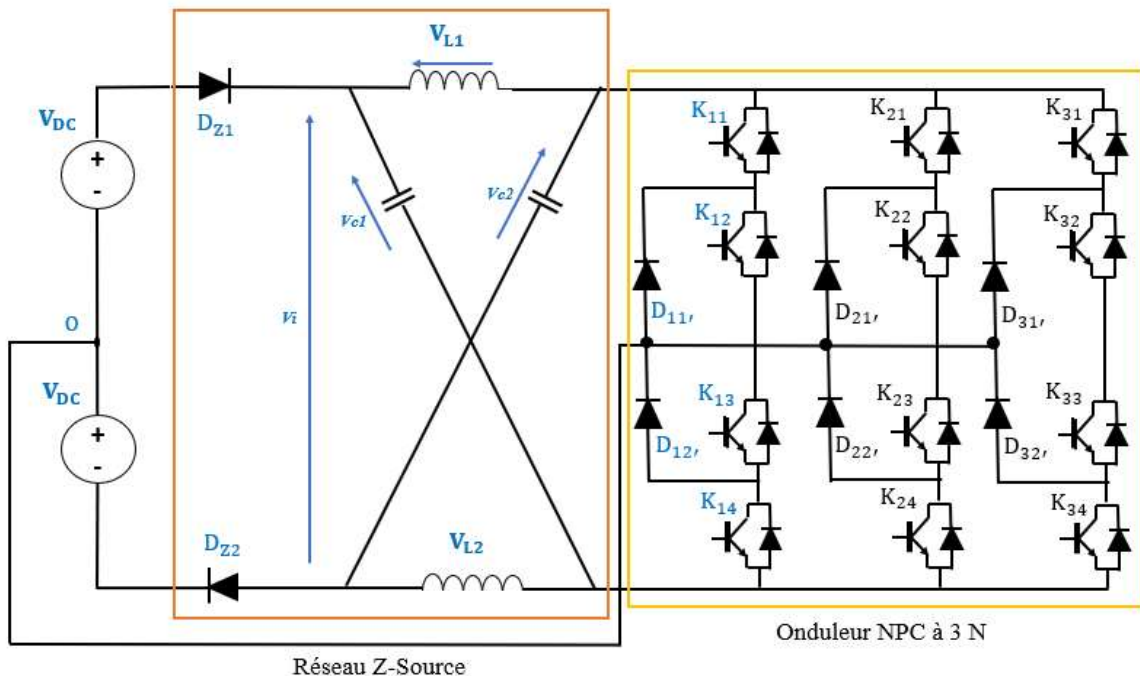


Figure I-8: Structure de l'onduleur triphasé NPC Au réseau Z-source

Ce sont des onduleurs raisonnablement compétitifs pour les applications « Buck-Boost », leurs bonnes performances étant confirmées [22].

I.3.1.1 Principe de fonctionnement de l'onduleur NPC à Z-source

Les onduleurs NPC à trois niveaux possèdent deux états « Shoot-Through » supplémentaires en raison de la présence du point neutre qui est formé entre les deux sources du bus continu d'entrée V_{DC} [13]. Donc le mode de fonctionnement comprend les états suivants :

- N-ST « Non Shoot-Through » ou le fonctionnement de l'onduleur est classique.
- FST « Full Shoot-Through » est obtenu en court-circuitant tous les interrupteurs d'un bras d'onduleur avec le blocage des deux diodes D_1 et D_2 .
- UST « Upper Shoot-Through » est obtenu en court-circuitant les trois interrupteurs de haut de l'onduleur avec passage de D_1 .
- LST « lower Shoot-Through » où les trois interrupteurs inférieurs de l'onduleur sont court-circuités pour fournir une augmentation de tension avec passage de D_2 [5].

I.3.1.2 Avantages des onduleurs multiniveaux à Z-source

- L'état de Shoot-Through pour augmenter la tension d'entrée, ce qui améliore l'onduleur fiabilité et élargit ses domaines d'application.
- Admet les caractéristiques du Buck-boost.
- Le concept de Z-source peut être appliqué à toutes les conversions de puissance DC-AC, AC-DC, AC.AC et DC. DC.
- La source d'alimentation d'un convertisseur Z-source peut être soit une source de tension ou une source de courant. Donc, la source continue d'un convertisseur Z peut être une batterie, redresseur à diode, convertisseur à thyristor, pile à combustible, inductance, condensateur, une source avec un réseau de commutation, ou une combinaison des éléments ci-dessus
- L'onduleur Z-source sert de stocker l'énergie et garantit un filtrage de qualité à l'entrée de l'onduleur, ce qui permet de réduire les ondulations de courant et les pulsations de tension à l'entrée DC.

I.3.1.3 Inconvénients des onduleurs multiniveaux à Z-source

- L'unidirectionnalité du flux de puissance de la source vers la charge.
- Appel d'un fort courant au démarrage.
- Un courant discontinu à l'entrée.

I.4 Nouvelles topologies

De nos jours, le convertisseur multiniveaux présente une bonne solution pour les applications commerciales et industrielles avec une taille et un coût réduit. Pour cela, plusieurs topologies de convertisseurs multiniveaux sont conçues, nous citons par exemple, la topologie à 3 sources pour la génération d'une tension de 5 niveaux et la topologie à 4 sources pour une tension de 25 niveaux. Ces dernières ont été proposées par Mrs S.Mekhilef et al. En 2016 [28] [29].

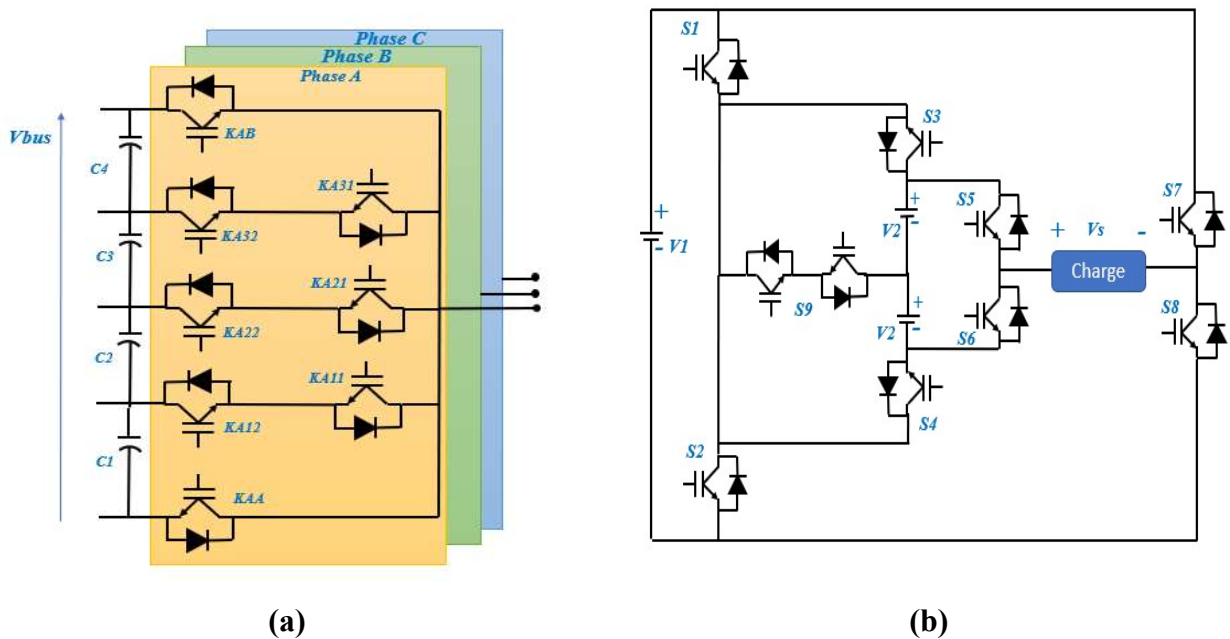


Figure I-9: Structure à (a) 4 sources de tension pour la génération de 25N de tension (b) 3 sources de tension pour la génération de 5N de tension [28] [29].

En 2018, l'onduleur E-type à 5N a été conçu par Mrs Solero et al. pour les applications connectées au réseau [30]. Au courant de la même année, l'onduleur T-NPC Dual Boost ANPC à 7N a été présenté par SzeSing Lee et al. dans le but de réduire la tension de la source DC [31].

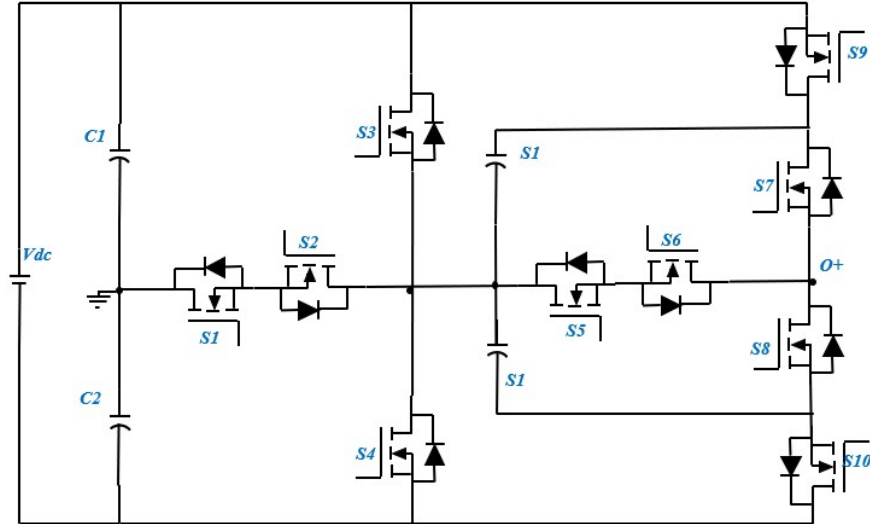


Figure I-10: Structure d'un bras de l'onduleur E-type à 5N [31].

II. ETAT DE L'ART DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX

INTRODUCTION

En raison de la popularité croissante des moteurs à courant alternatif dans les secteurs industriels et commerciaux, les convertisseurs AC - AC sont utilisés dans les applications de variateurs de vitesse pour contrôler la vitesse de rotation et le couple des moteurs à courant alternatif [9].

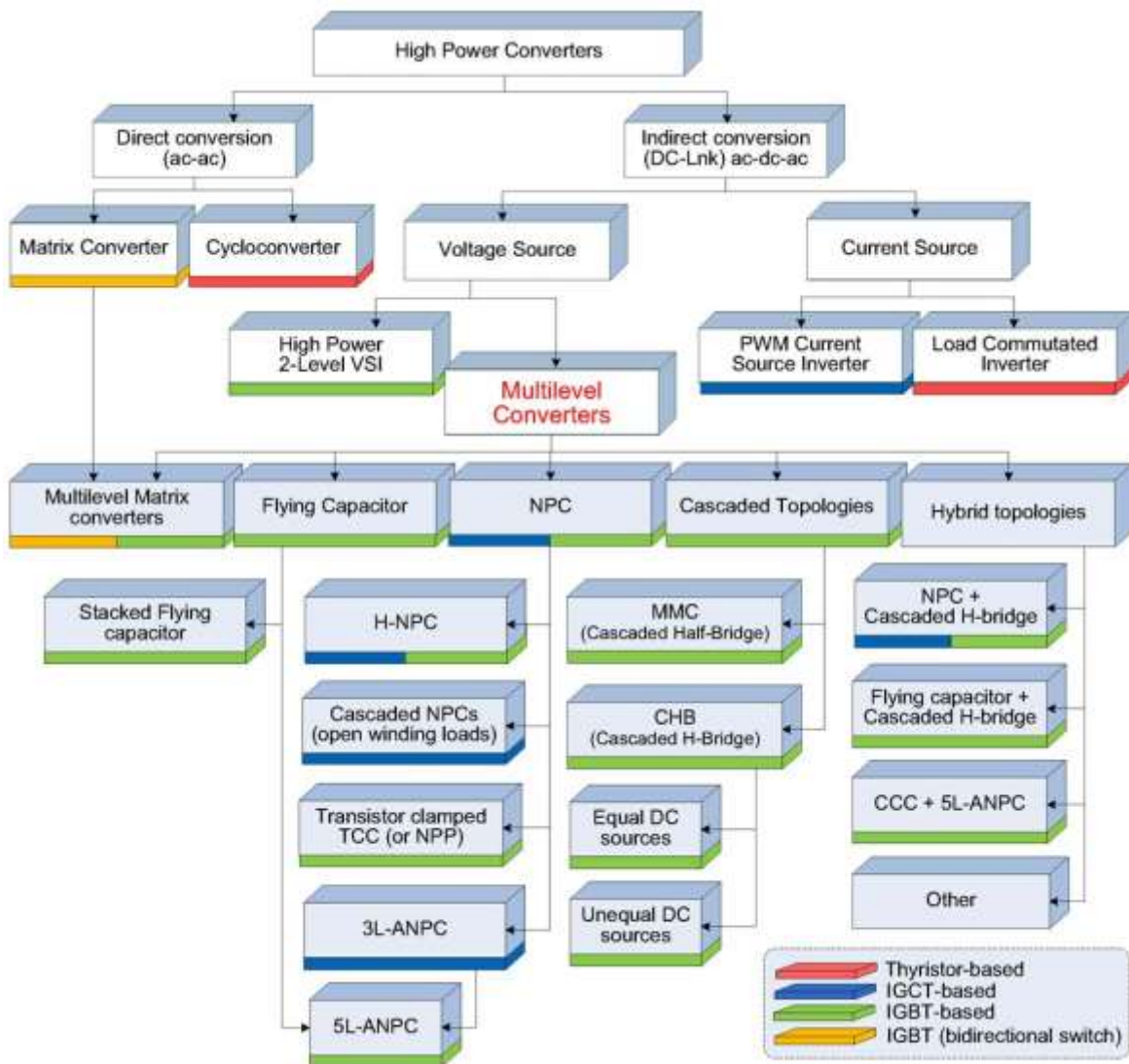


Figure II-1: Classification des convertisseurs AC-AC [9]

Le convertisseur matriciel a fait l'objet d'une attention considérable ces dernières années en raison de la disponibilité de meilleurs dispositifs de commutation et également, de ses certains caractères opérationnels attrayants à savoir, des formes d'onde sinusoïdales d'entrée et de sortie, un flux de puissance bidirectionnel, un facteur de puissance d'entrée contrôlable, l'absence d'éléments réactifs de stockage d'énergie et une taille compacte [32].

Les convertisseurs directs AC-AC présentent un certain nombre d'avantages notamment la conversion de la puissance d'une tension fixe à fréquence fixe en une tension variable à fréquence variable sans aucune liaison CC intermédiaire [33].

Le convertisseur matriciel est considéré comme le type le plus répandu de la famille des convertisseurs directs, il a été introduit, pour la première fois, par Gyugyi en 1976 puis, par Venturini et Alesina en 1979. Ce convertisseur offre une solution entièrement en silicium pour la conversion de puissance AC-AC [34]. La version monophasée appelée convertisseur matriciel monophasé a été introduite pour la première fois par Zuckerberger [35].

II.1 Convertisseurs monophasés conventionnels

Le convertisseur matriciel monophasé est constitué d'une matrice de lignes d'entrée et de sortie avec quatre interrupteurs bidirectionnels reliant l'entrée monophasée à la sortie monophasée aux intersections [35]. Il comprend quatre interrupteurs idéaux S_1 , S_2 , S_3 et S_4 capables de commuter entre les états sans aucun retard, de conduire le courant dans les deux sens, de bloquer les tensions avant et arrière (dispositifs symétriques) [33]. La figure II-2 montre un convertisseur matriciel monophasé [36].

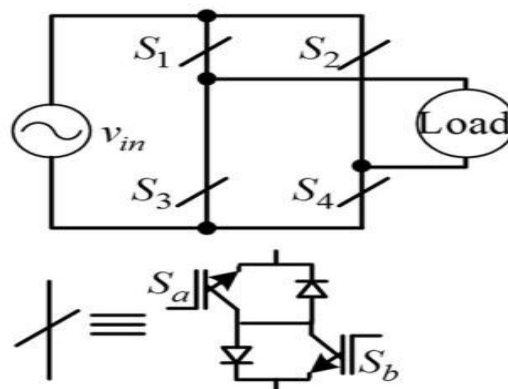


Figure II-2: Le CM monophasé conventionnel

Il existent d'autres topologies des convertisseurs matriciels monophasés notamment le convertisseur matriciel à Z-source monophasé, le convertisseurs matriciel à six interrupteurs Buck/Boost et le convertisseur matriciel isolé à transformateur qui ont été proposés dans respectivement, [37][38][39].

II.2 Convertisseurs AC-AC triphasés

Les convertisseurs triphasés AC - AC peuvent être divisés en deux types : les convertisseurs AC-AC indirects et les convertisseurs AC-AC directs comme le montre la figure II-1 [8]:

II.2.1 Convertisseur AC-AC indirecte (à fréquence intermédiaire (AC / DC / AC))

Généralement le principe des convertisseurs de fréquence est basé sur une conversion indirecte. Elle se divise en deux conversions successives. D'abord, on effectue le redressement de la grandeur alternative en une grandeur continue ou quasi continue qui est ensuite convertie en grandeur alternative de sortie. Dépendamment du type de liaison mis en œuvre, du type de commande utilisé et de la nature des commutations des différents étages (redresseur et onduleur), différentes structures sont possibles pour réaliser ce type de convertisseur [32]. Il existe principalement trois types différents de convertisseurs de fréquence indirects [40]:

- Le convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire de courant continu. Le circuit intermédiaire consiste en une inductance de stockage, imposant le courant du circuit intermédiaire aux phases de la charge. Bien que le montage et la commande de ce type de convertisseur soit relativement simple, ce dernier possède beaucoup d'inconvénients. D'abord, l'ondulation en puissance est très prononcée, de plus, la dynamique des courants de sortie est limitée et finalement l'inductance de stockage est gênante par rapport à l'aspect constructif.
- Le convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire de tension continue (convertisseur-U, DC-voltage Link Converter). Le circuit intermédiaire consiste en un condensateur de stockage, imposant la tension du circuit intermédiaire aux phases de la charge. Ce type de convertisseur est le plus répandu étant donné que le montage et la commande sont relativement simples (Figure II-3).

- Le convertisseur de fréquence à circuit intermédiaire oscillant fonctionne également à base d'une tension intermédiaire. A l'aide d'un circuit de résonance LC ainsi que des commutateurs auxiliaires, les commutations des éléments principaux de la partie onduleur s'effectuent, par exemple, à tension nulle. Ceci permet d'augmenter considérablement la fréquence de pulsation donnant ainsi une très bonne dynamique de courant à la sortie. La figure (II-4) représente un schéma synoptique du convertisseur AC/DC/AC à circuit intermédiaire de tension continue [9]

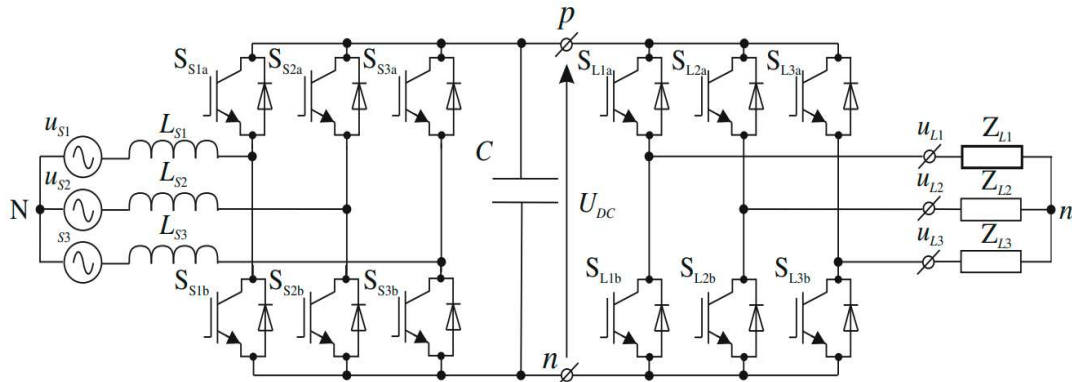


Figure II-3: Convertisseur AC-AC indirect avec circuit intermédiaire[8]

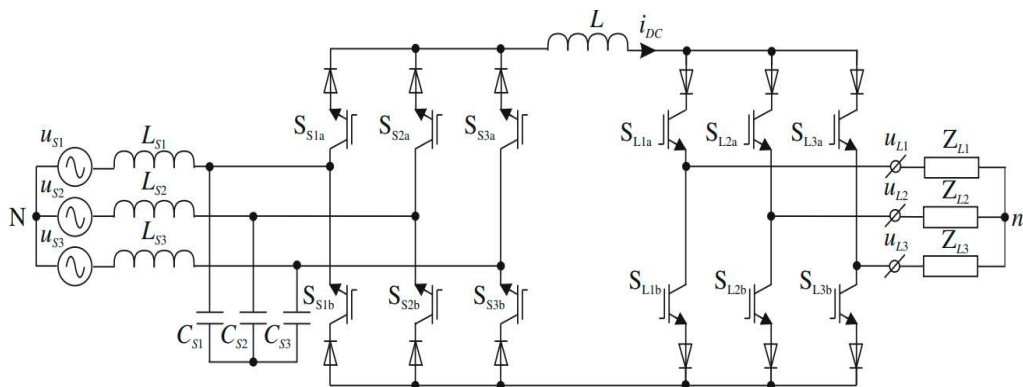


Figure II-4: Convertisseur AC-AC indirect sans circuit intermédiaire[8]

II.2.2 Convertisseurs AC-AC directs

La structure de convertisseur direct AC-AC (convertisseur matriciel triphasé) est encore peu répandue, mais elle est très prometteuse si bien qu'elle fait l'objet d'une recherche intensive. Les convertisseurs matriciels ou cyclo-convertisseurs à commutations forcées ont été l'objet d'un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique en particulier pour les applications pour lesquelles

l'encombrement, la masse et la fiabilité sont des paramètres importants. La caractéristique clé d'un convertisseur AC-AC direct est la possibilité d'effectuer directement une conversion AC-AC sans avoir besoin d'éléments de stockage d'énergie[43][9].

II.2.2.1 Cycloconvertisseur

C'était le premier convertisseur AC-AC direct, de forte puissance, dont la fréquence de sortie est limitée. Son principe du fonctionnement est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif [9]. Il est utilisé dans des applications et dans des procédés à grandes dynamiques de la métallurgie ou l'on recherche des performances en couple. Il peut alimenter aussi bien des machines synchrones que des machines asynchrones. Malgré sa simplicité apparente, ce convertisseur présente l'inconvénient souvent disqualifiant de perturber son réseau électrique d'alimentation par des harmoniques et des fluctuations de puissance réactive [40].

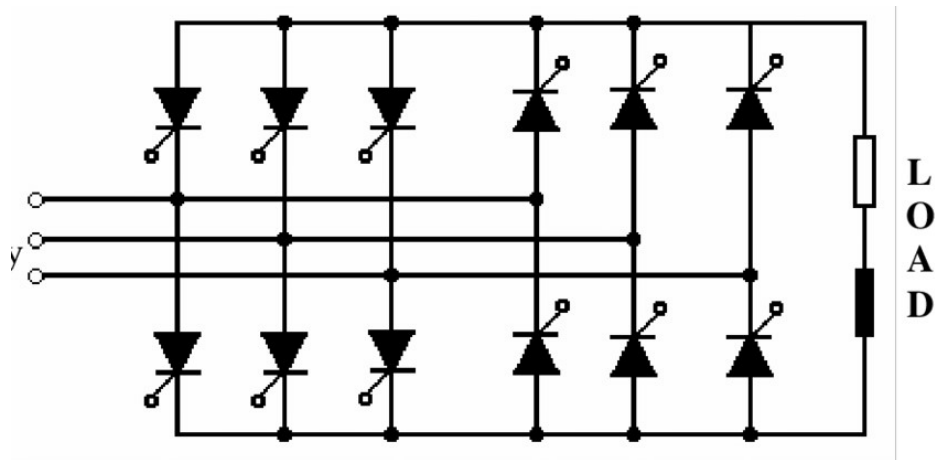


Figure II-5: le cyclo-convertisseur

II.2.2.2 Convertisseurs matriciels

Il a été d'abord présenté en 1979 par Peter Wood [34] Basé sur le travail de B.Pelly et de L. Gyugyi. Plus tard, Alesina et Venturini ont employé cette topologie pour développer le premier convertisseur alternatif/ alternatif à commutation forcée. Aux alentours de 1988 Venturini a présenté des résultats d'une première réalisation d'un convertisseur matriciel [41].

Les convertisseurs matriciels présentent les convertisseurs qui font l'objet de recherches et de développement depuis une trentaine d'année à cause de sa possibilité de remplacer les convertisseurs classiques indirects (AC-DC-AC) avec un bus continu capacitif notamment pour les systèmes embarqués [9]. Il présente plusieurs avantages par rapport à ce dernier. Il est plus fiable et moins volumineux à cause de l'absence des capacités DC et il peut être encapsulé dans un module semi-conducteur. Sa commande est instantanée et il est contrôlable en entrée (déphasage du courant par rapport à la tension d'entrée) et en sortie (tension de sortie). Par contre il a deux majeurs problèmes qui sont la limite du rapport de tension (pour les modulations normales) et l'influence de l'entrée sur la sortie [41].

Les topologies du convertisseur matriciel peuvent être divisées en deux types : le convertisseur matriciel direct et le convertisseur matriciel indirect. La topologie d'un convertisseur matriciel direct conventionnel bidirectionnel de 3 x 3 est représentée dans la figure II.5. En appliquant une stratégie de modulation appropriée, telle que la modulation de vecteur d'espace, le convertisseur matriciel sera capable de générer des formes d'onde d'entrée et de sortie sinusoïdale de haute qualité[9].

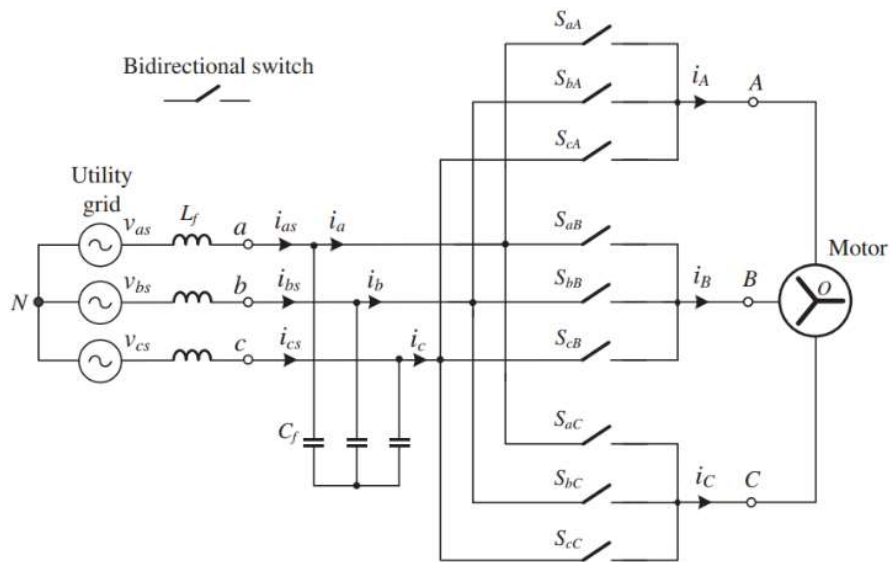


Figure II-6: Convertisseur matriciel classique à entrée triphasée et sortie triphasée (3 × 3) [40]

II.3 Convertisseurs Matriciels multiniveaux MMC

Ce type de convertisseur est le résultat de l'intégration du convertisseur multiniveau et du convertisseur matriciel. Une classification des différentes topologies de MMC résultant du mariage des deux types de convertisseurs est présentée à la figure II-7. Cette classification montre que la combinaison de la topologie DMC avec le convertisseur multiniveau à pont en H ou le convertisseur multiniveau à condensateur volant, donne naissance à la topologie MMC à pont en H ou à la MMC à condensateur volant. D'autre part, l'intégration de la topologie de convertisseur multiniveaux à diode bloquée avec la MCI donne lieu à la topologie MMC à deux étages sans condensateur de stockage. Il convient de noter que la présence de condensateur dans les deux premières topologies, la MMC à pont et la MMC avec condensateur volant, nécessite le contrôle de la tension aux bornes de la liaison en courant continu. C'est un inconvénient majeur de la topologie H-bridge MMC ou de la MMC avec condensateur volant [42].

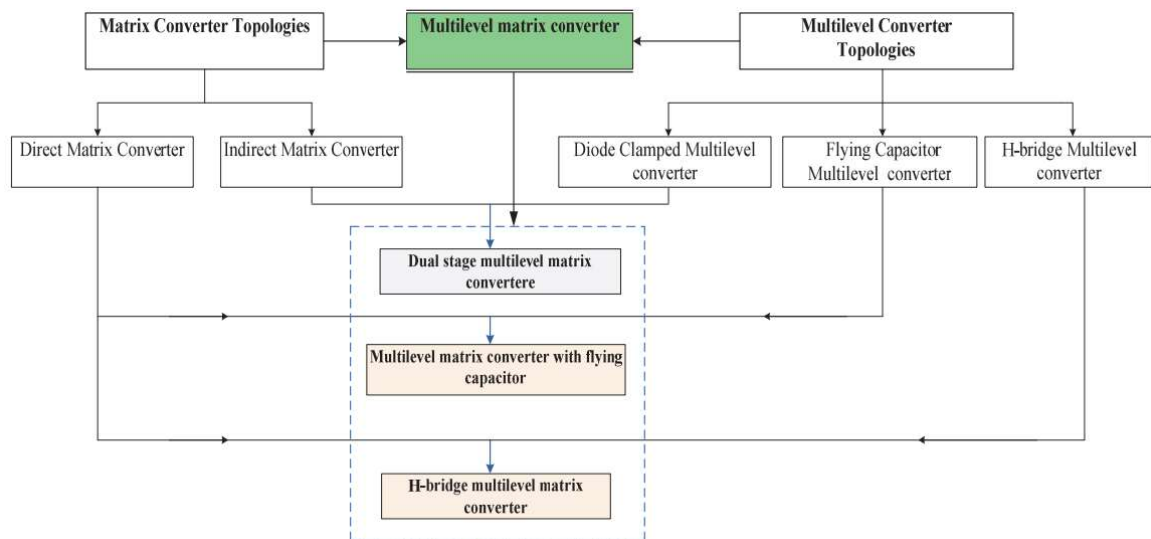


Figure II-7: Classification des convertisseurs multiniveaux [42].

Cette classification montre que la combinaison de la topologie DMC avec le convertisseur multiniveau H-bridge ou le convertisseur multiniveau à FC, donne naissance à la topologie MMC H-bridge ou à la MMC à condensateur flottants. D'autre part, l'intégration de la topologie de convertisseur multiniveaux à diode bloquée avec la MCI illustrée à la figure 7 donne lieu à la topologie MMC à deux étages sans condensateur de stockage, comme le montre la figure 8(a). Il convient de noter que la présence de condensateur dans les deux premières topologies, la MMC à pont et la MMC avec condensateur volant, nécessite le contrôle de la tension aux bornes de la liaison en courant continu. C'est un inconvénient majeur de la topologie H-bridge MMC ou de la MMC avec condensateur volant [42].

pont et la MMC avec condensateur volant, nécessite le contrôle de la tension aux bornes de la liaison en courant continu. C'est un inconvénient majeur de la topologie H-bridge MMC ou de la MMC avec condensateur flottants [42].

II.3.1 Convertisseurs multiniveaux à NPC

Afin de générer un niveau supplémentaire à partir du convertisseur matriciel indirect, il est possible de connecter des diodes volantes ; on obtient ainsi une IMC à trois niveaux au lieu d'un circuit onduleur. Cet étage de sortie est alimenté par un onduleur à trois niveaux utilisant le point neutre de l'alimentation ou le point central des condensateurs de filtrage pour créer le niveau de tension supplémentaire comme indiqué à la figure II-7 ou en utilisant le point central de la diode comme indiqué à la figure II-8 [42].

La structure indirecte matricielle trois niveaux (I3LMC) a été proposée par Kolar et al. Elle est similaire à celle de l'IMC conventionnel en changeant seulement l'onduleur conventionnel deux niveaux par un onduleur à trois niveaux. Cette structure a permis d'avoir des tensions multi niveaux et des performances meilleures que celles de l'IMC conventionnel. Mais sa commande est un peu complexe surtout si on utilise l'algorithme d'équilibrage des tensions des capacités d'entrée [41].

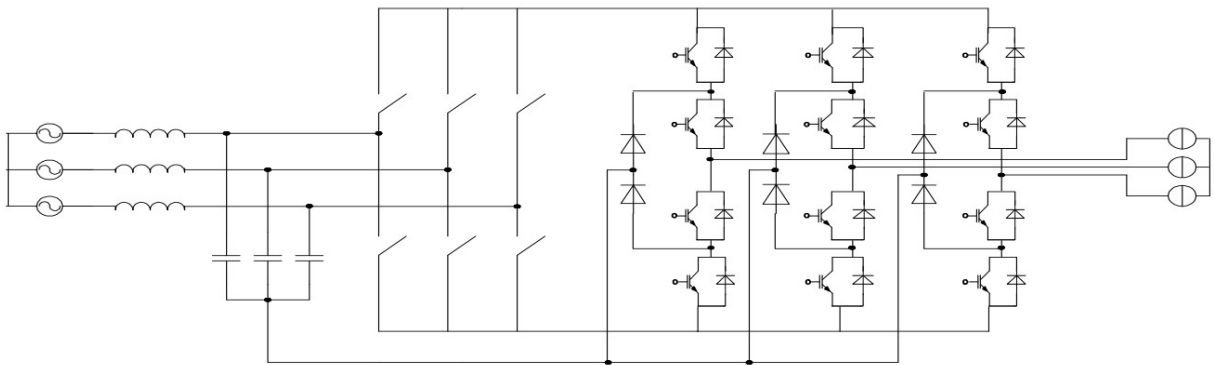


Figure II-8: Convertisseur matriciel multiniveaux à NPC I3LMC [42]

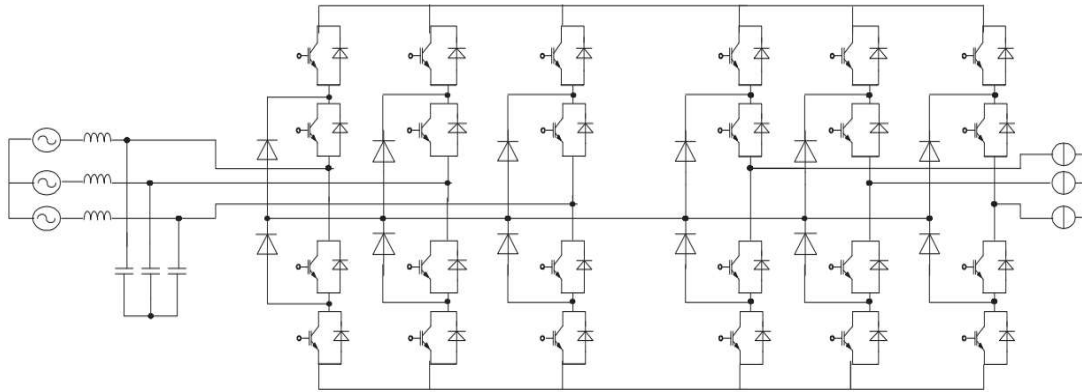


Figure II-9: Convertisseur multiniveaux à NPC [41]

La topologie de la MMC illustrée à la figure II-8 est une combinaison d'un onduleur de source de tension NPC à trois niveaux et d'une IMC. Deux interrupteurs supplémentaires sont connectés dans la liaison DC. Le niveau de tension supplémentaire est obtenu en connectant le point neutre des condensateurs de filtrage d'entrée connectés en étoile au point central (o) du commutateur du point neutre [41].

II.3.2 Convertisseur matriciel multi-niveaux H-bridge

Une structure multi niveaux appelée H-bridge MC a été proposée, analysée et vérifiée expérimentalement par Erikson en [42]. Cette structure est similaire à celle du MC direct mais au lieu d'utiliser des interrupteurs bidirectionnels conventionnels on utilise un CCH-B (clamped capacitor H-bridge) [42]. Cette structure permet de synthétiser la tension d'entrée ainsi que la tension de sortie contrairement au MC où on synthétise la tension d'un côté et le courant de l'autre côté. Elle permet de dépasser la limite du ratio de tension donc la tension ($0 \leq V_s \leq V_{in}$). Cette structure a pour but d'augmenter l'efficacité de la conversion pour les faibles tensions et les faibles puissances mais elle présente plusieurs capacités qui compliquent sa commande et qui ne permettent pas le contrôle du facteur de puissance. Cette structure a été étudiée en détail et appliquée dans les installations éoliennes. Il est possible d'augmenter le nombre de niveaux en mettant en cascade deux ponts H [41].

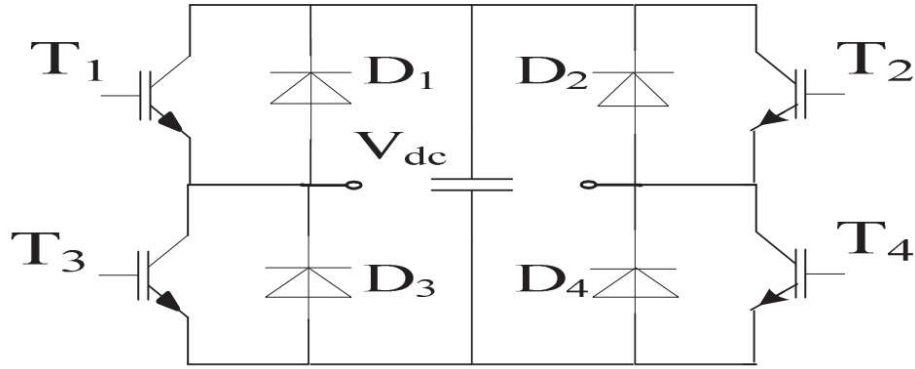


Figure II-10 : une phase du convertisseur matriciel pont-H [42].

II.4 Application des convertisseurs matriciels

Les applications des convertisseurs matriciels sont multiples et variées, chacune est associée à une topologie spécifique de ces derniers. Les convertisseurs matriciels directs sont conçus pour les usages destinés aux machines synchrones et les machines synchrones à aimant permanent [43] alors que les convertisseurs monophasés conventionnels sont utilisés dans les circuits d'alimentation sans coupure [36].

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la présentation des convertisseurs multiniveaux qui sont aujourd'hui considérés comme les systèmes de conversion de puissance de pointe pour les applications exigeantes en termes de puissance et de qualité de l'énergie.

Une première partie est consacrée à exposer les topologies classiques des onduleurs multiniveaux : NPC, FC et CHB qui représentent les structures fondamentales dans ce domaine, une présentation générale avec leur principe de fonctionnement été présenté. Un brief aperçu sur les onduleurs multiniveaux à Z-source a été entamé en mentionnant leur avantages et inconvénients.

La deuxième partie a porté sur la présentation des convertisseur AC-AC qui sont principalement utilisés de nos jours pour la conversion de puissance d'un réseau triphasé à une charge triphasée avec une amplitude de tension et une fréquence arbitraires, selon les besoins, par exemple, pour les entraînements à vitesse variable, Nous avons présenté les convertisseurs indirect avec circuit intermédiaire et sans ce dernier, suivie par les convertisseurs AC- AC direct à savoir :le convertisseur matriciel et le cyclo convertisseur,

Finalement, Nous avons mis en évidence les convertisseurs matriciels multiniveaux qui présentent une grande révolution technique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. S. M. Salem, « Design and Analysis of Five-Level T-Type Power Converters for Rotating Field Drives », p. 207.
- [2] M. Pinard, *Convertisseurs et électronique de puissance : Commande, description, mise en oeuvre - Applications avec Labview*. Dunod, 2007.
- [3] A. I. Maswood et H. D. Tafti, *Advanced multilevel converters and applications in grid integration*. John Wiley & Sons, 2019.
- [4] C. W. Flairty, « A 50-KVA Adjustable-Frequency 24-Phase Controlled Rectifier Inverter », *IRE Trans. Ind. Electron.*, vol. IE-9, n° 1, p. 56-60, mai 1962, doi: 10.1109/IRE-IE.1962.5007088.
- [5] W. McMurray, « Fast response stepped-wave switching power converter circuit », US3581212A, mai 25, 1971.
- [6] A. Nabae, I. Takahashi, et H. Akagi, « A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-17, n° 5, p. 518-523, sept. 1981, doi: 10.1109/TIA.1981.4503992.
- [7] C. Rizet, « Amélioration du rendement des alimentations sans interruption », 2011.
- [8] Sabri SEKHRI, « Contribution à la réalisation du convertisseur matriciel multiniveaux », Mémoire de projet de fin d'études, ENP, 2018.
- [9] « Three-Phase AC-AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology Matrix-Reactance Frequency Converters Concept - Recherche Google ». <https://www.google.com/search?q=Three-Phase+AC%E2%80%93AC+Power+Converters+Based+on+Matrix+Converter+Topology+Matrix-Reactance+Frequency+Converters+Concept&aq=chrome..69i57.3996j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8> (consulté le août 26, 2020).
- [10] T. Meynard et H. Foch, « Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage-source inverters », 1992, p. 397-403.
- [11] J. Rodriguez *et al.*, « Multilevel Converters: An Enabling Technology for High-Power Applications », *Proc. IEEE*, vol. 97, n° 11, p. 1786-1817, nov. 2009, doi: 10.1109/JPROC.2009.2030235.
- [12] « (18) A new modular voltage source inverter topology | Request PDF ». https://www.researchgate.net/publication/205337714_A_new_modular_voltage_source_inverter_topology (consulté le août 21, 2020).
- [13] O. Ellabban et H. Abu-Rub, « Z-source inverter: Topology improvements review », *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 10, n° 1, p. 6-24, 2016.
- [14] P. C. Loh, F. Gao, F. Blaabjerg, S. Y. C. Feng, et K. N. J. Soon, « Pulsewidth-Modulated Z-Source Neutral-Point-Clamped Inverter », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, n° 5, p. 1295-1308, 2007.
- [15] A. Salem et M. Abido, « T-type multilevel converter topologies: A comprehensive review », *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 44, n° 3, p. 1713-1735, 2019.

- [16] Martin AIMÉ, « Évaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques Application aux nouvelles structures multicellulaires », PhD thesis, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2003.
- [17] S. A. Gonzalez, S. A. Verne, et M. I. Valla, *Multilevel Converters for Industrial Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [18] J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai, et Fang Zheng Peng, « Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, n° 4, Art. n° 4, août 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.801052.
- [19] D. G. H. A. Lipo, *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*. Wiley-Blackwell, 2003.
- [20] 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, oct. 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.882022.
- [21] L. Franquelo, J. Rodriguez, J. Leon, S. Kouro, R. Portillo, et M. Prats, « The age of multilevel converters arrives », *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 2, n° 2, p. 28-39, juin 2008, doi: 10.1109/MIE.2008.923519.
- [22] J. Song Manguelle, « Convertisseurs multiniveaux asymétriques alimentés par transformateurs multi-secondaires basse-fréquence », EPFL, 2004.
- [23] 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.
- [24] 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, n° 2, p. 256-263, mars 2001, doi: 10.1109/63.911150.
- [25] 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.
- [26] 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, n° 5, p. 1130-1138, oct. 1996, doi: 10.1109/28.536875.
- [27] 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.
- [28] 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/EEEIC.2016.7555722.
- [29] S. Kouro *et al.*, « Recent advances and industrial applications of multilevel converters », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, n° 8, p. 2553-2580, 2010.
- [30] 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, n° 4, p. 1294-1306, 2010.
- [31] S. S. Lee et K.-B. Lee, « Dual-T-type seven-level boost active-neutral-point-clamped inverter », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, n° 7, p. 6031-6035, 2019.
- [32] A. Alesina and M. G. B. Venturini, "Analysis and design of optimum-amplitude nine-switch direct AC-AC converters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 4, pp. 101-112, 1989.

- [33] Z. Idris, M. K. Hamzah, and M. F. Saidon, "Implementation of Single-Phase Matrix Converter as a Direct AC-AC Converter with Commutation Strategies," in *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE, 2006*, pp. 1-7.
- [34] Z. Idris, S. Z. Mohammad Noor, and M. K. Hamzah, "Safe Commutation Strategy in Single Phase Matrix Converter," in *Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on, 2005*, pp. 886-891.
- [35] A. Zuckerberger, D. Weinstock, and A. Alexandrovitz, "Single-phase matrix converter," *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, vol. 144, pp. 235-240, 1997.
- [36] A. Zuckerberger, D. Weinstock, and A. Alexandrovitz, "Single-phase matrix converter," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 144, no. 4, pp. 235–240, 1997.
- [37] M.-K. Nguyen, Y.-G. Jung, Y.-C. Lim, and Y.-M. Kim, "A single-phase Z-source buck–boost matrix converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 2, pp. 453–462, 2009.
- [38] H. F. Ahmed, H. Cha, A. A. Khan, J. Kim, and J. Cho, "A single-phase buck–boost matrix converter with only six switches and without commutation problem," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 2, pp. 1232–1244, 2016.
- [39] H. F. Ahmed, H. Cha, and A. A. Khan, "A single-phase buck matrix converter with high-frequency transformer isolation and reduced switch count," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 9, pp. 6979–6988, 2017.
- [40] « (15) (PDF) Review of three-phase PWM AC-AC converter topologies », *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/224241357_Review_of_three-phase_PWM_AC-AC_converter_topologies (consulté le août 26, 2020).
- [41] A. BENACHOUR, « Commande sans Capteur basée sur DTC d'une Machine Asynchrone alimentée par Convertisseur Matriciel », Ecole Nationale Polytechnique, 10, Avenue Pasteur, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie, 2017.
- [42] « (15) (PDF) Advanced topologies of multilevel matrix converter STA 2015 », *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/329357958_Advanced_topologies_of_multilevel_matrix_converter_STA_2015 (consulté le août 26, 2020).
- [43] R. K. Gupta, K. K. Mohapatra, A. Somani, and N. Mohan, "Direct-matrix-converter-based drive for a three-phase open-end-winding ac machine with advanced features," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4032–4042, 2010.

