

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**وزارة التعليم العالي والبحث العلمي**

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'électrotechnique

N° : ...../2024

**MEMOIRE DE MASTER**

**DOMAINE : Sciences et Technologies**

**FILIERE: Électromécanique**

**SPECIALITE : Électromécanique**

**Thème**

**Étude des convertisseurs multi-niveaux utilisés dans  
les systèmes photovoltaïques**

**Présenté Par : Boudraoun Faycel  
Boulmaiz Mohieddine**

**Date de soutenance : 29/ 06/2024**

**Jury de Soutenance**

**Président : Hacib Tarik**

**Grade : Professeur**

**Encadreur : Kimouche Abdelghani**

**Grade : MAA**

**Examineur : Boulassel Ammar**

**Grade : MAA**

Session 2023/2024

# Remerciement

*Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet de fin d'études de Master en « électromécanique » au **département d'Electrotechnique**, à l'Université de Mohamed seddik ben Yahia de Jijel.*

*Tout d'abord merci au bon Dieu le tout puissant, de nous avoir donné la santé, la force, la patience et la volonté pour réaliser ce travail dans des meilleures circonstances et en bon état.*

*Nos premiers remerciements s'adressent à notre directeur de mémoire, Monsieur **KIMOUCHE ABDELGHANI**, qui a bien voulu nous proposer ce thème et nous aider à sa réalisation. Nous le remercions tout particulièrement, pour l'intérêt qu'il a porté à ce sujet, pour la confiance qu'il nous a accordé ainsi que pour les conseils qu'il a sus nous prodiguer.*

*Mes vifs remerciements pour son aide précieuse, ses qualités scientifiques et humaines. Je lui exprime toute ma gratitude.*

*Nous voudrions aussi exprimer l'honneur que nous font les membres du jury, d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.*

*Que ceux qui se sentent oubliés, trouvent dans cette phrase ma profonde gratitude et mes remerciements a les 'enseignants pour l'aide et le soutien apporté durant ces années*

*Nous tenons à remercier ensuite la direction de l'université, et notre chef de département d'Electrotechnique, Pr. **Moussa Lafouli**.*

*Nous adressons également nos profondes considérations à tous ; qui de loin ou de près, ont aidé à la réussite de ce projet.*

*Enfin, nous tenons à remercier nos chères familles qui nous ont encouragés et aidés tout le long des années d'études.*

# *Dédicaces*

Je dédie ce travail à mes chers parents

Ma Mère

Vous m'avez donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir

Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je vous port. J'avoue vraiment que vous êtes pour moi la lumière qui me guide vers le chemin de la réussite. C'est à vous que je dois mon succès

En témoignage, je vous offre ce modeste travail pour vous remercie vos sacrifices consentis et pour l'affection dont vous m'avez toujours témoignée.

Mon père

L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon respect

Aucune dédicace ne saurait exprimer ma santé et longue vie

A Mes frères et ma soeur

Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, votre joie et votre route et vous aide à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers

Ames chères amies je vous remercie pour vos amitiés chères à mon cour, et je vous souhaite tout le bonheur du monde.

*B. Fayçal*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma mère : Zahia*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'affection et l'amour que j'éprouve envers toi. Puisse ce travail être la récompense de tes soutiens moraux et sacrifices.*

*Mon père : abdelmalek*

*Puisse ce modeste travail constituer une légère compensation pour tous les nobles sacrifices que tu t'es imposé pour assurer mon bien être et mon éducation.*

*Mes frères et sœurs :*

*Aymen, ali, fatima zohra, rayane*

*Tous mes ami (es) : abdeslem, yasser, youcef, idris, hamza, .....*

*à tous ceux que j'aime,*

*Pour tous ceux qui m'ont aidé.*

# SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## *Chapitre I : Généralités sur les Onduleurs Multiniveaux*

I.1.introduction.....	3
I.2.Convertisseurs DC-AC ou onduleurs.....	3
I.3.Classification des onduleurs.....	4
I.3.1.Onduleur autonome.....	4
I.3.1.Onduleur non autonome.....	4
I.4.Onduleur multi-niveaux.....	4
I.4.1.Onduleurs à diodes de bouclage NPC .....	5
I.4.1.1.Principe de fonctionnement de la structure NPC à 3 niveaux.....	7
I.4.1.2.Principe de fonctionnement de la structure NPC à 5 niveaux.....	9
I.4.1.3.Principe de fonctionnement de la structure NPC à 7 niveaux.....	13
I.4.2.Onduleurs multi niveaux à condensateurs flottants.....	17
I.4.2.1.Principe de fonctionnement à condensateurs flottants 3 niveaux.....	18
I.4.3.Onduleurs Multiniveaux en cascade.....	20
I.4.3.1.Principe de fonctionnement d'onduleur de type cascade à 3 niveaux.....	22
I.4.3.2.Principe de fonctionnement d'onduleur de type cascade à 5 niveaux.....	24
I.4.3.3.Principe de fonctionnement d'onduleur de type cascade à N niveaux.....	26
I.4.4.Autres topologies.....	27
I.5.Comparaison entre les trois principaux convertisseurs multiniveaux.....	28
I.6.Conclusion.....	29

## *Chapitre II : systèmes photovoltaïques et les onduleurs multiniveaux symétriques et asymétriques associés*

II.1.introduction.....	30
II.2.Principe de production d'énergie photovoltaïque.....	30
II.3.Energie photovoltaïque.....	30
II.3.1.photopile (Cellule photovoltaïque).....	30

II.3.2.Constitution d'un générateur photovoltaïque (Gpv).....	31
II.3.2.1.Principe.....	31
II.3.3.Protections classiques d'un générateur photovoltaïque.....	32
II.3.4.Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	33
II.3.4.1.Cas d'une cellule idéale.....	33
II.3.4.2.Cas d'une cellule réelle.....	33
II.3.5.Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	34
II.4.Stockage d'énergie électrique.....	38
II.4.1.batteries (par voie électrochimique).....	38
II.4.2.supercondensateurs (par voie électrostatique).....	39
II.5.Convertisseurs photovoltaïques.....	39
II.5.1.Connexion directe d'un module photovoltaïque.....	40
II.5.2.Connexion avec les convertisseurs DC-DC.....	40
II.5.3.Connexion avec les convertisseurs DC/AC.....	40
II.6.Classification d'un système solaire photovoltaïque.....	41
II.6.1.Système photovoltaïque autonome.....	41
II.6.2.Système photovoltaïque hybride.....	42
II.6.3.Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	42
II.7.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	43
II.8.Onduleurs multi-niveaux symétrique et asymétrique appliqué aux systèmes photovoltaïques .....	43
II.8.1.Onduleurs multiniveaux symétriques.....	43
II.8.2.Onduleurs multiniveaux asymétriques.....	44
II.8.3.Principe de fonctionnement .....	45
II.9.Conclusion.....	50

### ***Chapitre III : Simulations des différents types d'onduleur multiniveaux***

III.1.Introduction.....	52
III.2.Stratégie de commande d'onduleur.....	52

III.2.1. Commande en pleine onde.....	52
III.2.2. Commande MLI Sinus-Triangle.....	53
III.3. Simulation d'un onduleur multiniveaux commandé par une pleine onde.....	55
III.3.1. Simulation d'un onduleur NPC trois niveaux monophasés.....	55
III.3.2. Simulation d'un onduleur NPC cinq niveaux monophasés.....	56
III.3.3. Simulation d'un onduleur NPC sept niveaux monophasés.....	57
III.3.4. Simulation d'un onduleur cascade pont H monophasés.....	59
III.3.5. Simulation d'un onduleur cascade cinq niveaux monophasés.....	60
III.3.6. Simulation d'un onduleur cascade sept niveaux monophasés.....	61
III.3.7. Simulation d'un onduleur cascade neuf niveaux monophasés.....	62
III.4. Simulation d'un onduleur multiniveaux commandé par une MLI sinusoïdale-triangle.....	65
III.4.1. Simulation d'un onduleur NPC trois niveaux monophasés.....	65
III.4.2. Simulation d'un onduleur NPC cinq niveaux monophasés.....	66
III.4.3. Simulation d'un onduleur NPC sept niveaux monophasés.....	67
III.4.4. Simulation d'un onduleur NPC trois niveaux triphasé.....	69
III.4.5. Simulation d'un onduleur NPC cinq niveaux triphasé.....	71
III.4.6. Simulation d'un onduleur NPC sept niveaux triphasé.....	72
III.4.7. Simulation d'un onduleur cascade trois niveaux monophasés.....	75
III.4.8. Simulation d'un onduleur cascade cinq niveaux monophasés.....	76
III.4.9. Simulation d'un onduleur cascade sept niveaux monophasés.....	77
III.5. Conclusion.....	80

***Chapitre IV : Application sur les onduleurs multiniveaux asymétriques***

IV.1. Introduction.....	81
IV.2. Structure et mode de fonctionnement du convertisseur Boost.....	81
IV.2.1. Simulation du convertisseur Boost.....	81
IV.2.2. Résultats de simulation.....	82
IV.2.3. Utilisation du convertisseur boost et l'onduleur dans le un système photovoltaïque.....	82

IV.3.Simulation d'un onduleur multiniveaux symétriques et asymétriques.....	84
IV.3.1.Onduleurs multiniveaux symétriques deux ponts ( $U_{d2} = U_{d1}$ ).....	84
IV.3.2.Onduleurs multiniveaux asymétriques deux ponts ( $U_{d2} = 2U_{d1}$ ).....	85
IV.3.3.Onduleurs multiniveaux asymétriques deux ponts ( $U_{d2} = 3U_{d1}$ ).....	86
IV.4.Conclusion.....	87
Conclusion générale.....	88



# Liste des Symboles et Abréviations

## Symboles

<b>V<sub>ao</sub></b>	Tension entre le point a et le point o (V)
<b>N</b>	Nombre de niveau de tension de sortie
<b>V<sub>co</sub></b>	Tension de circuit-ouvert (V)
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court-circuit (A)
<b>I<sub>ph</sub></b>	Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation (A)
<b>I<sub>d</sub></b>	Courant de diode (A)
<b>I</b>	Courant de la cellule photovoltaïque (A)
<b>V</b>	Tension de la cellule photovoltaïque (V)
<b>R<sub>p</sub></b>	Résistances shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance série de la cellule
<b>P<sub>max</sub></b>	Puissance maximale (W)
<b>V<sub>opt</sub></b>	Tension optimal
<b>I<sub>opt</sub></b>	Courant optimal.
<b>AC</b>	Courant alternatif
<b>DC</b>	Courant continu.
<b><math>\beta</math></b>	Coefficients de dissymétrie partielle
<b><math>\eta</math></b>	Rendement
<b>C</b>	Condensateur
<b>D</b>	Diode
<b>R</b>	Résistance
<b>L</b>	Inductance
<b>FF</b>	Facteur de forme
<b>m</b>	Rapport de modulation
<b><i>f<sub>r</sub></i></b>	Fréquence du signal de référence (Hz)
<b><i>f<sub>p</sub></i></b>	Fréquence de la porteuse (Hz)
<b>r</b>	coefficient de réglage

## Abréviations

NPC	Onduleur à diodes de bouclage (Neutral Point Clamped)
CHB	Onduleur en pont H cascadi (Cascade H-Bridge)
FC	Onduleur à condensateur flottant (Flying Capacitor)
CC	Courant continu
CA	Courant alternatif
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
THD	Taux de Distorsion Harmonique
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque

## Résumé

Le besoin énergétique mondial qui est toujours en croissance ainsi que le caractère polluant des énergies fossiles ont augmenté l'intérêt du développement des énergies renouvelables. Parmi elles, l'énergie photovoltaïque qui s'avère prometteuse et qui permet de générer des tensions et des courants continus. Néanmoins, La plupart des appareils électriques fonctionnent au courant alternatif de 220V, 50Hz, ce qui conduit à employer des onduleurs bien adaptés. Dans ce contexte, ce travail a pour but d'étudier les topologies d'onduleurs multi-niveaux qui peuvent être utilisés dans les systèmes photovoltaïques. En premier lieu des généralités sur les onduleurs multiniveaux et sur les systèmes PV ont été abordées. Après le chapitre trois a fait l'objet de simulations par Matlab-Simulink de ces types de convertisseurs qui permettent de déterminer les grandeurs de sorties et le THD des courants et tensions en faisant une analyse et comparaison entre ces différents types d'onduleurs. Ensuite, dans le quatrième chapitre, Une application du convertisseur Boost et des onduleurs asymétriques associés aux panneaux photovoltaïques a été également effectuée et analysée.

**Mots clés :** Système PV, Onduleurs multiniveaux, Onduleurs symétrique et asymétriques, convertisseur DC-DC, taux de distorsion harmonique.

## Abstract

The global energy need, which is still growing, as well as the polluting nature of fossil fuels, have increased the interest in the development of renewable energies. Among them, photovoltaic energy, which is showing promise and makes it possible to generate voltages and direct currents. Nevertheless, most electrical appliances operate on alternating current of 220V, 50Hz, which leads to the use of well-adapted inverters. In this context, this work aims to study the topologies of multi-level inverters that can be used in photovoltaic systems. First, generalities about multilevel inverters and PV systems were discussed. After chapter three, Matlab-Simulink simulated these types of converters that allow to determine the output quantities and the THD of currents and voltages by analyzing and comparing these different types of inverters. Then, in the fourth chapter, an application of the Boost converter and the asymmetric inverters associated with the photovoltaic panels was also carried out and analyzed.

**Keywords:** PV system, multilevel inverters, Symmetrical and asymmetrical inverters, DC-DC converter, Harmonic distortion rate

## ملخص

أدت الحاجة العالمية إلى الطاقة، والتي لا تزال تتزايد، فضلاً عن الطبيعة الملوثة للوقود الأحفوري، إلى زيادة الاهتمام بتطوير الطاقات المتجددة. من بينها، الطاقة الكهروضوئية، والتي تظهر واعدة وتجعل من الممكن توليد الفولتية والتيارات المباشرة. ومع ذلك، تعمل معظم الأجهزة الكهربائية على تيار متناوب يبلغ 220 فولت، 50 هرتز، مما يؤدي إلى استخدام محولات جيدة التكيف. في هذا السياق، يهدف هذا العمل إلى دراسة طوبولوجيا المحولات متعددة المستويات التي يمكن استخدامها في الأنظمة الكهروضوئية. أولاً، تمت مناقشة العموميات حول المحولات متعددة المستويات والأنظمة الكهروضوئية. بعد الفصل الثالث، كانت هذه الأنواع من المحولات موضوع عمليات محاكاة بواسطة برنامج ما تلاب سيملينك والتي جعلت من الممكن تحديد كميات للتيارات والفولتية من خلال إجراء تحليل ومقارنة بين هذه الأنواع المختلفة. الخرج ومعدل التشويه التوافقي THD ثم في الفصل الرابع، تم أيضاً تنفيذ وتحليل تطبيق محول التعزيز Boost والمحولات غير المتماثلة المرتبطة بالألواح الكهروضوئية.

**الكلمات المفتاحية:** النظام الكهروضوئي، محولات متعددة المستويات محولات متماثلة وغير متماثلة، محول معدل التشويه التوافقي.

# INTRODUCTION *GÉNÉRALE*



## **Introduction générale**

La production d'énergie est un défi majeur pour les années futures étant donné que les besoins énergétiques mondiaux ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour soutenir leur économie. De nos jours, une grande partie de la production et de la consommation mondiale d'énergie engendre des effets polluants ou des dérèglements climatiques. La consommation des ressources naturelles (fossile ou fissile) réduit inéluctablement les réserves et compromet leur disponibilité pour les générations futures.

Aujourd'hui, le défi mondial est tourné vers les énergies renouvelables, notamment le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la géothermie, la biomasse, les énergies renouvelables sont des énergies liées aux cycles du soleil et de la terre [1].

L'énergie solaire est la source la plus importante par ce que les convertisseurs photovoltaïques convertie directement l'énergie des rayonnements solaires en énergie électrique.

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations photovoltaïques et les équipements industriels est devenue une préoccupation.

Parmi ces convertisseurs utilisés, on trouve les onduleurs de tension qui sont des convertisseurs statiques alimentés soit par des sources continues soit par des systèmes photovoltaïque soit par des batteries d'accumulateur pour fournir des tensions ou courant alternatifs. Ces tensions de sortie sont très riches en harmoniques, d'où la nécessité de les réduire. Outre cela, les onduleurs conventionnels (à deux niveaux) sont limités aux applications de faibles et de moyennes puissances seulement [2].

Dans le cadre de la recherche des méthodes de réduction des harmoniques, plusieurs travaux ont été réalisés sur deux axes. Le premier est l'utilisation des topologies multiniveaux de l'onduleur, alors que le second porte sur la commande de l'ouverture et la fermeture des semi-conducteurs formant l'onduleur (MLI).

Dans les applications de fortes puissances, la structure à multiniveaux est plus adaptée, par rapport à la structure à deux niveaux, du fait que les tensions et les courants de sortie présentent un taux de distorsion harmoniques nettement inférieur.

L'objectif principal de notre projet vise à étudier et comparer les différentes structures des onduleurs multiniveaux (NPC et Cascade) qui peuvent être utilisées dans les systèmes photovoltaïques.

Pour ce faire, le mémoire est devisé en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à l'étude des onduleurs multi-niveaux. Le second chapitre donne une description générale sur le système photovoltaïque. Le troisième chapitre résume les différentes stratégies de commandes des onduleurs multi-niveaux et consacré à la simulation des onduleurs multiniveaux de type NPC et cascade (3, 5, 7et 9 niveaux) en illustrant des tableaux de comparaison des résultats des tensions et courants de sortie ainsi du taux de distorsion d'harmonique (THD) obtenus.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation des onduleurs multiniveaux asymétriques à deux ponts utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Les résultats obtenus sont comparés avec celles trouvés avec les onduleurs multiniveaux symétriques à plusieurs ponts.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation. On exposera aussi les principaux résultats obtenus et on donnera les perspectives à envisager suite à ce travail.

# CHAPITRE I

## GENERALITES SUR

### LES ONDULEURS

### MULTINIVEAUX



## I.1.Introduction

L'électronique de puissance permet d'étudier la conversion de l'énergie électrique réalisée au moyen de convertisseurs utilisant des dispositifs statiques (semi-conducteur) qui sont des dispositifs le plus souvent pilotables, les transferts d'énergie entre la source et le récepteur sont alors maîtrisés. Ces convertisseurs transforment et adaptent les formes des signaux électriques disponibles à la source d'entrée en une forme appropriée au récepteur (charge) à alimenter [3].

Les convertisseurs électriques sont des dispositifs basés sur des composants semi - conducteurs, ainsi que des éléments passifs comme les résistances, les condensateurs et les inductances.

## I.2.Convertisseurs DC-AC ou onduleurs

Un onduleur est un dispositif destiné à convertir le courant continu généré par le générateur PV en courant alternatif. Il utilise des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carré qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. La plupart des onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques.



**Figure I.1** : Schéma de principe de la conversion continu-Alternative (DC-AC).

En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [4].

De nouvelles techniques dites multi-niveaux ainsi que de nouvelles topologies de convertisseurs ont été développées. Elles permettent de générer plusieurs niveaux de tension à la sortie du convertisseur. Le nombre de semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ces topologies augmente avec le nombre de niveaux désirés [5].

Un onduleur est dit "multiniveaux" lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux.



### **I.3. Classification des onduleurs**

#### **I.3.1. Onduleur autonome**

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors ou l'autre semi-conducteur, dans ce cas nous commandons la fréquence, la forme d'onde de la tension de sortie [1]. La nature de la charge est importante pour cette catégorie d'onduleur. Cet onduleur n'est pas réversible.

#### **I.3.2. Onduleur non autonome**

C'est le nom donné au montage redresseur tous thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les entraînements à moteurs électriques) [1]. Son fonctionnement est réversible (Redresseur et onduleur).

#### **I.4. Onduleurs multi-niveaux**

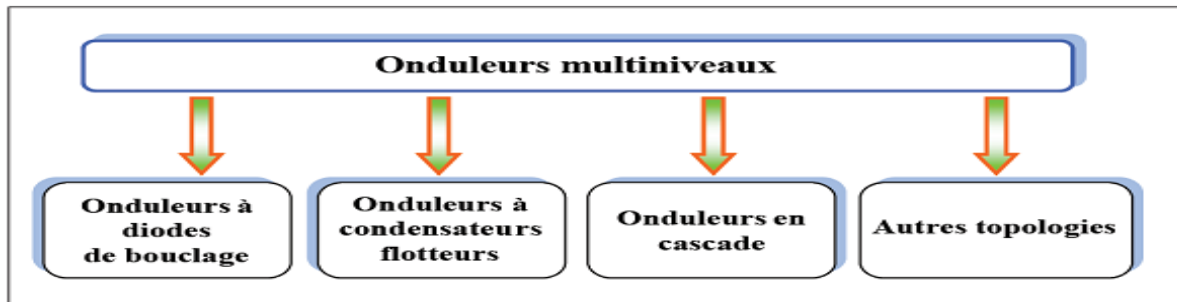
Pour des applications industrielles de moyenne et forte puissance, les tensions appliquées aux bornes des éléments en commutation deviennent très élevées. Pour des raisons liées à la technologie employée, la fréquence de commutation doit être maintenue à une valeur faible et l'utilisation de filtres est nécessaire pour l'obtention d'une puissance appropriée en sortie.

Pour pallier à cet inconvénient, une nouvelle classe de convertisseurs de puissance est apparue, appelée onduleurs multi-niveaux. Ces structures sont obtenues en montant en série des dispositifs de commutations comportant des éléments de stockage passifs et qui sont utilisés pour générer des tensions plus élevée et de meilleure qualité spectrale [6].

Les catégories d'onduleurs multi-niveaux sont actuellement répertoriées.

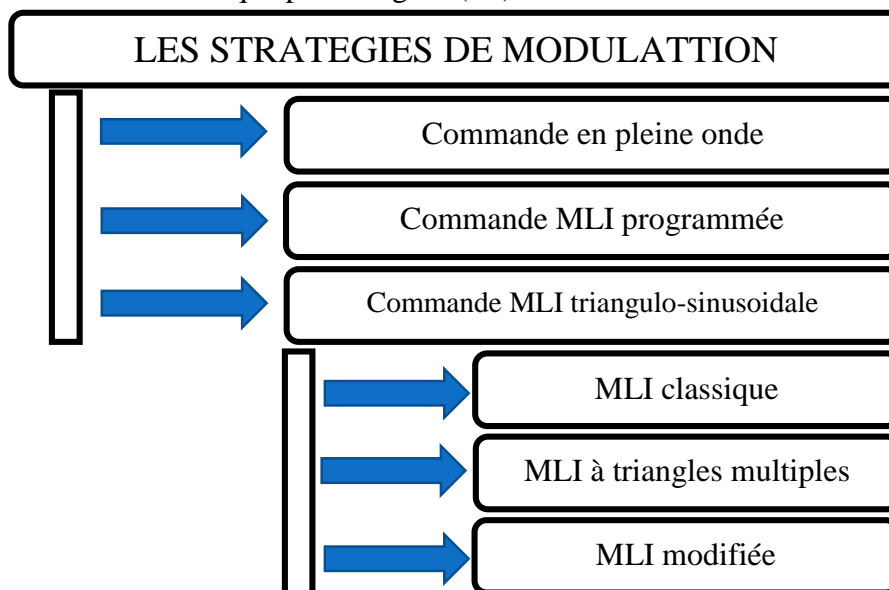
- ❖ Onduleurs à diodes de bouclage (en anglais clamping diodes appelé diode clamp) Neutral Point Clamped (NPC) et Multiple Point Clamped (MPC)
- ❖ Onduleur à condensateur flotteur [en anglais Flying Capacitor] (FC)
- ❖ Onduleur à pont en cascade H-bridge.

La Figure (I.2) représente les trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.



**Figure I.2 :** Différentes topologies de convertisseurs multi-niveaux

De la même façon, les stratégies de modulation et leurs diverses techniques peuvent être divisées comme il est indiqué par la Figure (I.3).



**Figure I.3 :** Les différentes techniques de modulation des onduleurs multiniveaux

#### I.4.1. Onduleurs à diodes de bouclage (NPC)

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi-niveau est le NPC. Elle a été proposée, la première fois en 1981, par Nabae et d'autres chercheurs ont développé les différentes basées sur NPC. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteur [7]. L'onduleur NPC permet de disposer d'un nombre impair de niveaux dans le motif de la tension en sortie. Cependant, l'onduleur Multiple point clamped (NPC) Il se pose le problème d'équilibrage des tensions aux bornes des capacités de source continue. Ces trois types d'onduleurs sont montrés sur les Figure I.4 et I.5 et I.6. Les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence  $o$ . Pour l'obtention d'une tension de  $N$  niveaux,  $N-1$  capacités sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à  $E/(N-1)$ ,  $E$  étant la tension totale appliquée. Les deux interrupteurs dans un même bras sont commandés de façon complémentaire.

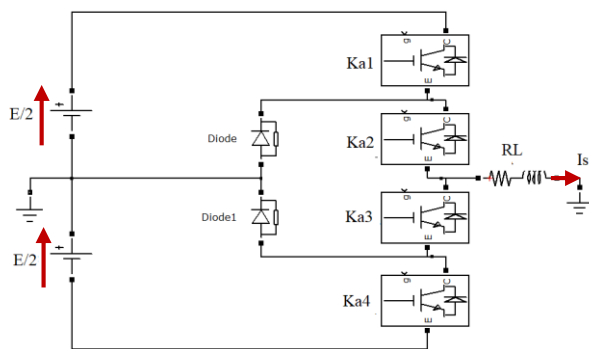


Figure I.4 : Onduleur NPC à trois niveaux

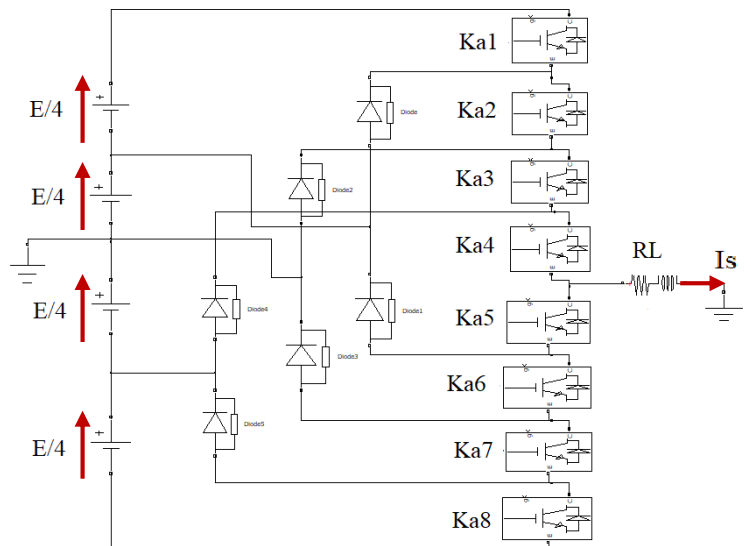


Figure I.5 : Onduleur NPC à cinq niveaux

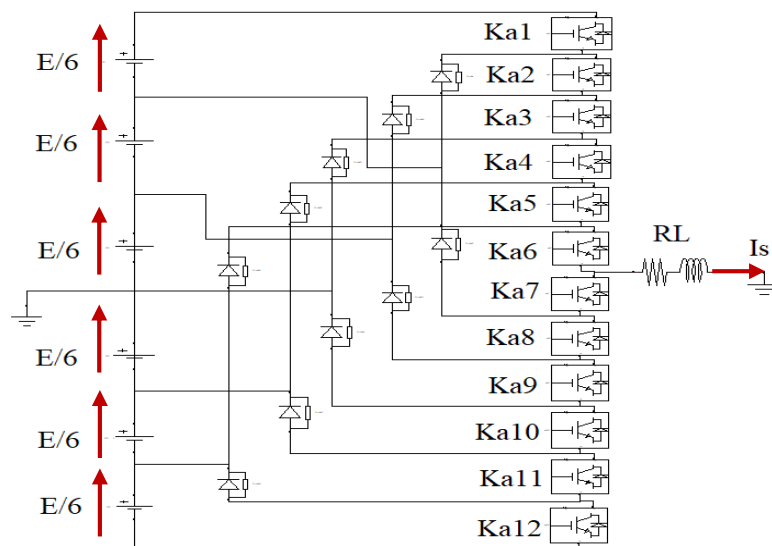


Figure I.6 : Onduleur NPC à sept niveaux

Pour le cas général la Figure (I. 7) représente la structure d'un onduleur NPC à n-niveaux

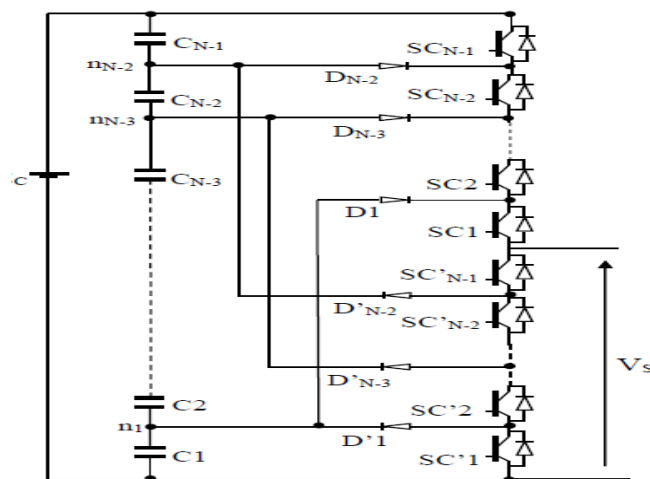


Figure I.7 : Onduleur NPC à n-niveaux

Il présente des avantages par rapport à la topologie d'onduleur à deux niveaux.

Ces avantages sont :

- les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue [8].
- cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux.
- Toutes les phases partagent le même bus continu.
- la fréquence fondamentale assure un haut rendement.
- La méthode de contrôle est relativement simple

Cependant, en utilisant cette topologie, l'expérience pratique a révélé plusieurs difficultés techniques qui compliquent ses applications dans le cas de grandes puissances. Ce sont :

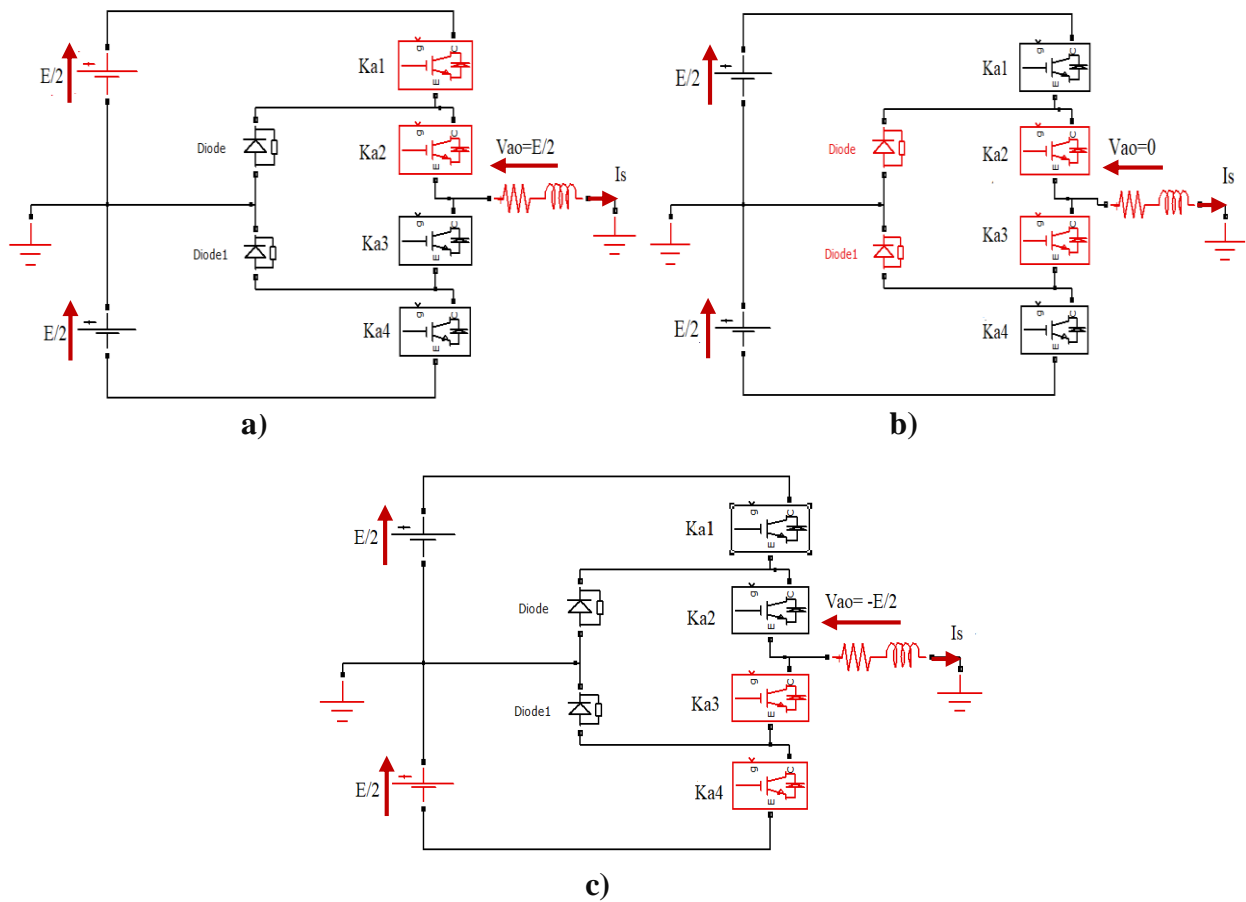
- Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage (diodes Clamped) peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à  $E(N-1)/N$  où  $N$  est le nombre de niveaux. Donc, les connexions des diodes en série pourraient coût être exigées et cela complique la conception et soulève des questions de fiabilité et du de réalisation.
- L'exigence des diodes a fréquence de commutations élevée et qui doivent supporter le courant maximale circulent dans le circuit.
- Lorsque le nombre de niveaux est supérieur à trois, l'équilibre des tensions aux bornes des condensateurs devient très complexe [5].

#### **I.4.1.1.Principe de fonctionnement de la structure NPC à 3 niveaux**

En particulier, pour le NPC à trois niveaux, on a trois séquences de fonctionnement :

- Séquences 1 : Génération du niveau maximum dans ce cas, les interrupteurs  $Ka_1$ ,  $Ka_2$  sont passants et  $Ka_3$ ,  $Ka_4$  sont bloqués comme la montre dans la Figure I.8(a). La tension de sortie  $V_{ao}$  vaut :  $+E/2$ . La tension appliquée aux interrupteurs  $Ka_1$ ,  $Ka_2$  vaut :  $+E/2$ .
- Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire les interrupteurs  $Ka_2$ ,  $Ka_3$  sont passants et  $Ka_1$ ,  $Ka_4$  sont bloqués, dans ce cas le point a est relié directement au point 0 à travers l'une des diodes de maintien, comme la montre dans la Figure I.8(b). La tension de sortie  $V_{ao}$  est donc nulle,  $V_{ao} = 0$ . La tension appliquée aux interrupteurs  $Ka_1$ ,  $Ka_4$  vaut :  $+E/2$
- Séquences 3 : Génération du niveau minimum dans ce cas, les interrupteurs  $Ka_1$ ,  $Ka_2$  sont bloqués et  $Ka_3$ ,  $Ka_4$  sont passants comme la montre dans la Figure I.8(c). La

tension de sortie  $V_{ao}$  vaut :  $-E/2$ . La tension appliquée aux interrupteurs  $Ka1, Ka2$  vaut :  $+E/2$ .



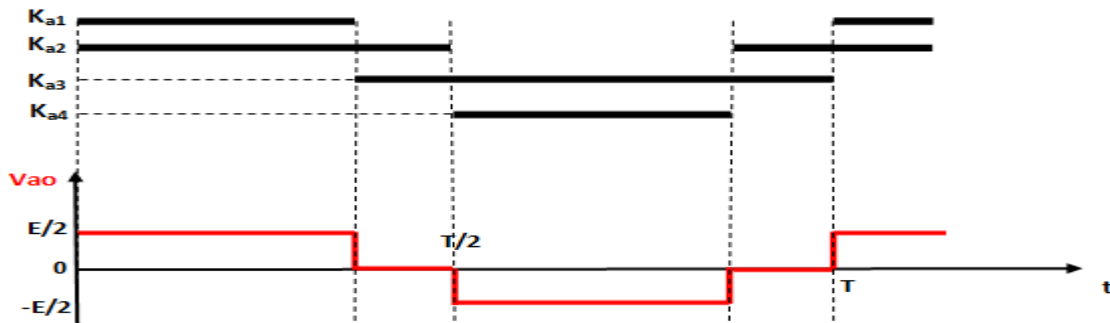
**Figure I.8 :** Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux

Les trois états de commutation possibles sont résumés au Tableau I.1, l'état 1 représente l'interrupteur fermé et l'état 0 représente l'interrupteur ouvert.

**Tableau I.1 :** États de commutation de l'onduleur NPC à trois niveaux

Etat des interrupteurs				Tension de sortie $V_{ao}$
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la Figure (I.9).



**Figure I.9 :** Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type NPC

On remarque sur cette figure que la structure de l'onduleur à trois niveaux réduit à  $E/2$  la tension imposée à chaque interrupteur lorsqu'il est bloqué, alors que dans la structure classique de l'onduleur, cette tension vaut la tension continue complétée  $E$ .

Cette caractéristique de l'onduleur à trois niveaux qui permettent d'augmenter la tension et la puissance en cas d'applications à haute puissance.

La tension de sortie augmente sous forme d'escaliers possède plusieurs paliers en augmentant le nombre de niveaux.

#### I.4.1.2.Principe de fonctionnement de la structure NPC à 5 niveaux

Pour définir la séquence de fonctionnement de l'onduleur, il faut définir d'abord les différents états que peut prendre la tension simple, les états possible d'un seul bras de commutation sont  $2^5=32$  états, qui peuvent être, qui peuvent être représentés par un quadruplet de 0 et 1.seuls les cinq états suivants sont possible nous avons les cinq séquences suivent :

En particulier, pour le NPC à cinq niveaux, on a cinq séquences de fonctionnent :

➤ Séquences 1 :

$K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$  et  $K_{a4}$  sont passants et  $K_{a5}$ ,  $K_{a6}$ ,  $K_{a7}$  et  $K_{a8}$  sont bloqués (Figure I.10), on a la valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +E/2$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{K_{a5}} = V_{K_{a6}} = V_{K_{a7}} = V_{K_{a8}} = +E/4$$

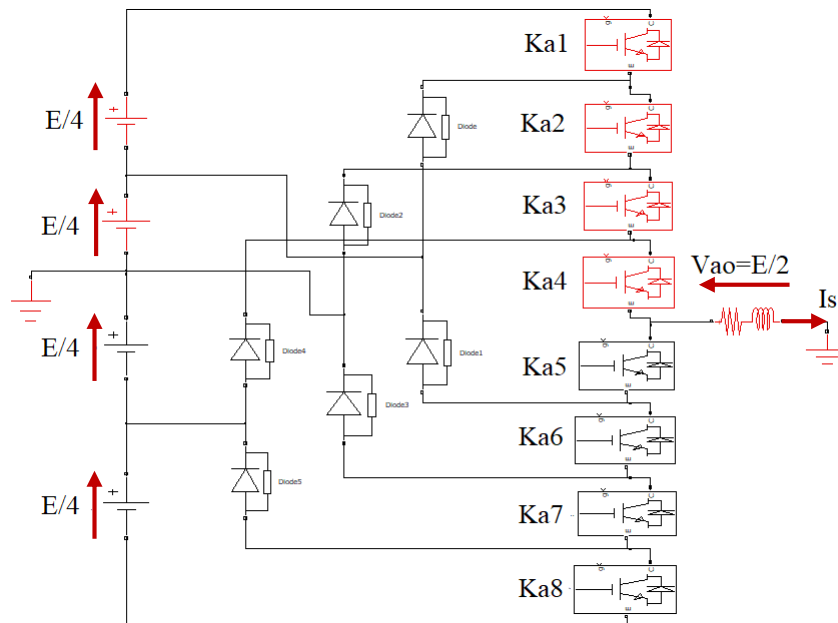


Figure I.10 : 1<sup>ère</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux

➤ Séquences 2 :

Ka2, Ka3, Ka4, et Ka5 sont passants et, Ka6, Ka7, Ka8 et Ka1 sont bloqués (Figure I.11), on a la tension de sortie est :

$$V_{ao} = +E/4$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka6} = V_{Ka7} = V_{Ka8} = +E/4$$

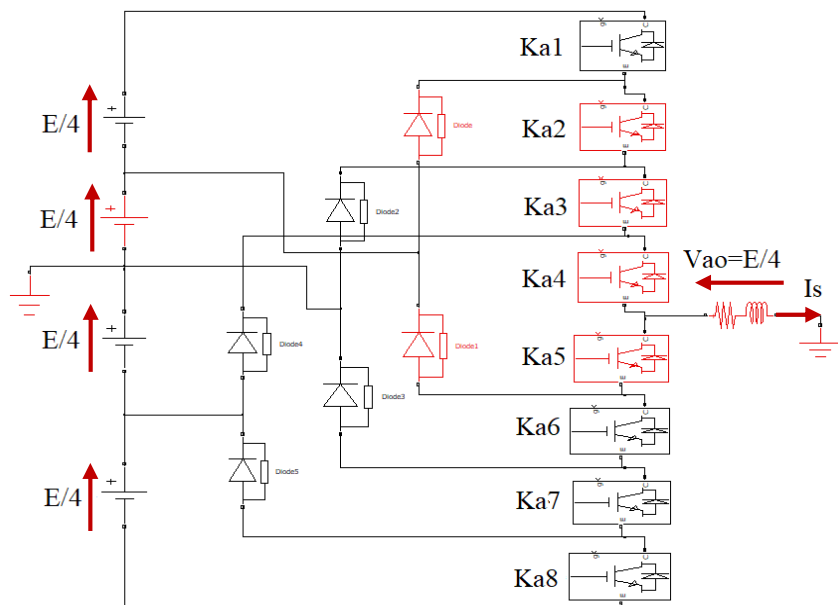


Figure I.11 : 2<sup>ème</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux

➤ Séquence 3 :

Ka3, Ka4, Ka5, et Ka6 sont passants et, Ka7, Ka8, Ka1 et Ka2 sont bloqués (Figure I.12), on a la tension de sortie est :  $V_{ao} = 0$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka7} = V_{Ka8} = +E/4$$

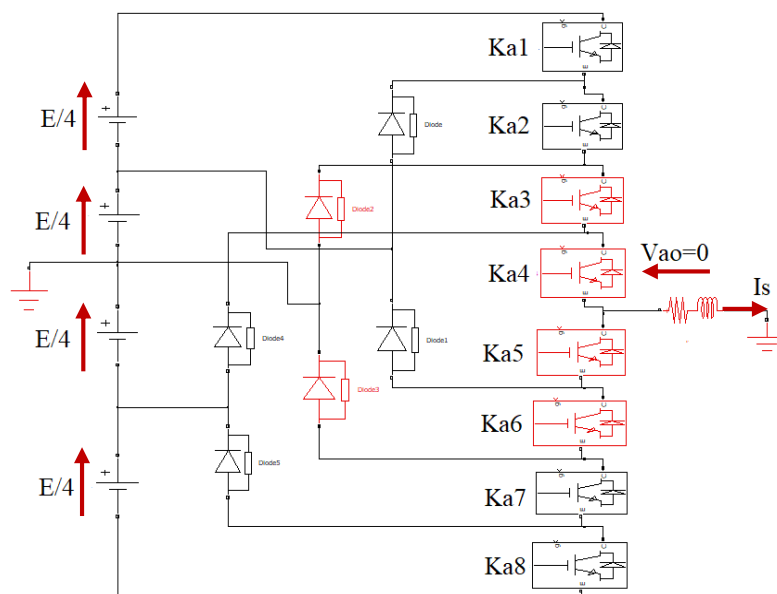


Figure I.12 : 3<sup>ème</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux

➤ Séquence 4 :

Ka4, Ka5, Ka6, et Ka7 sont passants et, Ka8, Ka1, Ka2 et Ka3 sont bloqués (Figure I.13), on a la tension de sortie est :  $V_{ao} = -E/4$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka8} = +E/4$$

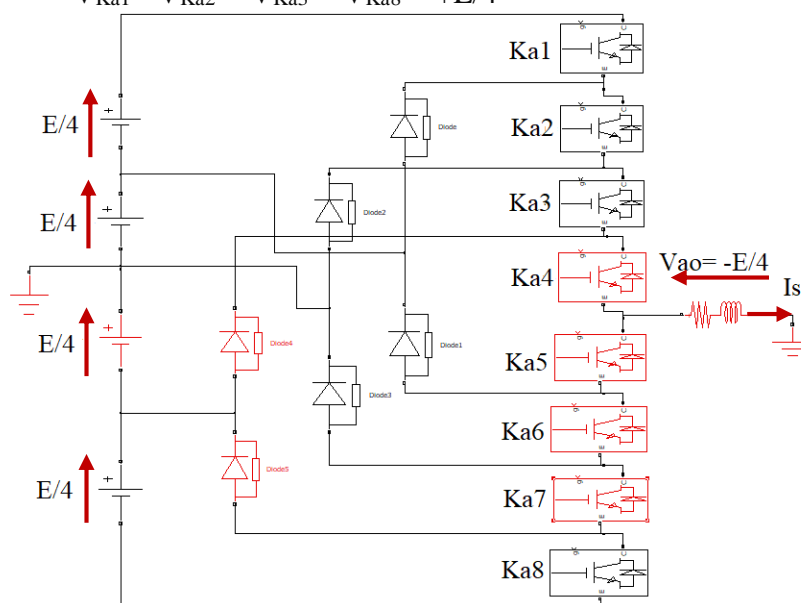


Figure I.13 : 4<sup>ème</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC cinq niveaux



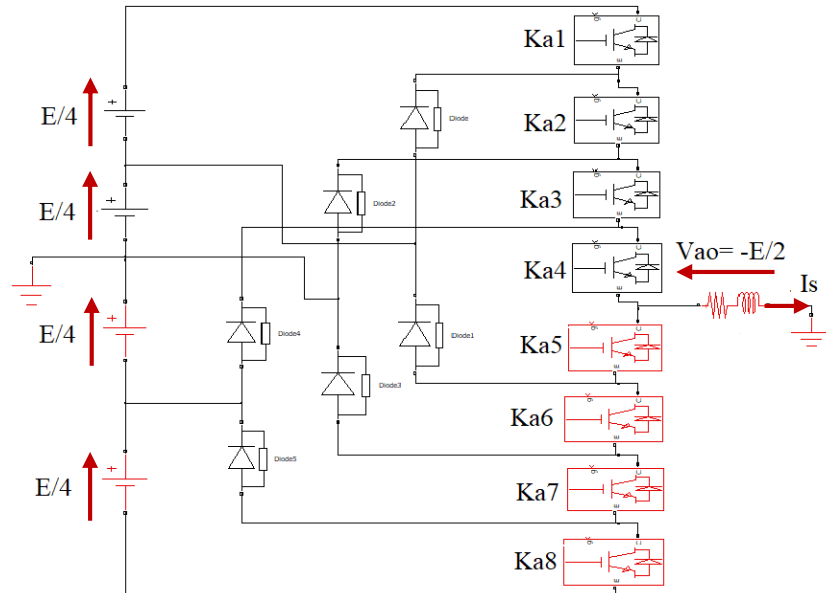
➤ Séquence 5 :

$Ka5$ ,  $Ka6$ ,  $Ka7$ , et  $Ka8$  sont passants et,  $Ka1$ ,  $Ka2$ ,  $Ka3$  et  $Ka4$  sont bloqués (Figure I.14), on a la tension de sortie est :

$$V_{ao} = -E/2$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka4} = +E/4$$



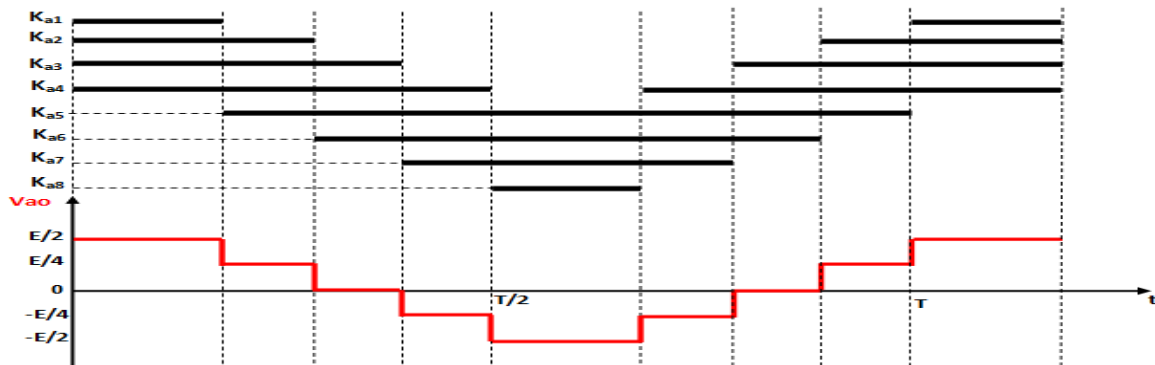
**Figure I.14 :** 5<sup>ème</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux

L'onduleur à cinq niveaux de type NPC possède cinq séquences fonctionnelles qui sont regroupées dans le tableau de commutation suivante :

**Tableau I.2 :** États de commutation de l'onduleur NPC à cinq niveaux

Etat des interrupteurs								Tension de sortie $V_{ao}$
$Ka1$	$Ka2$	$Ka3$	$Ka4$	$Ka5$	$Ka6$	$Ka7$	$Ka8$	
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$E/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-E/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-E/2$

La figure ci-dessous montre la forme d'onde de la tension de sortie  $V_{ao}$  et le signal de commande de chaque interrupteur :



**Figure I.15 :** Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à cinq niveaux de type NPC

### I.4.1.3.Principe de fonctionnement de la structure NPC à 7 niveaux

Une analyse topologique d'un bras de l'onduleur montre sept configurations possibles pour ce dernier. Elles sont décrites comme suit :

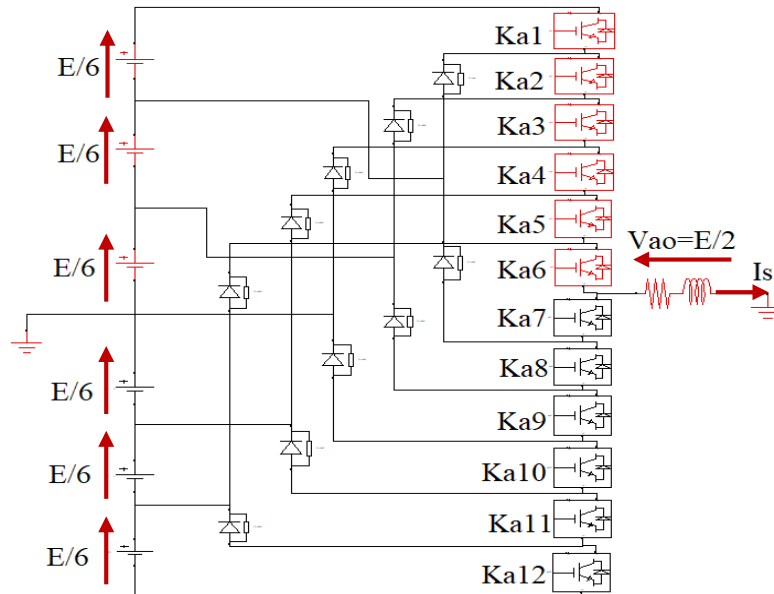
➤ Séquence 1 :

$K_{a1}$ ,  $K_{a2}$ ,  $K_{a3}$ ,  $K_{a4}$ ,  $K_{a5}$  et  $K_{a6}$  sont passants et  $K_{a7}$ ,  $K_{a8}$ ,  $K_{a9}$ ,  $K_{a10}$ ,  $K_{a11}$  et  $K_{a12}$  sont bloqués, on a la valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +E/2$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka7} = V_{Ka8} = V_{Ka9} = V_{Ka10} = V_{Ka11} = V_{Ka12} = +E/6$$



**Figure I.16 :** 1<sup>ère</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux

➤ Séquence2 :

Ka2, Ka3, Ka4, Ka5, Ka6 et Ka7 sont passants et Ka8, Ka9, Ka10, Ka11, Ka12 et Ka1 sont bloqués, on a la valeur de la tension simple de sortie est :  $V_{ao} = +E/3$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka8} = V_{Ka9} = V_{Ka10} = V_{Ka11} = V_{Ka12} = +E/6$$

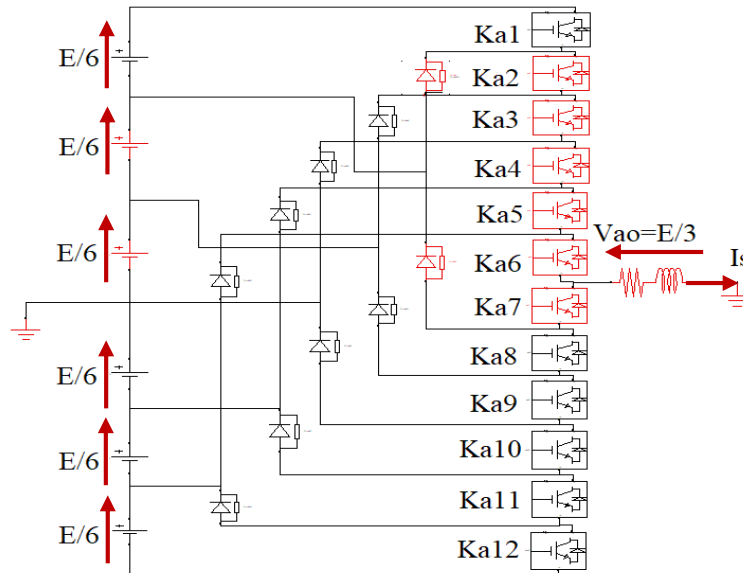


Figure I.17 : 2<sup>ème</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux

➤ Séquence3 :

Ka3, Ka4, Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8 sont passants et Ka9, Ka10, Ka11, Ka12, Ka1 et Ka2 sont bloqués, on a la valeur de la tension simple de sortie est :  $V_{ao} = +E/6$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka9} = V_{Ka10} = V_{Ka11} = V_{Ka12} = +E/6$$

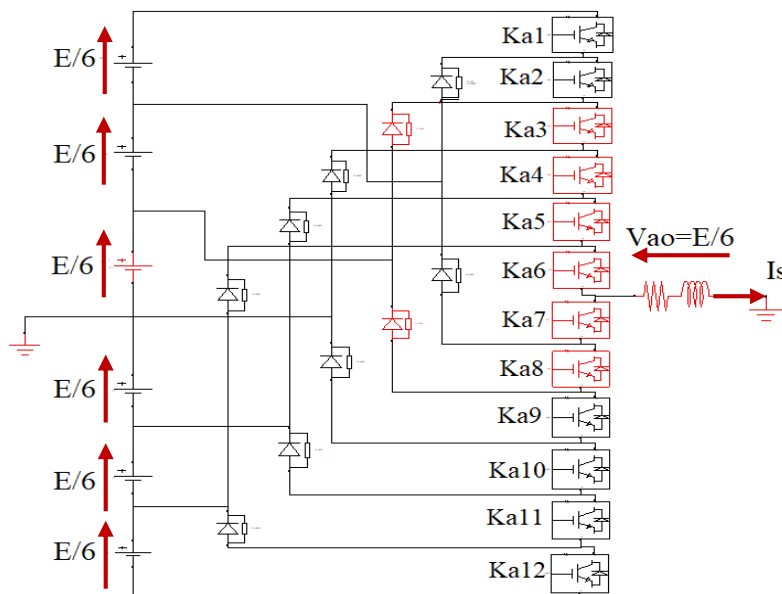


Figure I.18 : 3<sup>ème</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux

➤ Séquence 4 :

Ka4, Ka5, Ka6, Ka7, Ka8 et Ka9 sont passants et Ka10, Ka11, Ka12, Ka1, Ka2 et Ka3 sont bloqués, on a la valeur de la tension simple de sortie est :  $V_{ao} = 0$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

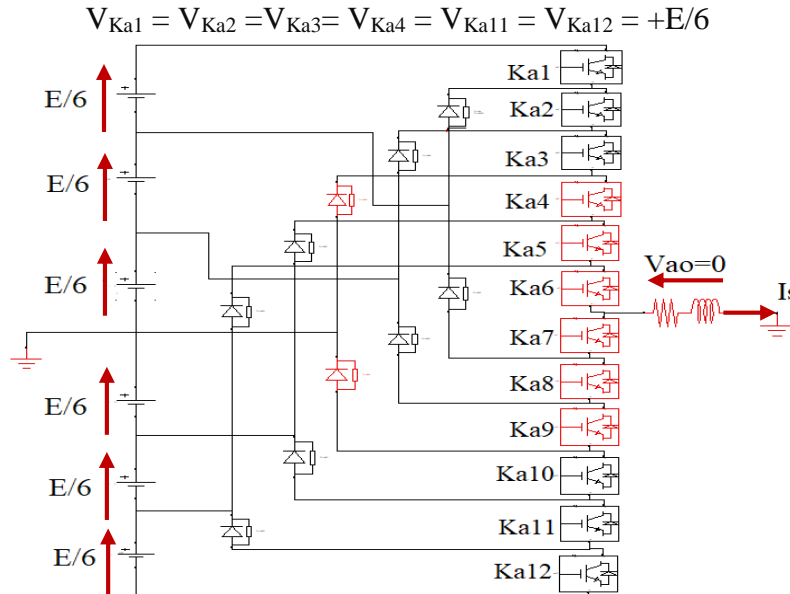


Figure I.19 : 4<sup>ème</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux

➤ Séquence 5 :

Ka5, Ka6, Ka7, Ka8, Ka9 et Ka10 sont passants et Ka11, Ka12, Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont bloqués, on a la valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -E/6$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

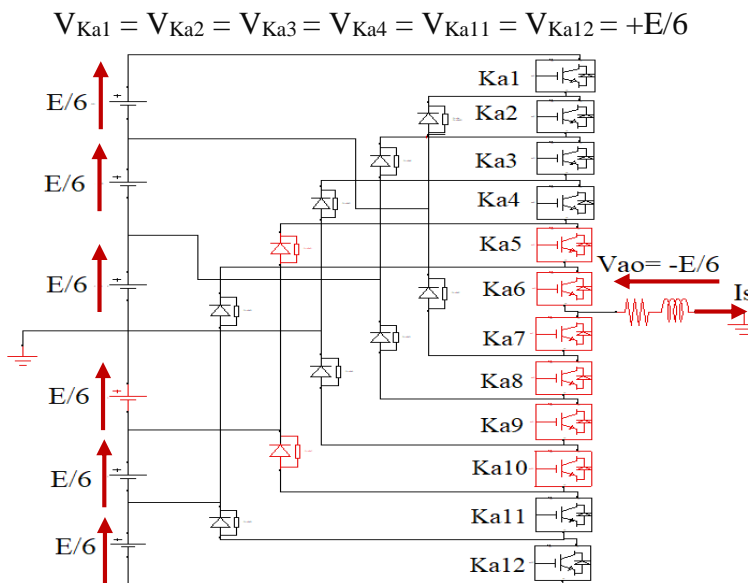


Figure I.20 5<sup>ème</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux

➤ Séquence 6 :

Ka6, Ka7, Ka8, Ka9, Ka10 et Ka11 sont passants et Ka1, Ka2, Ka3, Ka4, Ka5 et Ka12 sont bloqués, on a la valeur de la tension simple de sortie est :  $V_{ao} = -E/3$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka4} = V_{Ka5} = V_{Ka12} = +E/6$$

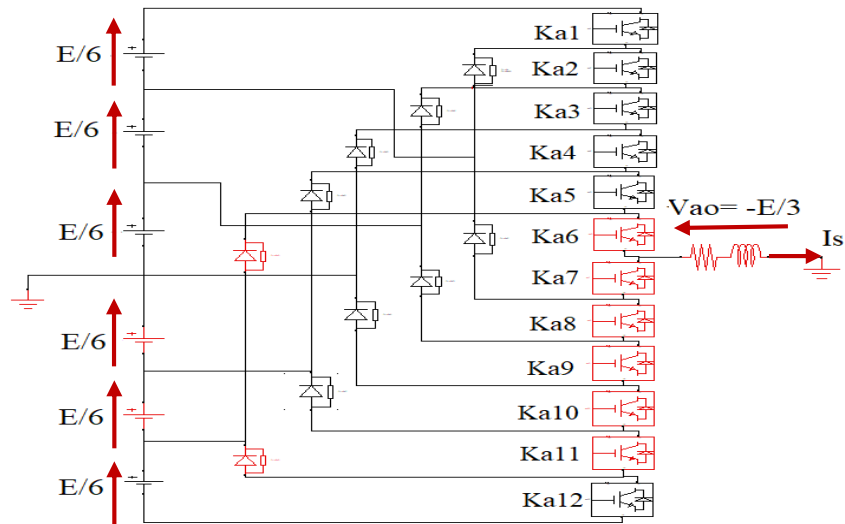


Figure I.21 : 6<sup>ème</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux

➤ Séquence 7 :

Ka7, Ka8, Ka9, Ka10, Ka11 et Ka12 sont passants et Ka1, Ka2, Ka3, Ka4, Ka5 et Ka6 sont bloqués, on a la valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -E/2$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka4} = V_{Ka5} = V_{Ka6} = +E/6$$

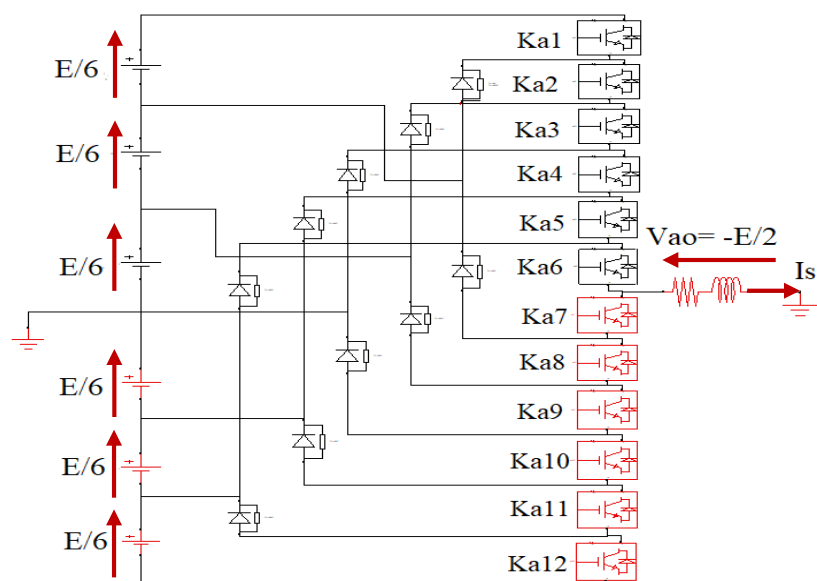


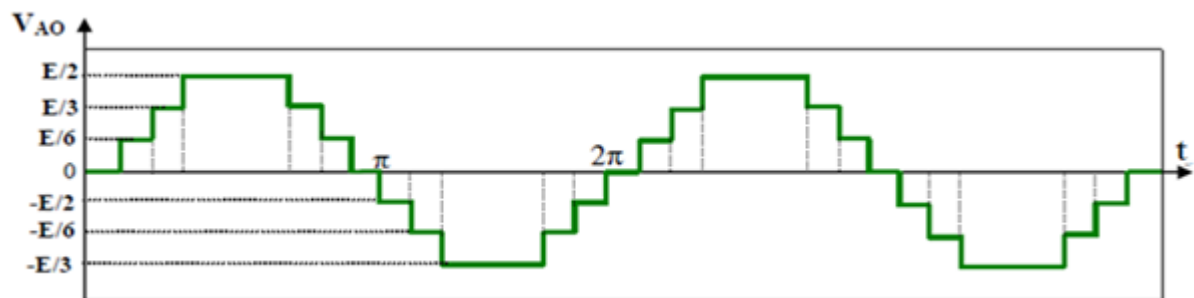
Figure I.22 7<sup>ème</sup> séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux

L'onduleur à sept niveaux de type NPC possède sept séquences fonctionnelles qui sont regroupées dans le tableau de commutation suivante :

**Tableau I.3 :** États de commutation de l'onduleur NPC à sept niveaux

Etat des interrupteurs												Tension de sortie $V_{ao}$
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka5	Ka6	Ka7	Ka8	Ka9	Ka10	Ka11	Ka12	
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	$E/3$
0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	$E/6$
0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	$-E/6$
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	$-E/3$
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	$-E/2$

La (Figure I.23) ci-dessous les formes d'ondes des tensions simples  $V_{ao}$ ,  $V_{bo}$  et  $V_{co}$ , la sortie de l'onduleur.

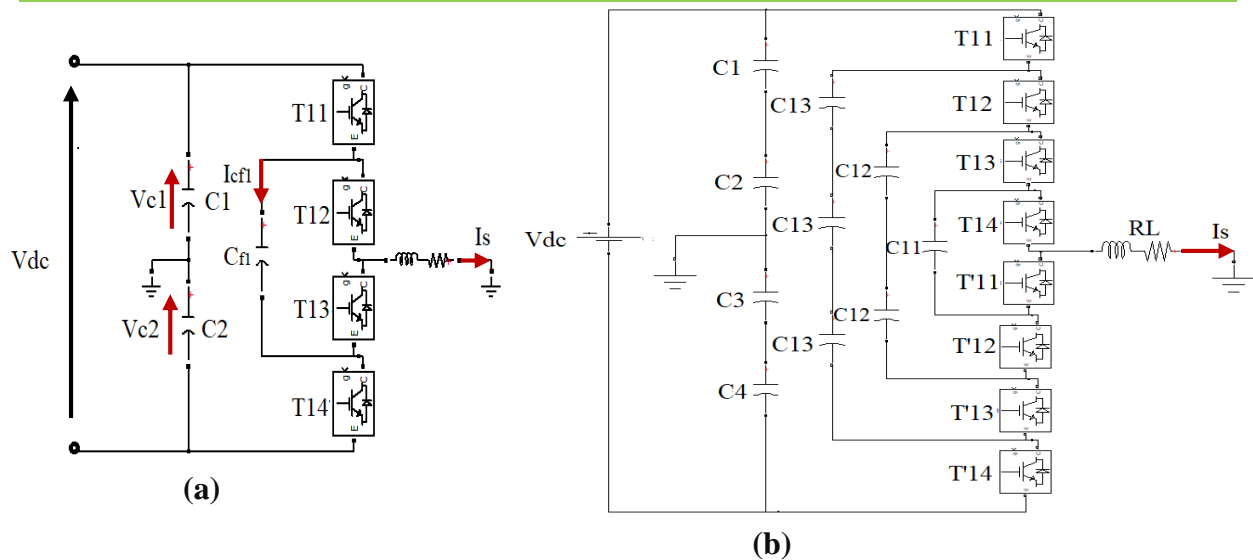


**Figure I.23 :** Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à sept Niveaux de type NPC [9]

#### I.4.2. Onduleurs multi niveaux à condensateurs flottants

Dans la topologie multi niveaux proposée par T. Meynard et H.Fochen 1992. La structure de ce convertisseur est similaire à celle de l'onduleur à diode de bouclage sauf qu'au lieu d'utiliser des diodes de blocage, l'onduleur utilise des condensateurs à leur place, d'où l'appellation (onduleur à condensateurs Flottants). Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de balancement de tension, et d'autre part le nombre excessif des diodes [9].

Dans la topologie suivante, Figure I.24, on représente l'onduleur à condensateur flottant à trois et cinq niveaux.



**Figure I.24 :** Circuit d'une phase d'un onduleur à condensateur flottant  
a) trois niveaux ; b) à cinq niveaux

Le principe de fonctionnement de cette topologie est quasiment identique à celui de la topologie NPC. Elle présente plusieurs avantages, notamment :

- La tension de blocage des interrupteurs est partout la même.
- Le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs (continu-continu, continu-alternatif, alternatif-alternatif), aussi bien pour un transfert unidirectionnel de la puissance que bidirectionnel.
- Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus [10].

Actuellement il semble que cette topologie a quelques inconvénients. Néanmoins, quelques points faibles qui doivent toujours être explorés :

- Le contrôleur de la charge du condensateur ajoute la complexité au contrôle du circuit entier.
- La topologie de l'onduleur multi-niveau à cellules imbriquées peut exiger plus de condensateurs que la topologie de l'onduleur NPC. De plus, il est évident que des courants de grande valeur efficace circuleront à travers ces condensateurs.
- Il y a un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés.

#### I.4.2.1.Principe de fonctionnement à condensateurs flottants 3 niveaux

La structure multicellulaire 3 niveaux est composée de 2 cellules, contenant chacune deux interrupteurs, et connectées entre elles par un condensateur flottant (Figure I.25).

Les interrupteurs T1 et T4 (respectivement T2 et T3) sont commandés de manière complémentaire et ne doivent jamais être passants en même temps pour ne pas court-circuiter les sources de tension. Ces couples d'interrupteurs forment donc des cellules de commutation.

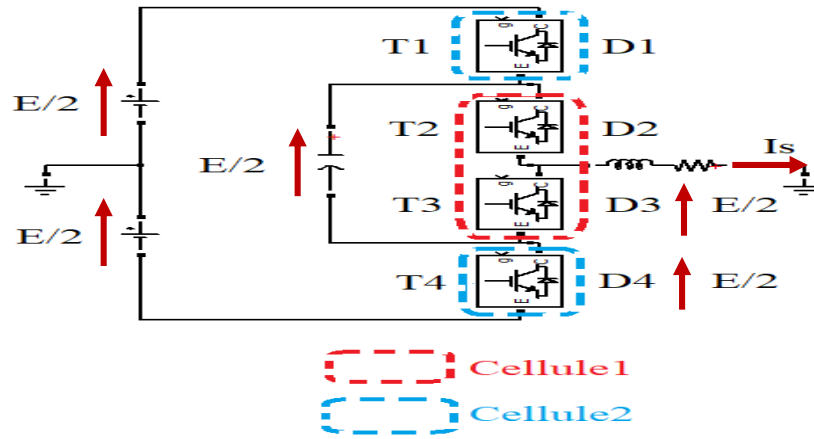


Figure I.25 : Convertisseur multicellulaire série.

Les tensions appliquées aux cellules de commutation sont imposées par les sources de tension flottantes ; ces dernières sont, dans le cas de la Figure I-25, égales à  $E/2$  quel que soit l'état des interrupteurs. La contrainte en tension aux bornes des interrupteurs bloqués ne dépasse donc pas cette valeur. Les cellules de commutation sont indépendantes les unes par rapport aux autres et les semi-conducteurs découpent pendant l'intégralité de la période de modulation.

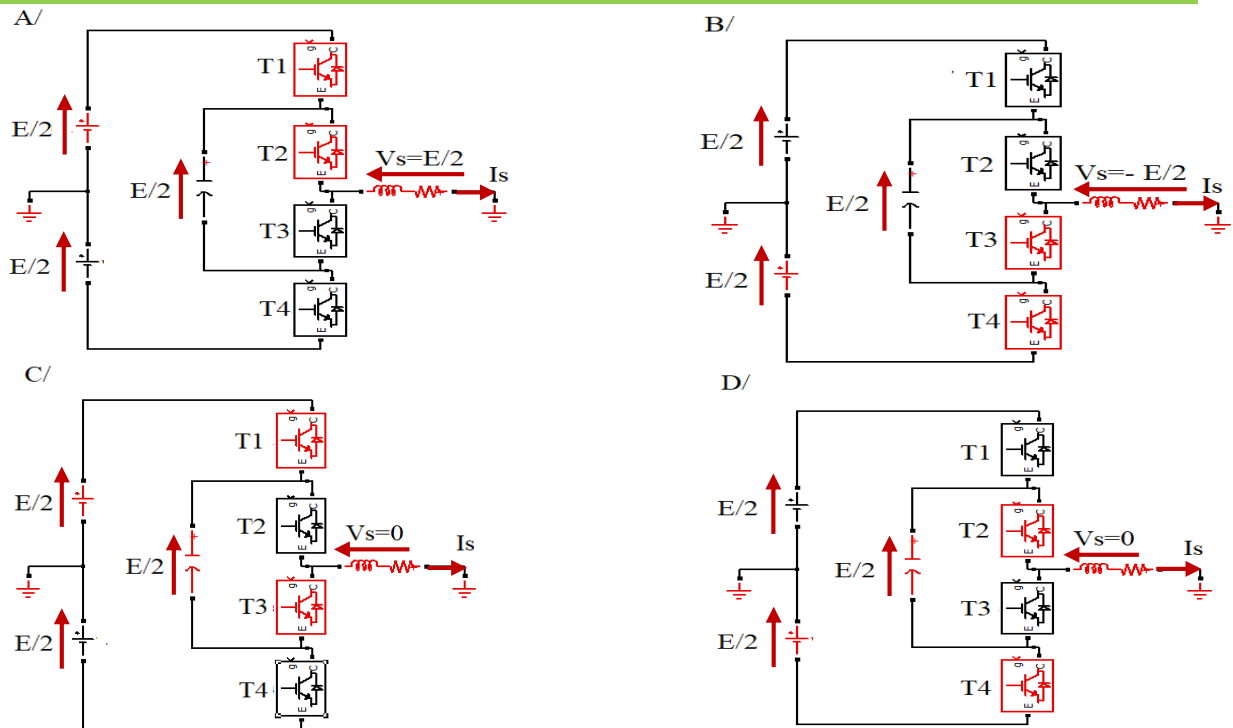
Il existe quatre configurations possibles pour un convertisseur multicellulaire 3 niveaux, configurations présentées par la Figure I.26 et le tableau I.4. Cette structure permet d'obtenir trois niveaux de tension en sortie :  $0$  et  $\pm E/2$ . Le niveau de tension intermédiaire ( $0$  V) peut être généré de deux manières différentes (Cas C et D), ce qui implique un transit d'énergie en fonction du sens de circulation du courant de charge.

Cette particularité permet de contrôler la tension aux bornes du condensateur flottant.

Tableau I.4 : Répertoire des trois niveaux de tension de sortie  $V_{ao}$  et les états de commutation possibles

T1	T2	T3	T4	$V_s$
1	1	0	0	$E/2$
0	0	1	1	$-E/2$
1	0	1	0	0
0	1	0	1	0





**Figure I.26 :** Configuration possible d'un bras d'onduleurs trois niveaux à condensateur flottant.

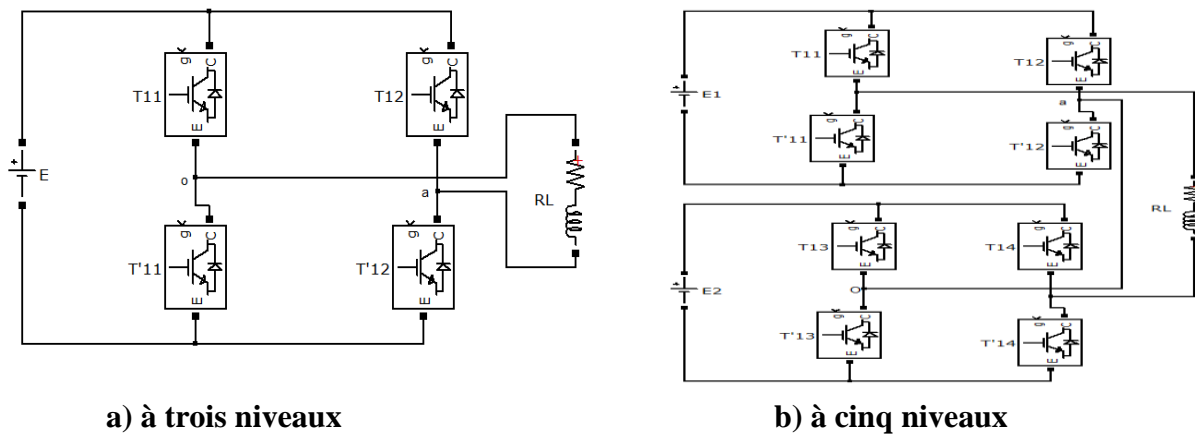
### I.4.3. Onduleurs multi niveaux en cascade

En 1975, les auteurs ont proposé un convertisseur multi niveaux en cascade qui consistait en la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasé, ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. Dans cette topologie chaque phase est connectée à un en pont H et reliée à un transformateur par des bobines d'interphase composées des enroulements de transformateurs avec différents rapports de transformation.

Le grand avantage de cette structure est qu'elle utilise une seule source de tension continue, et par le biais des bobines d'interphase elle est utilisable pour les courants et la tension élevés pour réduire de tension et de courant des transistors soient réduites.

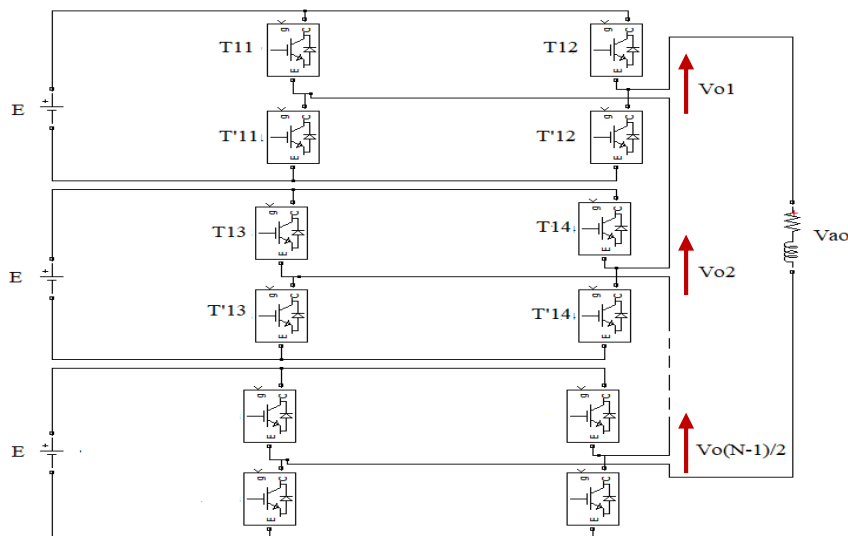
Une autre alternative consiste à envisager de mettre en série plusieurs ponts monophasé alimentés par une même source de tension continue  $E$ . Cette structure est appelée polygonale et l'utilisation d'un transformateur d'isolement à la sortie de chaque pont est obligatoire pour connecter les sortie alternative de chaque pont [11].

Les complications et le coût des sources isolées pour chaque pont n'est pas un inconvénient sérieux parce qu'il est compensé par les avantages de la construction modulaire. L'avantages principal de cette approche est que la topologie de ce type d'onduleur facilite la maintenance en plus elle permet de donner une façon très pratique pour augmenter le nombre de niveaux. Pour améliorer la résolution de ces convertisseurs sans augmenter le nombre de cellules, il est possible d'alimenter les cellules par des tensions d'entrées différentes [11].



**Figure I.27 :** Structure d'un bras d'onduleur multi-niveaux de type cascade.

La Figure I.28 montre le schéma de base d'un onduleur à N niveaux en cascade formé par l'association en série de  $(N-1) / 2$  ponts à deux niveaux. La tension de sortie  $V_s$  d'une telle structure est donnée par la somme des  $(N-1) / 2$  tensions en sortie de ces ponts. Chaque onduleur monophasé en pont est connecté à sa propre source en courant continu. Le nombre de niveaux de tension de sortie dans un onduleur en cascade est définie par :  $N = 2s + 1$ , Où s est le nombre des sources des tensions continues [5].



**Figure I.28 :** Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade.

Comme toutes structures, l'onduleur multi-niveaux en cascade possède des avantages et Inconvénients dont on peut citer :

**Avantages :**

Cette topologie présente plusieurs avantages, parmi lesquels :

- Il devient possible d'alimenter une charge en haute ou moyenne tension à partir d'une ou plusieurs alimentations basse tension (par exemple dans le cas d'une énergie photovoltaïque).

- Pour atteindre le même nombre de niveaux de tension, ce type de convertisseur nécessite moins de composants.
- Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire.
- La simplicité de la construction de la commande.

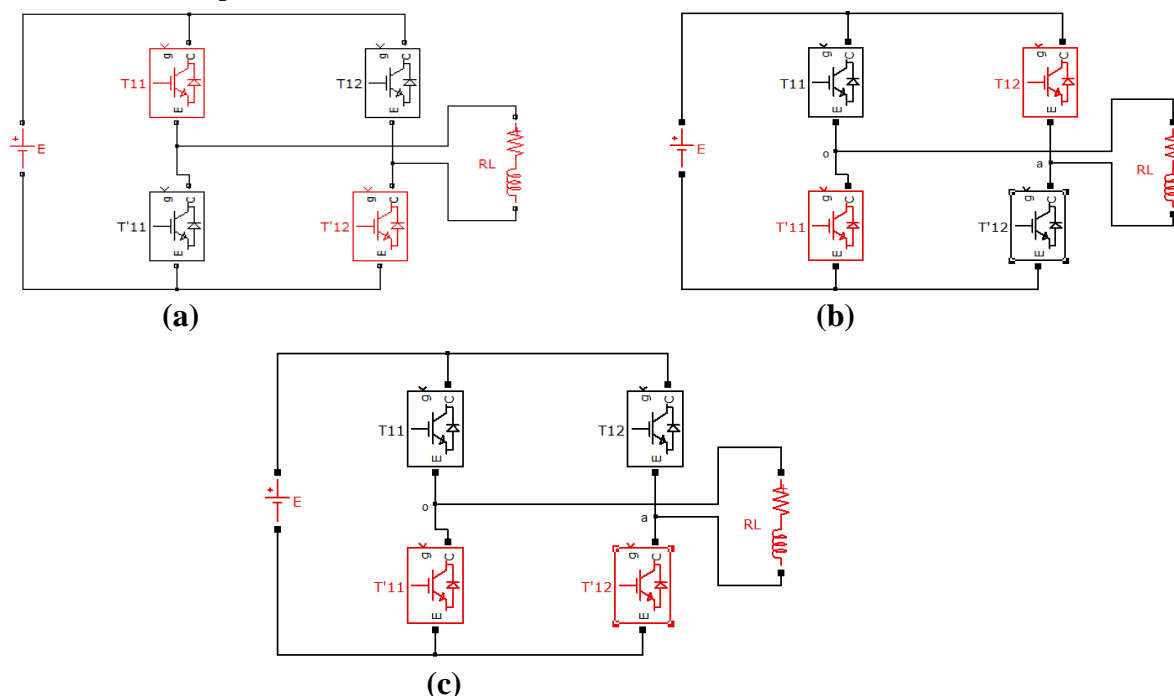
**Inconvénients :**

- Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur traditionnel.
- Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
- Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC [12].
- Elle utilise des tensions d'alimentation indépendantes (chaque pont nécessite sa propre tension d'alimentation).

### I.4.3.1.Principe de fonctionnement d'onduleur de type cascade à 3 niveaux

L'objectif visé est donc de déterminer les valeurs que peut prendre la tension pour les différents états possibles des interrupteurs, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Comme pour le cas de l'onduleur cascade trois niveaux, nous avons trois séquences de fonctionnement possibles :



**Figure I.29 :** Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en cascade.

➤ Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs T'11 et T12 sont bloqués et T11, T'12 sont passants comme le montre la Figure (I.29-a). et tension de sortie  $V_{ao}$  est :  $V_{ao}=+E$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs T11, T'12 vaut :  $V_{T11}=V_{T'12}=+E$

➤ Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Dans ce cas, les interrupteurs T11, T12 sont bloqués et T'11, T'12 sont passantes comme le montre la Figure (I.29-c). et la tension de sortie  $V_{ao}$  est :  $V_{ao}=0$ .

La tension inverse appliquée aux interrupteurs T11, T12 vaut :  $V_{T11}=V_{T12}=+E +E$ .

➤ Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs T'11, T12 sont passants et T11, T'12 sont bloqués comme le montre la Figure (I.29-b). Et la tension de sortie  $V_{ao}$  est :  $V_{ao}=-E$ .

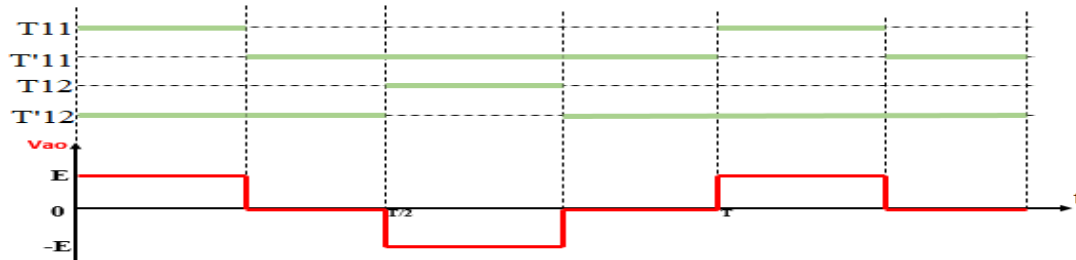
La tension inverse appliquée aux interrupteurs T11, T'12 vaut :  $V_{T11}=V_{T'12}=+E$ .

Les trois états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau I.5 :

**Tableau I.5 :** Etats possibles de l'onduleur cascade à trois niveaux

T11	T'11	T12	T'12	$V_{ao}$
1	0	0	1	+E
0	1	0	1	0
0	1	1	0	-E

Pour visualiser les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la Figure (I.30).



**Figure I.30 :** Formes d'ondes d'un bras d'onduleur en cascade à trois niveaux.

Nous remarquons que le temps de conduction de chaque interrupteur est réduit par rapport à celui des interrupteurs d'un convertisseur classique à deux niveaux, chaque interrupteur bloque une tension de  $E/2$  dans le cas onduleur en cascade à trois niveaux, au lieu de  $E$  pour l'onduleur classique deux niveaux. A chaque changement de niveau de tension, on a deux interrupteurs qui commutent.

Donc les interrupteurs de l'onduleur en série sont moins sollicités que ceux d'un onduleur deux niveaux. Un autre point important à chaque changement de niveau de tension,

nous avons un seul interrupteur(IGBT) qui change d'état. Ce qui réduit considérablement les pertes par commutations.

### I.4.3.2. Principe de fonctionnement d'onduleur de type cascade à 5 niveaux

Pour l'onduleur cascade à cinq niveaux, on a cinq séquences de fonctionnement :

➤ Séquence 1 :

T11, T'12, T13, et T'14 sont passants, et T'11, T12, T'13, et T14 sont bloqués, comme le montre la Figure (I.31-a). Dans ce cas le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie E et Second pont monophasé (celui du bas) donne également E comme tension de sortie. D'où la tension de sortie du convertisseur en cascade à cinq niveaux de tensions :  $V_{ao} = E + E = 2E$ .

➤ Séquence 2 :

T11, T'12, T'13, et T'14 sont passants et T'11, T12, T13, et T14 sont bloqués, comme le montre la Figure (I.31-b). On a toujours E à la sortie du premier pont, mais cette fois-ci 0 à la sortie du second pont. D'où la tension  $V_{ao} = E$ .

➤ Séquence 3 :

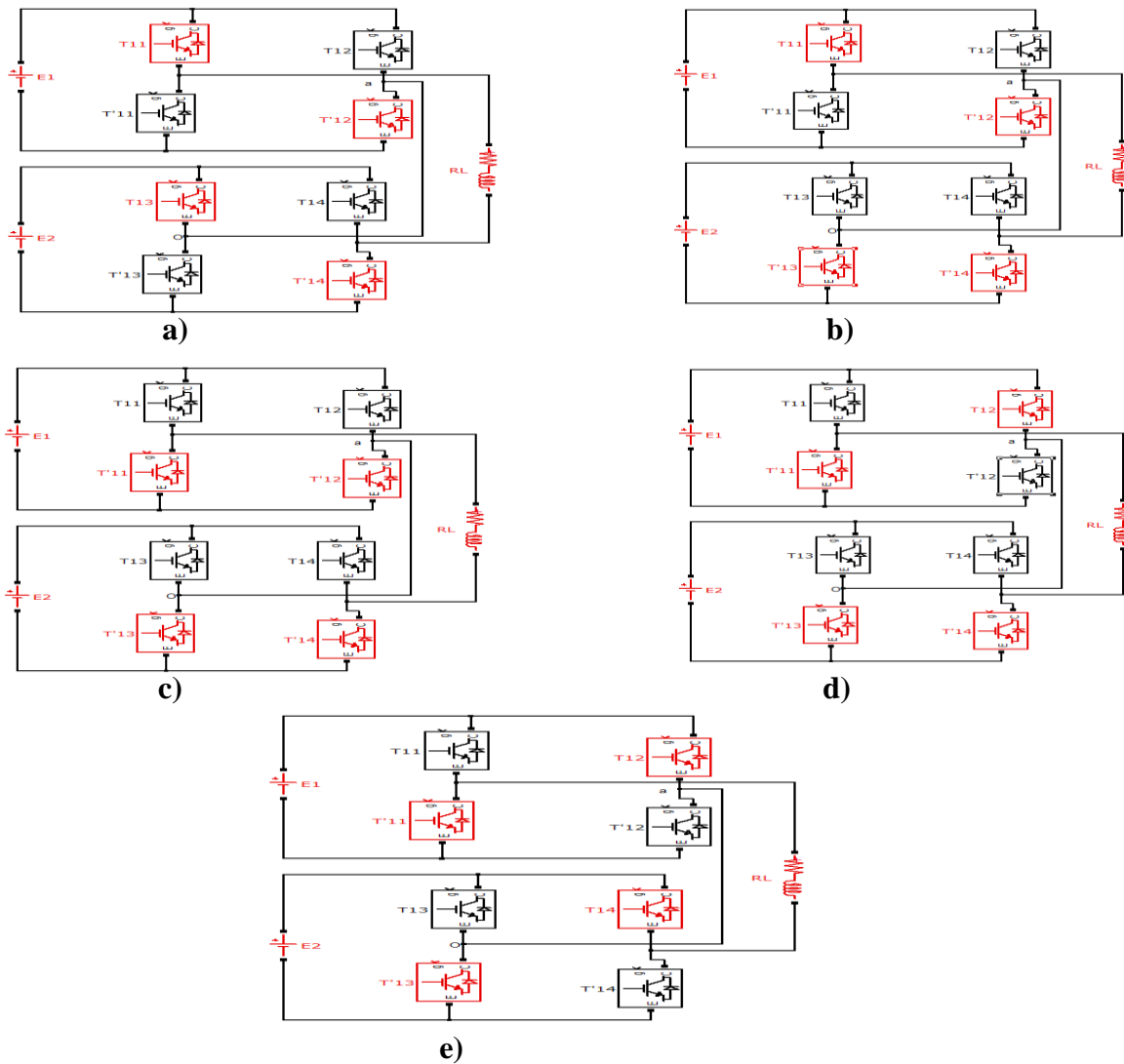
T'11, T'12, T'13, et T'14 sont passants et T11, T12, T13, et T14, sont bloqués, comme le montre la Figure (I.31-c). On a alors 0 comme tension de sortie dans les deux ponts monophasés montés en cascade. Et la tension de sortie du pont obtenue vaut :  $V_{ao} = 0$ .

➤ Séquence 4 :

T'11, T12, T'13, et T'14 sont passants et T11, T'12, T13, et T14 sont bloqués, comme le montre la Figure (I.31-d). Dans ce cas, la tension de sortie est :  $V_{ao} = -E$ .

➤ Séquence 5 :

T'11, T12, T'13, et T14 sont passants et T11, T'12, T13, et T'14, sont bloqués comme le montre la Figure (I.29-e). On a Alors la tension de sortie  $V_{ao} = -E - E = -2E$ .



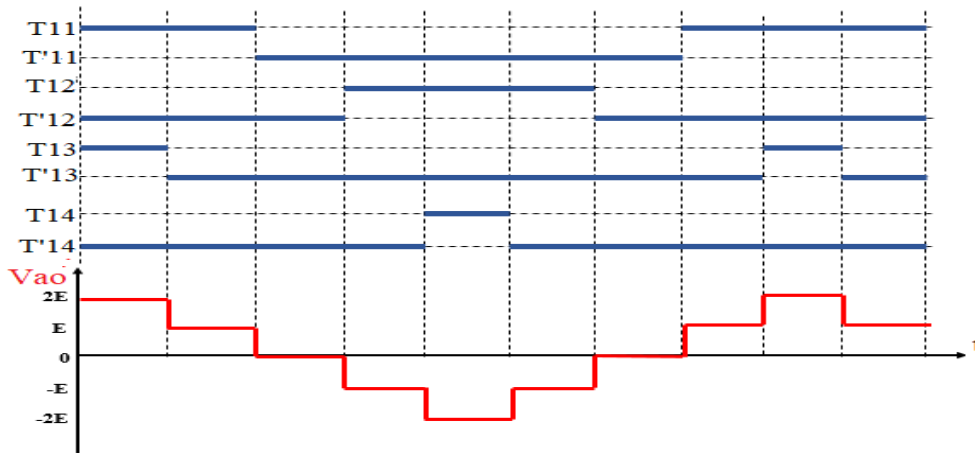
**Figure I.31 :** Configuration possible d’onduleurs cinq niveaux à condensateur cascade

Les cinq états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau I.6 :

**Tableau I.6 :** Etats possibles de l’onduleur cascade à cinq niveaux

T11	T'11	T12	T'12	T13	T'13	T14	T'14	Vao
1	0	0	1	1	0	0	1	2E
1	0	0	1	0	1	0	1	E
0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0	1	-E
0	1	1	0	0	1	1	0	-2E

Les séquences de fonctionnement, la forme d'onde de la tension de sortie et les états des interrupteurs sont représentés sur la Figure (I.32) :



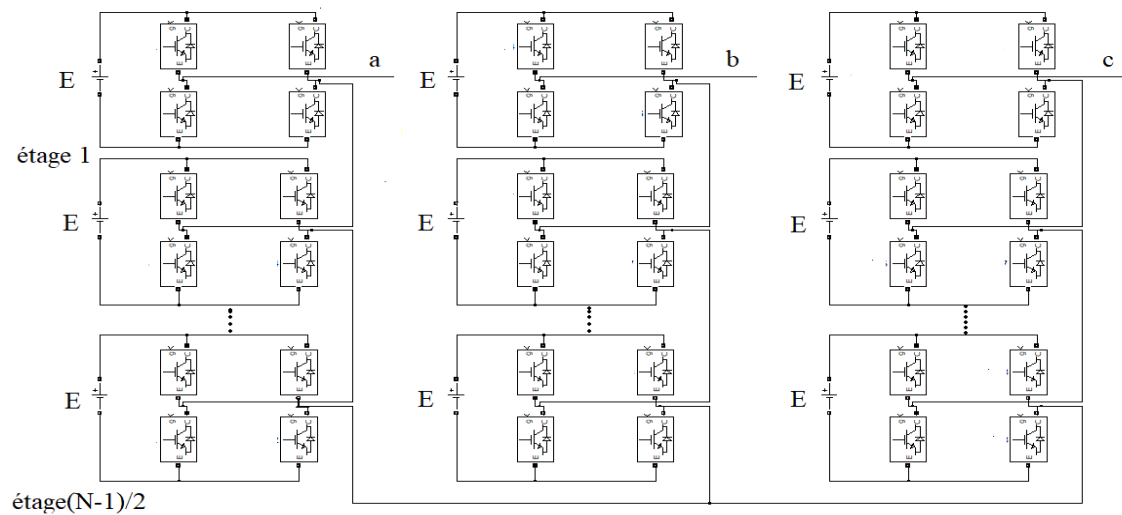
**Figure I.32 :** Formes d'ondes d'un bras d'onduleur de tension en cascade à cinq niveaux.

#### REMARQUE

Le signal de la tension de sortie obtenue présente plus de paliers dans ce cas que celui à trois niveaux. Ce qui implique logiquement un signal plus proche d'une sinusoïdale, donc moins de THD. Un autre point important est qu'à chaque changement de niveau de tension, nous avons deux interrupteurs (IGBT) qui changent d'états alors que dans le cas de l'onduleur trois niveaux on a seulement une seule commutation à chaque changement de niveau. Cependant, par période on a quatre (4) commutations dans cas cinq niveaux et six (6) commutations dans le cas cascadié trois niveaux. Ainsi, il y aura plus de perte par commutation pour l'onduleur en cascade.

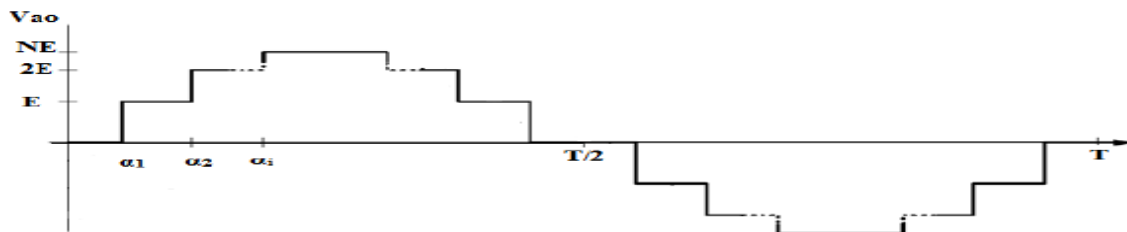
#### I.4.3.3.Principe de fonctionnement d'onduleur de type cascade à N niveaux

Dans chaque pont monophasé classique, nous avons deux interrupteurs commandés en complémentaire. Ainsi, le choix des interrupteurs à fermer ou à ouvrir dépendra de la valeur de la tension de sortie est comptée. Pour obtenir le niveau E de chaque étage, les interrupteurs K1 et K4 doivent être fermés et les interrupteurs K2 et K3 ouverts. Ce qui donnera à la sortie du convertisseur en cascade une tension de  $V_{ao} = \left(\frac{N-1}{2}\right)E$  Pour le niveau - E de chaque étage K1 et K4 sont ouverts et K2, K3 sont fermés. Pour le niveau 0 de chaque étage, on ferme deux interrupteurs voisins de bras différent (par exemple K2 et K4) et les deux autres restent ouverts. Et pour les N niveaux de tensions du convertisseur en cascade, nous combinerons différents états de la tension de sortie de chaque étage. Le premier niveau de tension correspond à  $V_{ao} = \frac{N-1}{2} E$  et le dernier niveau sera  $V_{ao} = -\frac{N-1}{2}$ .



**Figure I.33 :** Arrangement généralisé de convertisseur en cascade à N niveaux.

La tension de sortie d'un onduleur en cascade à N niveaux est représentée sur la Figure(I.34).



**Figure I.34 :** Tension de sortie d'un onduleur en cascade à N niveaux [13].

L'augmentation du nombre de niveaux, ramène la tension de sortie à plusieurs paliers sous forme d'escalier. Ceci permet de mieux approcher de la sinusoïde.

La tendance vers l'augmentation du nombre de niveaux suggère des tensions plus élevée pour des applications de forte puissance.

#### I.4.4. Autres topologies

Outre les trois topologies de base discutées précédemment, d'autres topologies de convertisseurs multi niveaux ont été proposées, mais la plupart d'entre elles sont à base de circuits "hybrides", combinaisons de deux topologies de base ou de légères variations de celles-ci. Ces topologies sont :

- Le convertisseur asymétrique hybride.
- Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement.
- Le convertisseur avec commutation douce.
- Les convertisseurs reliés par transformateur.
- Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC.
- Le convertisseur multi niveaux généralisé.



## I.5. Comparaison entre les trois principaux convertisseurs multiniveaux

Nous avons constaté que chaque topologie a ses propres avantages et inconvénients en comparant les différentes caractéristiques des trois topologies d'onduleurs multi-niveaux traditionnelles (NPC, FC et CHB) décrites précédemment. Plusieurs paramètres doivent être pris en compte pour évaluer les performances d'un onduleur multi-niveaux. On peut citer le nombre de composants (nombre d'interrupteurs de puissance, de diodes, de circuits d'équilibrage et de circuits de commande), les pertes (pertes de conduction et de commutation), le nombre d'états ON et OFF, la tension de blocage (tension de blocage par interrupteur, tension de blocage maximale), le nombre de sources isolées ou non isolées (nombre de sources DC ou de condensateurs, nombre de variétés de sources DC) et le type de configuration (configuration symétrique ou asymétrique) [14]. Le Tableau I. 7 résume le nombre de différents composants requis pour chaque topologie d'onduleurs multi-niveaux conventionnelles.

En effet, pour un niveau de tension  $N$ , les trois topologies nécessitent le même nombre d'interrupteurs de puissance, mais ils sont différents pour le nombre des sources continues, de diodes et de condensateurs nécessaires. Le major inconvénient des deux premières topologies (NPC et FC) est qu'elles nécessitent un grand nombre de composants à mesurer que le nombre de niveaux  $N$  augmente. Dans ce cas, le convertisseur CHB semble être la topologie la plus avantageuse car il nécessite moins de composants [14]. Il convient de noter que le nombre de composants nécessaires à la mise en œuvre d'un onduleur multi-niveaux est un paramètre très important qui détermine en grande partie l'efficacité des pertes.

**Tableau I. 7 :** Comparaison entre les trois topologies de base des convertisseurs multiniveaux

Configuration	Les trois topologies de base des onduleurs multiniveaux		
	Diodes de bouclage (NPC)	Condensateurs Flotteurs (FC)	En cascade (CHB)
Disposition principaux de commutation	$2(N-1)$	$2(N-1)$	$2(N-1)$
Diode antiparallèle	$2(N-1)$	$2(N-1)$	$2(N-1)$
Diode de bouclage	$(N-1)(N-2)$	0	0
Condensateur de bus continu	$(N-1)$	$(N-1)$	$(N-1)/2$
Condensateur d'équilibrage	0	$(N-1)(N-2)/2$	0
Total	$N^2 + 2N - 3$	$(N^2 + 8N - 8)/2$	$(9/2)(N-1)$

## **I.6.Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons vu les onduleurs multi-niveaux qui représentent d'importants domaines de recherche, nous avons présenté aussi les topologies principales de la conversion a plusieurs niveaux et leurs avantages et inconvénients.

Ces topologies sont : topologie à condensateur flottant, topologies en cascade, topologie à diode en boucle 'NPC'. Une étude d'onduleurs à cinq à trois est sept et N niveaux est également présentée.

**CHAPITRE II**  
**SYSTÈMES**  
**PHOTOVOLTAÏQUES**  
**ET LES ONDULEURS**  
**MULTINIVEAUX**  
**SYMÉTRIQUES ET**  
**ASYMÉTRIQUES**  
**ASSOCIÉS**



## II.1.Introduction

Parmi les domaines d'utilisation des onduleurs multi-niveaux, on trouve les systèmes photovoltaïques qui dérivent des énergies solaires. Cette énergie photovoltaïque (PV) découle de la conversion directe d'une portion de la lumière en électricité. Ce processus est réalisé à travers des cellules PV qui exploitent un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Cet effet se produit lorsque la cellule est exposée à la lumière, générant ainsi une tension électromotrice. La tension produite peut varier selon le matériau utilisé pour fabriquer la cellule. L'assemblage de plusieurs cellules en série ou en parallèle forme un système photovoltaïque (GPV) qui présente une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire, avec un point de puissance maximale. Cette caractéristique est influencée par le niveau d'éclairement solaire et la température.

## II.2.Principe de production d'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable produite par le rayonnement du soleil, découverte en 1839 par le physicien français Becquerel. Le mot « photovoltaïque » provient du grec " photos " = lumière, et de Volta = inventeur de la pile électrique. Le Principe de l'énergie solaire photovoltaïque et de transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque [15].

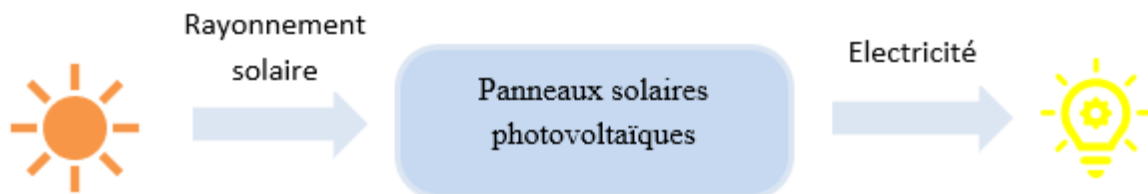


Figure II.1 : Conversion de l'énergie solaire en électricité [15].

## II.3.Energie photovoltaïque

### II.3.1.photopile (Cellule photovoltaïque)

La photopile, également connue sous le nom de cellule solaire ou photovoltaïque (voir Figure II.2), est constituée de matériaux semi-conducteurs. Elle peut être représentée comme une diode plate sensible à la lumière. Lorsqu'un photon de lumière d'une énergie suffisante heurte un atome de la partie négative de la diode, il excite un électron et le libère de sa structure moléculaire, créant ainsi un électron libre dans cette partie. La conception de la photopile empêche cet électron libre de se recombiner facilement avec un atome chargé positivement avant qu'il n'ait effectué un travail utile en passant à travers un circuit externe.



**Figure II.2 :** Principe de fonctionnement de la cellule PV [16].

## II.3.2. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV)

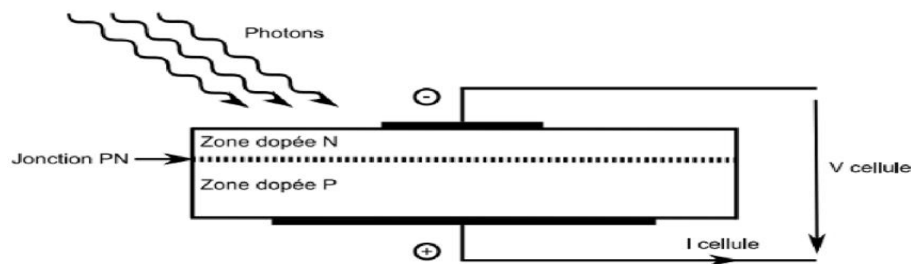
### II.3.2.1. Principe

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule.

La Figure II.3 illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et dépend fortement du niveau d'éclairement [17].



**Figure II.3 :** Coupe transversale d'une cellule PV typique.

### II.3.3. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [20] :

- ✓ la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- ✓ la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

Lorsque plusieurs cellules photovoltaïques (PV) sont associées en série ou en parallèle, cela forme un générateur photovoltaïque (GPV). Lorsque les cellules sont connectées en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant ainsi la tension totale du générateur. En revanche, lorsque les cellules sont connectées en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera.

La plupart des panneaux PV commerciaux sont composés de sous-réseaux de cellules connectés en série. Chacun de ces sous-réseaux est à son tour constitué d'un groupe de cellules PV connectées en série. Le nombre de cellules par sous-réseau est déterminé par un compromis économique entre la protection et les pertes d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel.

Il est important de noter que, tout comme pour une cellule individuelle, la caractéristique électrique  $I(V)$  d'un GPV est non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Ce point de puissance maximale a également un courant et une tension associés, appelés  $I_{opt}$  et  $V_{opt}$  respectivement. Le point de fonctionnement d'un GPV dépend de l'impédance de la charge qu'il alimente. Cette charge peut être résistive ou un bus de tension continue, comme une batterie. Dans le cas d'une batterie, c'est elle qui impose le point de fonctionnement du GPV lorsqu'il est directement connecté.

La Figure II.4 illustre la configuration de fonctionnement traditionnelle qui comprend la connexion de deux diodes de dérivation et d'une diode anti-retour. Les connexions physiques permettent de travailler avec ou sans les diodes en fonction des conditions requises [17].

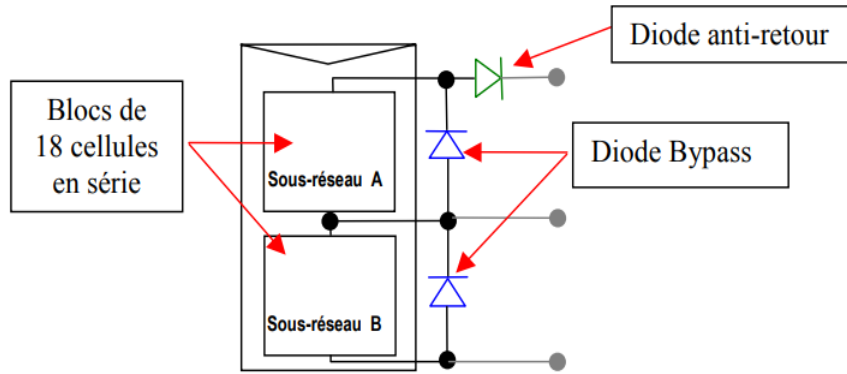


Figure II.4 : Schéma d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [17].

### II.3.4.Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

#### II.3.4.1.Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connectée à une charge peut être schématisée par un générateur de courant  $I_{ph}$  en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale.

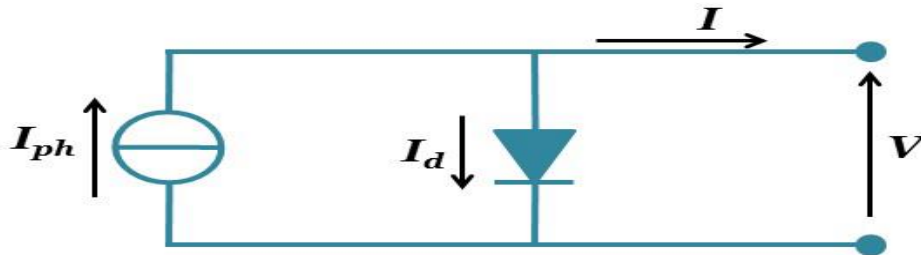


Figure II.5 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale [19].

#### II.3.4.2.Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la Figure II.6. Le schéma équivalent est constitué d'une diode (D) caractérisant la jonction, une source de courant ( $I_{ph}$ ) caractérisant le photocourant, une résistance série ( $R_s$ ) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunt ( $R_p$ ) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à ( $R_s$ ).

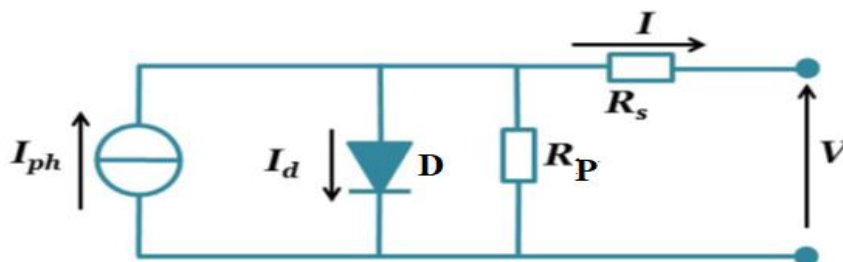
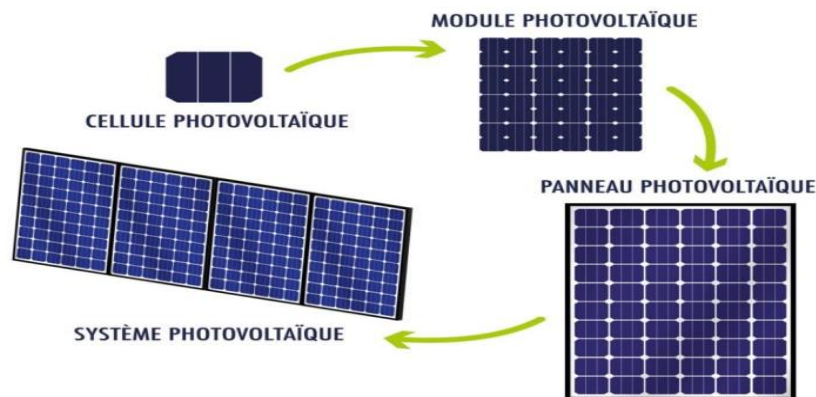


Figure II.6 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [19].

### II.3.5. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque transforme l'énergie du soleil en électricité en combinant des modules photovoltaïques, qui sont composés de cellules individuelles, en série et en parallèle. La puissance totale du générateur est obtenue en additionnant les puissances de tous ses modules [16].

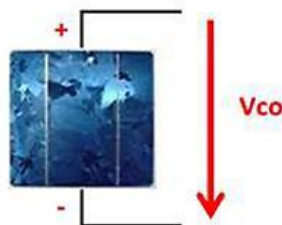


**Figure II.7 :** Composants d'un générateur photovoltaïque [15].

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes [20] :

- **La puissance de crête  $P_c$  :** Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).
- **Tension à vide  $V_{co}$  :** Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ». Figure II.8, avec l'équation (II.1) suivante :

$$V_{co} = \frac{KT}{q} \ln\left[\left(\frac{I_{cc}}{I_0}\right) + 1\right] \quad (\text{II.1})$$



**Figure II.8 :** Tension aux bornes du module.

Avec :

$q$  : Charge de l'électron = 1,602. 10<sup>-19</sup> Coulomb.

$k$  : Constante de Boltzmann = 1,38. 10<sup>-23</sup> J/K.

$T$  : Température effective de la cellule [Kelvin].



$I_0$  : courant de saturation.

- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil " la puissance fournie par la cellule  $P = V \times I$  est nulle. avec l'équation (II.2) suivante :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left[1 + \left(\frac{R_s}{R_p}\right)\right]} \quad (II.2)$$

Où :

$I_{ph}$ : Photo-courant [A], proportionnel à l'irradiance F, avec correction selon T.

$R_s$  : Résistance série [W].

$R_p$ : Résistance shunt (ou parallèle) [W].

- **Point de fonctionnement optimum  $P_m$  ( $V_m, I_m$ )** : C'est lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil.

$$P_{max} = V_m \cdot I_m \quad (II.3)$$

Avec :

$P_{max}$  : puissance maximale générée par la cellule photovoltaïque[w].

$V_m$  : tension maximale mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque[v].

$I_m$  : Courant fourni par la cellule photovoltaïque [A]

- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

$$\eta_m = \frac{V_m I_m}{P_0} = FF \frac{V_{co} I_{cc}}{P_0} \quad (II.4)$$

Avec :

$P_0$  : Puissance incident.

FF : Le facteur de forme

- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance Maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} \times I_{cc}$ .

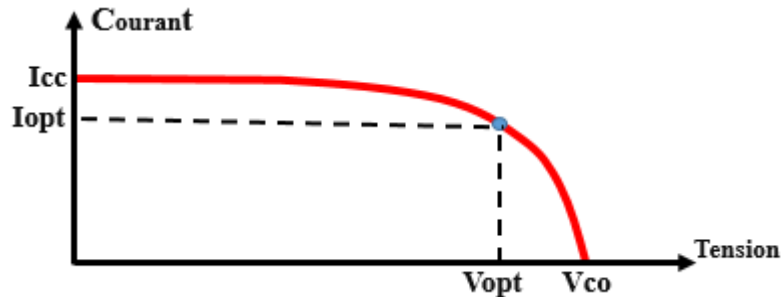
$$FF = \frac{P_M}{I_{cc} V_{cc}} = \frac{I_M V_M}{I_{cc} V_{co}} \quad (II.5)$$

Avec :

$P_M$  : puissance maximale

- **Caractéristique Courant-Tension :**

La cellule photovoltaïque produit un courant électrique, une différence de potentiel supportée entre ses électrodes métalliques apparaît communément nommée tension de circuit ouvert (VCO) fortement dépendante de la température de la cellule.

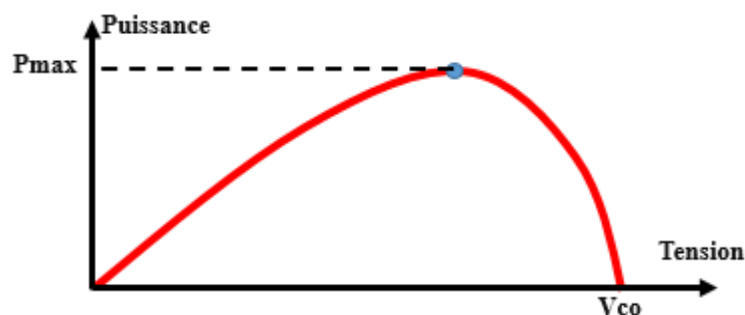


**Figure II.9 :** Caractéristique courant-tension d'une cellule Photovoltaïque.

Le courant maximal photovoltaïque se produit lorsque les bornes de la cellule sont Court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) dépendant fortement du niveau d'éclairement ( $E$ ). Figure II.9 illustre la caractéristique non linéaire  $I(V)$  d'une cellule PV à base de silicium avec la présence d'un point de puissance maximale (PPM) caractérisé par sa tension et son courant optimaux ( $V_{opt}$  et  $I_{opt}$ ).

Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) correspondant au courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle en pratique, ce courant est très proche du photocourant ( $I_{ph}$ ). La tension du circuit ( $V_{co}$ ) correspondant à la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.

- **Caractéristique puissance –tension  $P=f(V)$  :**



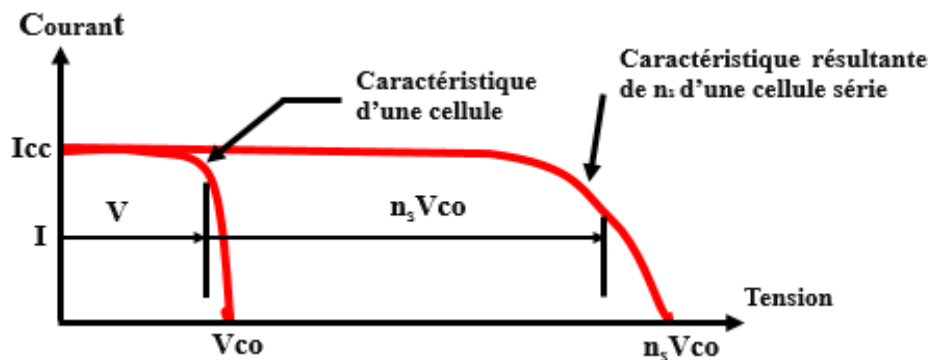
**Figure II.10 :** Caractéristique  $P(V)$  d'une cellule photovoltaïque.

La courbe de la puissance en fonction de la tension indique que la quantité d'énergie produite par la cellule photovoltaïque varie considérablement selon ses conditions opérationnelles. D'où il est important de faire fonctionner le système photovoltaïque au PPM afin d'exploiter sa puissance maximale. La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules pour obtenir des modules de

puissance compatible avec le matériel usuel. Les modules sont ensuite connectés en série pour former une chaîne.

Enfin, les chaînes sont connectées en parallèle pour former un générateur photovoltaïque. Le nombre de modules dans chaque chaîne est spécifié selon le besoin du niveau de tension du générateur. En effet, la fragilité des cellules face aux dommages mécaniques et à la corrosion nécessite une protection environnementale, souvent réalisée par l'encapsulation des cellules sous une couche de verre ou un composé plastique. Cette structure complète est appelée un module photovoltaïque. De plus, les modules peuvent être connectés en série et en parallèle pour augmenter la tension et l'intensité d'utilisation [16].

**a. Association en série :** En ajoutant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste constant, mais la tension augmente proportionnellement au nombre de composants de la série [21]. (voir Figure II.11)

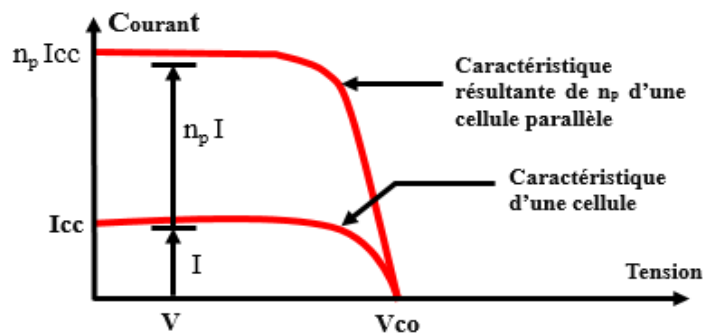


**Figure II.11 :** Caractéristique d'un regroupement en série de  $n_s$  cellules PV identiques.

**Avec :**  $n_s V_{co}$  : La somme des tensions en circuit ouvert de  $n_s$  cellules en série.

$n_s I_{cc}$  : courant de court-circuit de  $n_s$  cellules en série

**b. Association en parallèle :** En ajoutant des cellules ou des modules identiques en parallèle, la tension de la branche reste égale à la tension de chaque module, mais l'intensité augmente proportionnellement au nombre de composants de la branche [21]. (voir Figure II.12)



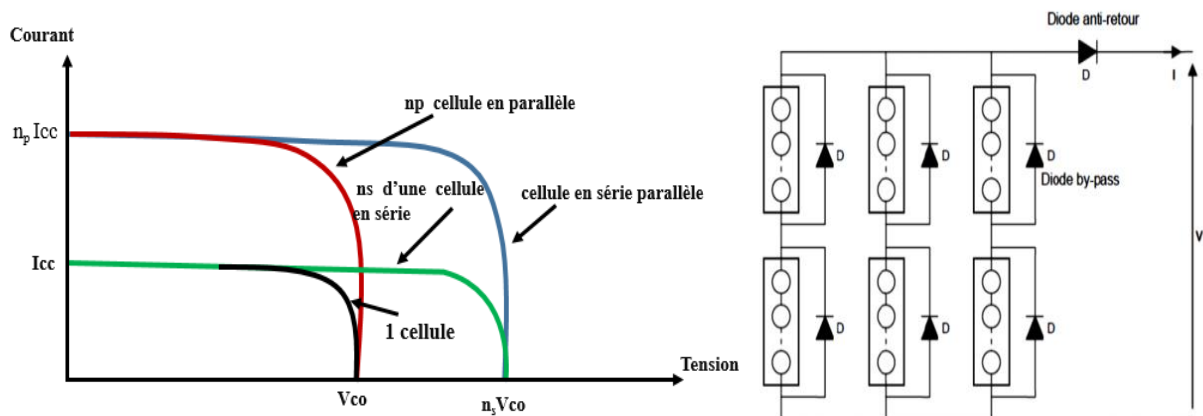
**Figure II.12 :** Caractéristique d'un regroupement en parallèle de  $n_p$  cellules PV identiques.

Avec :  $n_p V_{co}$  : tension du circuit ouvert de cellules parallèle.

$n_p I_{cc}$  : La somme des courants de court-circuit de  $n_p$  cellules en parallèle.

### c. Association série-parallèle (panneau photovoltaïque) :

En général, on opte pour un montage série-parallèle qui offre la possibilité de régler à la fois la tension et le courant en fonction des caractéristiques de la charge. Les cellules photovoltaïques sont connectées en série entre elles, tandis que les modules sont connectés en parallèle [21].



**Figure II.13 :** Caractéristique d'un assemblage série-parallèle de  $n_s$  et  $n_p$  cellules PV identiques.

## II.4. Stockage d'énergie électrique

### II.4.1. batteries (par voie électrochimique)

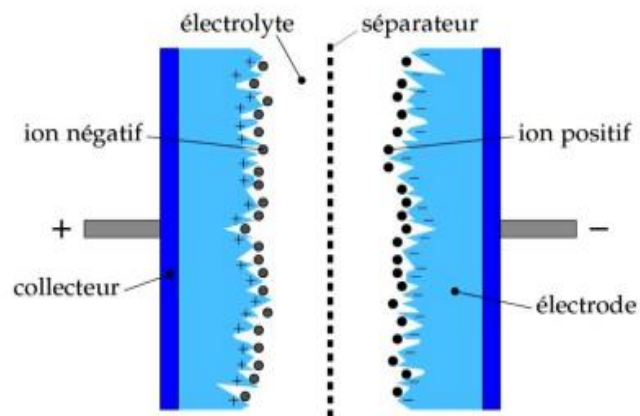
La technologie des batteries est basée sur le concept chimique de la pile, où l'énergie chimique est accumulée. Fondamentalement, une batterie est composée de deux électrodes jouant les rôles d'anode et de cathode, ainsi que d'un électrolyte en contact avec les électrodes permettant la circulation des ions et donc la création d'un courant électrique. Parmi les nombreuses filières actuellement développées :

- Les batteries au plomb sont couramment utilisées pour alimenter des installations ne pouvant supporter des coupures d'alimentation électrique, telles que les installations hybrides des sites isolés ou les hôpitaux.
- Les batteries au nickel-cadmium sont largement utilisées dans les véhicules électriques. Cependant, leur principal inconvénient réside dans l'utilisation de cadmium, un métal lourd.
- Toutes les déclinaisons des batteries au lithium sont également développées : lithium-ion, lithium-polymères, lithium-métal-polymères [21].

## II.4.2. supercondensateurs (par voie électrostatique)

Un électrolyte est placé entre deux électrodes conductrices présentant une très grande surface spécifique, c'est-à-dire une surface de contact considérable entre l'électrode et l'électrolyte. En général, les matériaux utilisés pour les électrodes sont des grains de carbone (comme le charbon activé, les fibres de carbone, les aérogels de carbone) ou des polymères conducteurs, qui possèdent des surfaces spécifiques pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres carrés par gramme de matière. Lorsqu'un champ électrique est appliqué entre les électrodes, des ions positifs et négatifs se déplacent dans l'électrolyte et forment à la surface de chaque électrode une couche de charges électriques, appelée double couche (voir Figure II.14). Comme cette surface est très étendue, la quantité de charges accumulées est bien plus importante que dans le cas des condensateurs classiques. En fait, l'énergie volumique stockée est généralement comprise entre 1 et 10 kWh/m<sup>3</sup> pour les super condensateurs, contre 0,1 à 1 kWh/m<sup>3</sup> pour les condensateurs classiques.

La cyclabilité des supercondensateurs est nettement plus élevée que celle des batteries classiques, avec généralement entre 100 000 et 500 000 cycles de charge/décharge, comparé à seulement 300 à 1500 cycles pour les batteries conventionnelles. Cependant, pour obtenir des systèmes exploitables, il est nécessaire de mettre en série un grand nombre de cellules afin d'atteindre une tension de stockage élevée [21].



**Figure II.14 :** Structure interne d'un supercondensateur [21]

## II.5. Convertisseurs photovoltaïques

Un convertisseur (appelé aussi convertisseur de tension ou onduleur) transforme l'électricité produite par un panneau photovoltaïque, stockée dans une batterie sous forme de courant continu (en 12V, 24V ou 48V) en courant alternatif 220V/230V.

### II.5.1. Connexion directe d'un module photovoltaïque

Considérons d'abord le cas où un module est directement connecté à un réseau DC. Si ce réseau DC reste sous tension même lorsque le module ne produit pas d'énergie, la connexion ne peut pas être totalement directe. Il est nécessaire d'empêcher le module d'absorber de l'énergie du système lorsqu'il n'est pas exposé à la lumière, comme pendant la nuit. La Figure II.15 illustre le schéma le plus simple possible de cette connexion directe [22].

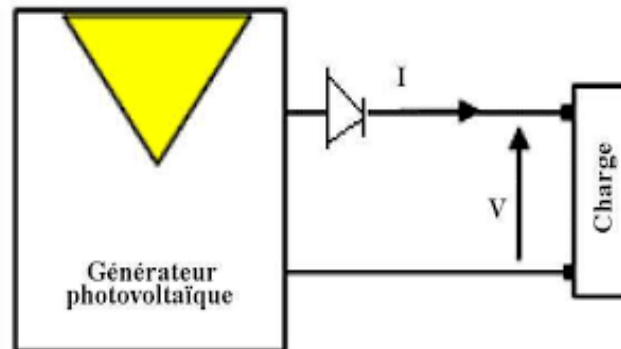


Figure II.15 : Connexion directe d'un module PV sur un réseau DC [23]

### II.5.2. Connexion avec les convertisseurs DC-DC

La connexion directe examinée précédemment ne permet pas de faire fonctionner les modules à leur tension optimale. En outre, lorsque les caractéristiques d'un module sont dégradées (cellule ombrée, éclairage faible), il se peut que le module ne fournisse plus d'énergie alors qu'il pourrait le faire grâce à l'utilisation d'un convertisseur DC-DC notamment le convertisseur *Boost* (Figure II.16).

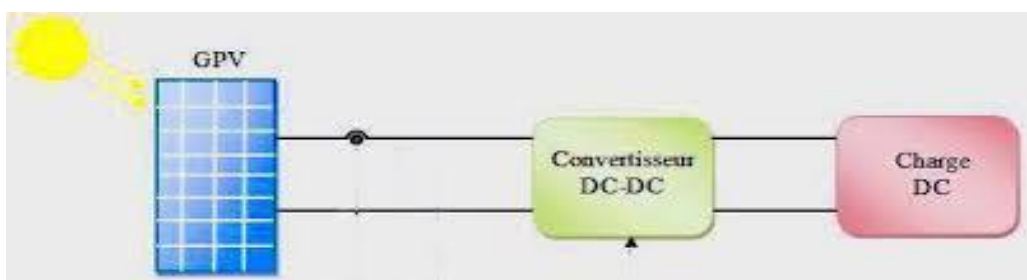


Figure II.16 : Connexion avec les convertisseurs DC-DC dans le system PV [24]

### II.5.3. Connexion avec les convertisseurs DC /AC

Le premier rôle des convertisseurs DC/ AC est la conversion d'un courant continu à un courant alternatif. Ils permettent aussi une adaptation des niveaux de tension et peuvent donc être utilisés pour amener les modules à leur point de fonctionnement optimum si leur entrée est connectée directement aux modules.

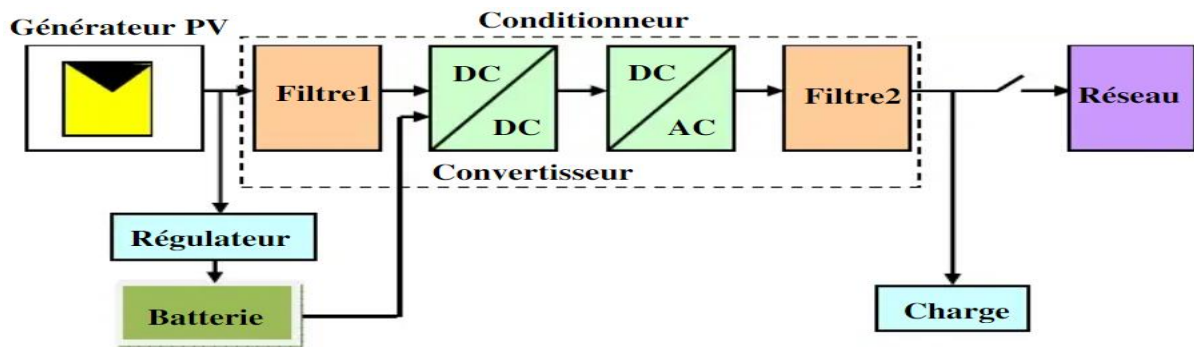


Figure II.17 : Connexion avec les convertisseurs DC /AC dans le system PV [9]

## II.6. Classification d'un système solaire photovoltaïque

Selon la configuration du système, comme par exemple dans un système qui alimente une maison, ce système devra fonctionner jour et nuit, il peut également devoir alimenter à la fois des charges en courant alternatif et en courant continu. Selon la configuration du système, on peut distinguer trois principaux types de systèmes PV [25] :

### II.6.1. Système photovoltaïque autonome

Dans ce type (Figure II.18), le système PV fournit de l'électricité pour des régions non reliées au réseau de distribution, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. Ils servent habituellement à alimenter les régions éloignées et les stations industrielles ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Un tel système exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie.

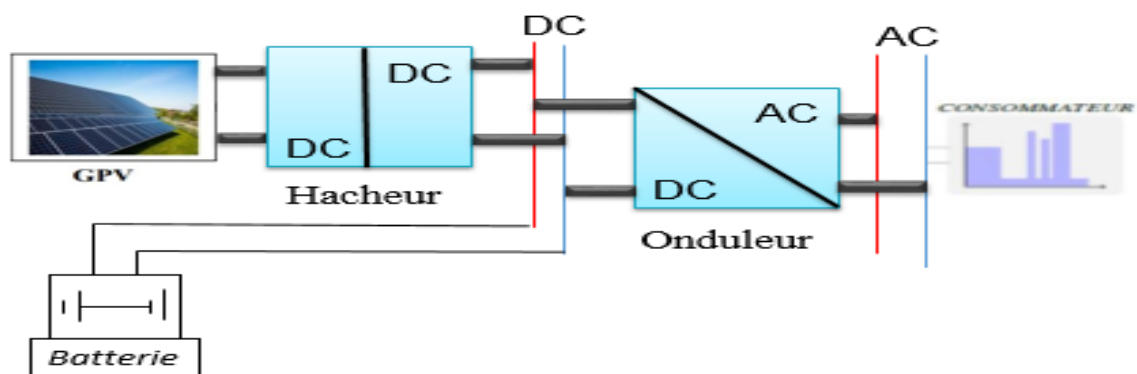
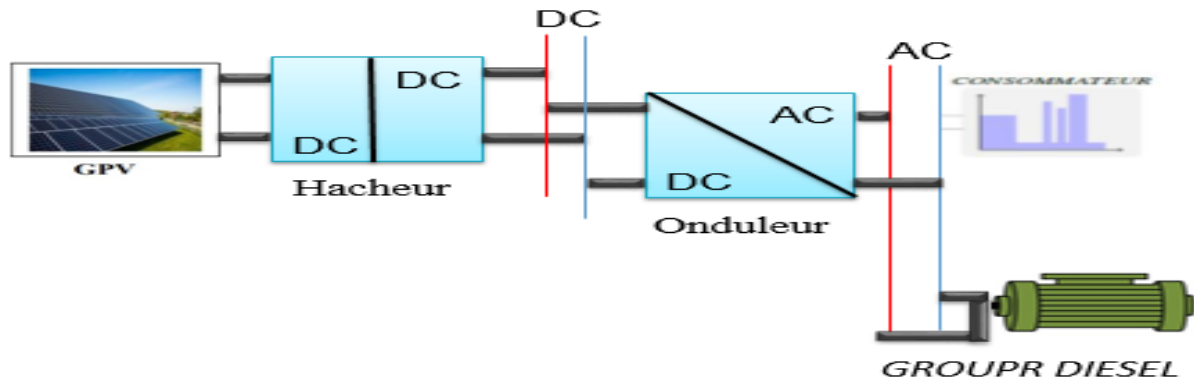


Figure II.18 : Installation photovoltaïque autonome

Par rapport au coût d'une extension de réseau centrale, cette industrie offre des résolutions économiques très importantes par leur conversion directe d'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité.

## II.6.2. Système photovoltaïque hybride

Le système hybride est une combinaison d'un générateur photovoltaïque et d'un moyen complémentaire de production d'électricité tel qu'un générateur diesel ou deux à la fois, à gaz ou éolien (Figure II.19), qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité.



**Figure II.19 :** Installation photovoltaïque hybride.

Ces systèmes peuvent posséder des batteries qui peuvent aussi être rechargées par l'autre source en cas de décharge. Afin d'optimiser ces opérations, les systèmes hybrides nécessitent généralement des commandes plus sophistiquées que les systèmes PV autonomes. Par exemple, dans le cas des systèmes PV/diesel, le moteur diesel doit être démarré lorsque la batterie atteint un niveau de décharge donné et arrêté à nouveau lorsque la batterie atteint un état de charge adéquat. Si les batteries sont maintenues à un état de charge trop élevé par le générateur diesel, l'énergie qui pourrait être produite par le générateur PV est gaspillée. À l'inverse, si les batteries sont insuffisamment chargées, alors leur durée de vie sera réduite [26].

## II.6.3. Système photovoltaïque raccordé au réseau

Dans ce système, l'ensemble de l'installation est connecté au réseau de distribution électrique par un étage d'adaptation « onduleur » et n'ont pas besoin de stockage sur batterie (Figure II.20). La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif pour pouvoir l'injecter au réseau électrique. Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, le manque d'énergie est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.



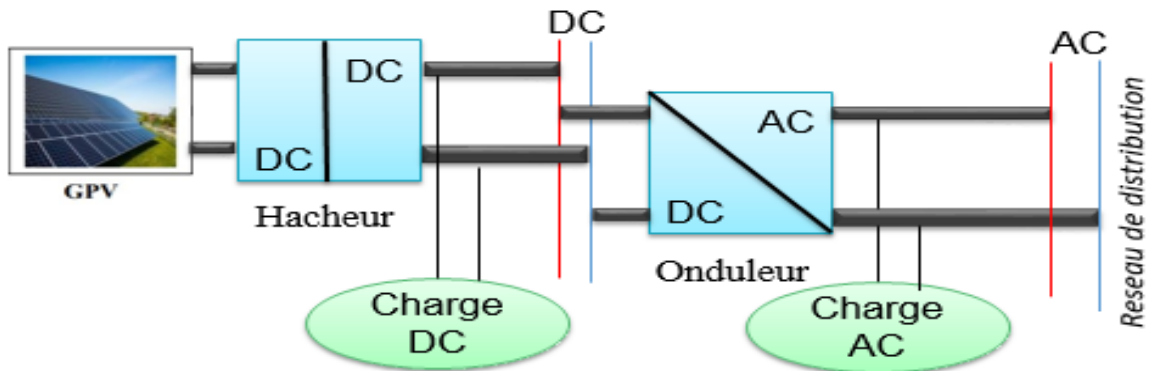


Figure II.20 : Installation photovoltaïque reliée au réseau

## II.7. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

### ❖ avantages de l'énergie photovoltaïque

- ✓ La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- ✓ La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- ✓ L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- ✓ Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).

### ❖ inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- ✓ Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- ✓ Le coût très élevé.
- ✓ Faible rendement de conversion.
- ✓ S'il faut stocker l'énergie avec de batteries, le coût de l'installation augmente.

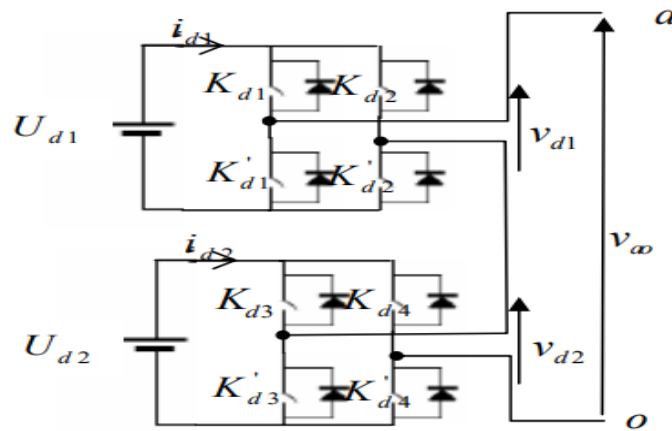
## II.8. Onduleur multi-niveaux symétrique et asymétrique appliqué aux systèmes photovoltaïques

### II.8.1. Onduleurs multiniveaux symétriques

La dénomination complète de cette topologie, introduite par (Marchesoni et al) en 1988 devrait être onduleur multiniveaux symétriques à cellules en série. Ces onduleurs sont également connus sous l'appellation « onduleurs multiniveaux cascades » (« cascade multilevel inverter » dans la littérature anglo-saxonne). Cette dénomination est imprécise, elle provient du

fait que la structure n'a tout d'abord été employée qu'avec des cellules symétriques, de sorte que la précision était superflue [18].

Les sources sont égales  $U_{d1} = U_{d2}$  Comme le montre la Figure II.21.

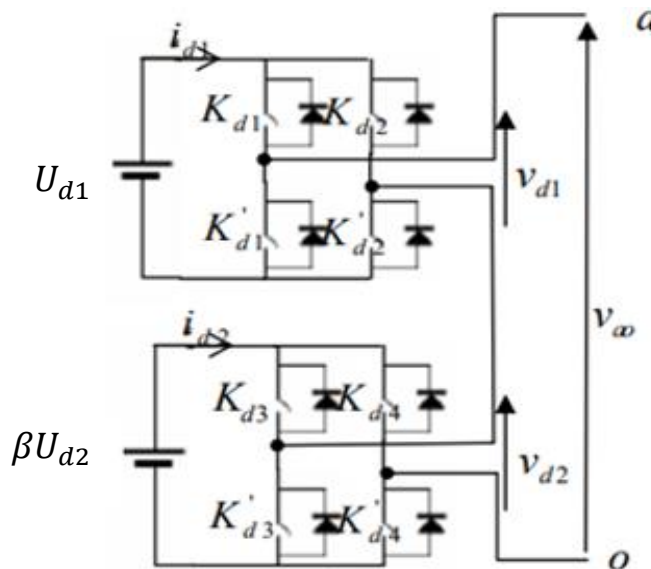


**Figure II.21 :** Structure monophasée d'un onduleurs multiniveaux symétriques

### II.8.2. Onduleurs multiniveaux asymétriques

Ce type de structure est également appelé "onduleur hybride". Dans ce principe, la mise en série des cellules de conversion est généralisée. En fonction du degré d'hybridation croissant, on distingue trois types d'associations.

Les sources sont égales  $U_{d2} = \beta U_{d1}$  Comme le montre la Figure II.22



**Figure II.22 :** Structure monophasée d'un onduleurs multiniveaux asymétriques

La Figure II.22 représente un onduleur multiniveaux asymétrique de type cascade à cinq ou à sept ou à neuf niveaux, selon les rapports entre les tensions d'alimentation.

### II.8.3.Principe de fonctionnement

Les tableaux II.1, II.2 et II.3 proposent, à titre d'exemple, trois possibilités. La première d'entre elles utilise des alimentations égales, la deuxième utilise un facteur 2 entre les deux alimentations, alors que la troisième un facteur 3. L'analyse fonctionnelle montre clairement l'existence de plusieurs possibilités dans le choix des combinaisons pour obtenir la majorité des niveaux de la tension simple de sortie [27].

➤ **Cas 1 :**

$$U_{d1} = \frac{E}{2} ; U_{d2} = U_{d1} = \frac{E}{2}$$

Pour l'onduleur cascade à cinq niveaux symétriques, on a cinq séquences de fonctionnement :

✚ Séquence 1 :

$K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K_{d3}$  et  $K'_{d4}$  sont passants, et  $K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont bloqués, Dans ce cas le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie  $E/2$  et Second pont monophasé (celui du bas) donne également  $E/2$  comme tension de sortie. D'où la tension de sortie du convertisseur en cascade à cinq niveaux de tensions :  $V_{ao} = E/2 + E/2 = E$ .

✚ Séquence 2 :

$K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On a toujours  $E/2$  à la sortie du premier pont, mais cette fois ci 0 à la sortie du second pont. D'où la tension :  $V_{ao} = E/2$ .

✚ Séquence 3 :

$K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K'_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On a alors 0 comme tension de sortie dans les deux ponts monophasés montés en cascade. Et la tension de sortie du pont obtenue vaut :  $V_{ao} = 0$ .

✚ Séquence 4 :

$K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, Dans ce cas, la tension de sortie est :  $V_{ao} = -E$ .

✚ Séquence 5 :

$K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On a Alors la tension de sortie  $V_{ao} = -E/2 - 0$

**Tableau II.1** : 1<sup>ère</sup> possibilité d'alimentation des deux cellules à ponts complets 5 niveaux

Vd1	Vd2	Vao
E/2	E/2	E
E/2	0	E/2
0	E/2	E/2
E/2	-E/2	0
0	0	0
-E/2	E/2	0
-E/2	0	-E/2
0	-E/2	-E/2
-E/2	-E/2	-E

Nous remarquons que lorsque nous utilisons Onduleurs multiniveaux 2 pont symétriques Nous n'avons que 5 niveaux

➤ **Cas 2** :

$$U_{d1} = \frac{E}{3} ; U_{d2} = 2U_{d1} = \frac{2E}{3}$$

Pour l'onduleur cascade deux ponts à sept niveaux asymétriques, on a sept séquences de fonctionnement :

✚ Séquence 1 :

$K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K_{d3}$  et  $K'_{d4}$  sont passants, et  $K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont bloqués, Dans ce cas le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie  $E/3$  et Second pont monophasé (celui du bas) donne également  $2E/3$  comme tension de sortie. D'où la tension de sortie du convertisseur en cascade deux ponts à sept niveaux de tensions :  $V_{ao} = E/3 + 2E/3 = E$ .

✚ Séquence 2 :

$K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont passants et  $K'_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont bloqués, On alors 0 à la sortie du premier pont, mais cette fois ci  $2E/3$  à la sortie du second pont. D'où la tension :  $V_{ao} = 2E/3$ .

✚ Séquence 3 :

$K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On alors  $E/3$  à la sortie du premier pont, mais cette fois ci 0 à la sortie du second pont. D'où la tension :  $V_{ao} = E/3$ .

✚ Séquence 4 :

$K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K'_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, Dans ce cas, la tension de sortie est :  $V_{ao} = 0$ .

✚ Séquence 5 :

$K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On a Alors la tension de sortie  $V_{ao} = -E/3 - 2E/3 = -E$ .

✚ Séquence 6 :

$K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K'_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On a Alors la tension de sortie  $V_{ao} = 0 - 2E/3 = -2E/3$ .

✚ Séquence 7 :

$K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On a Alors la tension de sortie  $V_{ao} = -E/3 + 0 = -E/3$ .

**Tableau II.2 :** 2<sup>ème</sup> possibilité d'alimentation des deux cellules à ponts complets 7niveaux

Vd1	Vd2	Vao
E/3	2E/3	E
0	2E/3	2E/3
-E/3	2E/2	E/3
E/3	0	E/3
0	0	0
E/3	-2E/2	-E/3
-E/3	0	-E/3
0	-2E/3	-2E/3
-E/3	-2E/3	-E

➤ **Cas 3 :**

$$U_{d1} = \frac{E}{4} ; U_{d2} = 3U_{d1} = \frac{3E}{4}$$

Pour l'onduleur cascade deux ponts à neuf niveaux asymétriques, on a sept séquences de fonctionnement :

✚ Séquence 1 :

$K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K_{d3}$  et  $K'_{d4}$  sont passants, et  $K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont bloqués, Dans ce cas le premier pont monophasé (celui du haut) donne une tension de sortie E/4 et Second pont monophasé

(celui du bas) donne également  $3E/4$  comme tension de sortie. D'où la tension de sortie du convertisseur en cascade deux ponts à neuf niveaux de tensions :  $V_{ao} = E/4 + 3E/4 = E$ .

✚ Séquence 2 :

$K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont passants et  $K'_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont bloqués, On alors 0 à la sortie du premier pont, mais cette fois ci  $3E/4$  à la sortie du second pont. D'où la tension :  $V_{ao} = 3E/4$ .

✚ Séquence 3 :

$K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On alors  $-E/4$  à la sortie du premier pont, mais cette fois ci  $3E/4$  à la sortie du second pont. D'où la tension :  $V_{ao} = E/2$ .

✚ Séquence 4 :

$K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On alors  $E/4$  à la sortie du premier pont, mais cette fois ci 0 à la sortie du second pont. D'où la tension :  $V_{ao} = E/4$ .

✚ Séquence 5 :

$K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K'_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, Dans ce cas, la tension de sortie est :  $V_{ao} = 0$ .

✚ Séquence 6 :

$K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On a Alors la tension de sortie  $V_{ao} = -E/4 - 3E/4 = -E$ .

✚ Séquence 7 :

$K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K'_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On a Alors la tension de sortie  $V_{ao} = 0 - 3E/4 = -3E/4$ .

✚ Séquence 8 :

$K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On a Alors la tension de sortie  $V_{ao} = 0 - 2E/3 = -E/2$ .

✚ Séquence 9 :

$K'_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_{d3}$ , et  $K_{d4}$  sont passants et  $K_{d1}$ ,  $K'_{d2}$ ,  $K'_{d3}$ , et  $K'_{d4}$  sont bloqués, On a Alors la tension de sortie  $V_{ao} = -E/3 + 0 = -E/4$ .

**Tableau II.3 :** 3<sup>ème</sup> possibilité d'alimentation des deux cellules à ponts complets 9 niveaux

Vd1	Vd2	Vao
E/4	3E/4	E
0	3E/4	3E/4
-E/4	3E/4	E/2
E/4	0	E/4
0	0	0
-E/4	0	-E/4
E/4	-3E/4	-E/2
0	-3E/4	-3E/4
-E/4	-3E/4	-E

Si l'on suppose que les onduleurs partiels sont arrangés des façons que  $U_{d2} \geq U_{d1}$ , alors les coefficients de dissymétrie partielle «  $\beta$  » sont des entiers naturels non nul.

$$\beta = \frac{U_{d2}}{U_{d1}} \quad (\text{II.6})$$

Dans le cas de la structure à deux ponts le coefficient  $\beta$  peut prendre 3 valeurs, un cas symétrique ( $\beta=1$ ) et deux cas asymétriques ( $\beta=2$  et  $\beta=3$ ).

Dans le cas généralisé les coefficients de dissymétrie peuvent s'exprimer de la manière suivante :

$$u_{dj} = \frac{U_{dj}}{U_{d1}} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$U_{dj}$  : la tension continue au bornes d'un onduleur partiel de rang  $j$  ( $j=1...2$ )

Le nombre de niveaux "n" pour un groupe de tensions donné, s'obtient à partir de la relation :

$$n = 2(\sum_{j=1}^2 u_{dj}) + 1 \quad (\text{II.8})$$

La relation (II.8) modifie fondamentalement le nombre de niveaux que peut générer la topologie multiniveaux étudiée. Le nombre de niveaux dépend non seulement du nombre d'onduleurs partiels en série par phase, mais aussi de la tension continue qui alimente chacun d'eux.

- Pour ces trois possibilités, avec le choix  $\beta=1$  le convertisseur est susceptible de générer un nombre de niveaux égale à cinq tel que :

$$\text{De l'équation (II.7) on a : } \begin{cases} u_{d1} = \frac{Ud1}{Ud1} = 1 \\ u_{d2} = \frac{Ud2}{Ud1} = \frac{Ud1}{Ud1} = 1 \end{cases}$$

Et d'après l'équation (II.8) le nombre de niveaux est :  $n = 2(1+1) + 1 = 5$

- Pour le choix  $\beta = 2$  le convertisseur est susceptible de générer un nombre de niveaux égale à sept tel que :

$$\text{Aussi de l'équation (II.7) on a : } \begin{cases} u_{d1} = \frac{Ud1}{Ud1} = 1 \\ u_{d2} = \frac{Ud2}{Ud1} = \frac{2Ud1}{Ud1} = 2 \end{cases}$$

Et d'après l'équation (II.8) le nombre de niveaux est :  $n = 2(1+2) + 1 = 7$

- Pour le choix  $\beta = 3$  le convertisseur est susceptible de générer un nombre de niveaux égale à neuf tel que :

$$\text{De même de l'équation (II.7) on a : } \begin{cases} u_{d1} = \frac{Ud1}{Ud1} = 1 \\ u_{d2} = \frac{Ud2}{Ud1} = \frac{3Ud1}{Ud1} = 3 \end{cases}$$

Et d'après l'équation (II.8) le nombre de niveaux est :  $n = 2(1+3) + 1 = 9$

### Remarque

Cette valeur  $n = 9$  valeur correspond au nombre de niveaux maximum que l'on peut obtenir pour cette topologie de convertisseurs multiniveaux à deux ponts.

## II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de bases des structures et des jonctions PN formant les cellules photovoltaïques, et le principe de conversion photovoltaïque à base de ses cellules PV. Ensuite nous avons tracé les différentes caractéristiques d'un générateur photovoltaïque et abordé les différentes topologies de ces systèmes selon l'application utilisés, autonome, hybride et accordé aux réseaux toute en montrant les convertisseurs DC/DC (hacheurs) et le convertisseur DC/AC associés.

Finalement nous avons présenté une approche générale pour les onduleurs multi-niveaux asymétriques destinés aux applications basses tensions (utilisant seulement deux ponts). Ces onduleurs peuvent générer un nombre impair de niveaux, jusqu'à 9. Les règles permettant d'obtenir un pas uniforme avec des onduleurs à cellules en série ont été expliquées.

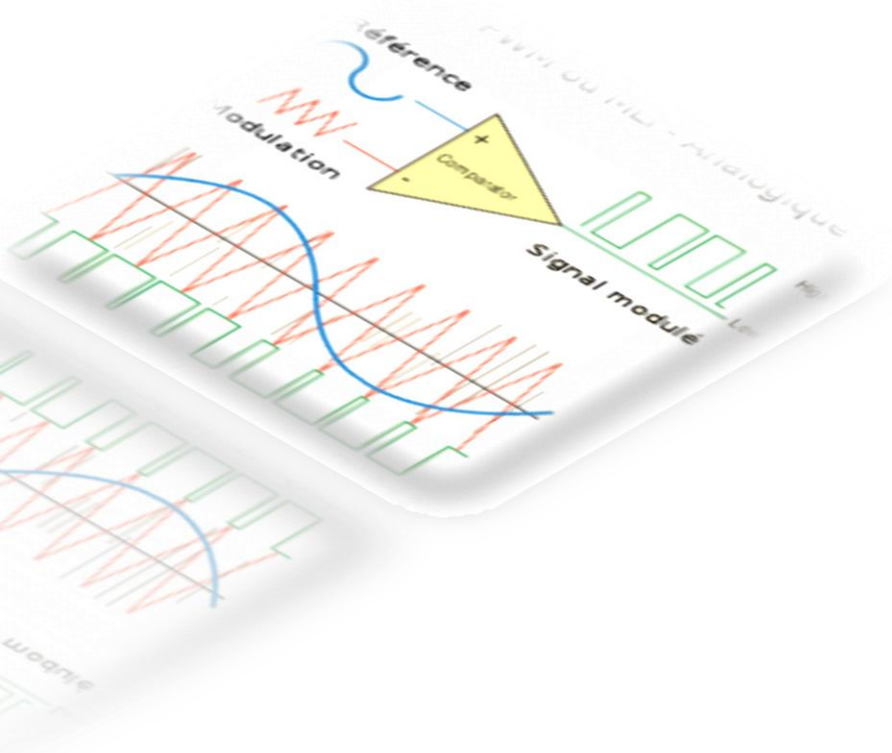
Ces onduleurs sont alimentés par différentes sources continues, connectées à des panneaux solaires et produisent des tensions de sortie de qualité améliorée sans nécessiter une



augmentation du nombre de cellules ou du nombre d'interrupteurs et ainsi sans aucune complication supplémentaire de la structure des onduleurs en pont complet.

# CHAPITRE III

## SIMULATIONS DES DIFFÉRENTS TYPES D'ONDULEURS MULTINIVEAUX



### III.1.Introduction

Dans le cadre de l'étude des onduleurs et leurs commandes, nous utilisons le logiciel de simulation Matlab, plus particulièrement son environnement graphique de programmation Matlab Simulink.

MATLAB (Matrix Laboratory) est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK, permettant une modélisation basée sur des schémas blocs. En effet, Matlab Simulink permet de représenter graphiquement le système sous forme de blocs de construction et de petits éléments, puis simule pour analyser le modèle.

Le but de ce chapitre est de simuler les convertisseurs multiniveaux suivant quelques stratégies de commande. Selon le type de convertisseur et les outils utilisés, ces différentes techniques de commandes visent principalement à réguler en fréquence et en amplitude la tension, cette amélioration est traduite par la minimisation du taux d'harmonique de la tension ou de courant généré.

Le choix d'une technique dépend du type de la charge, de la gamme de puissance des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et de la simplicité d'implémentation de l'algorithme. Ce sont finalement des critères de coût et de performance qui vont déterminer ce choix. Cette opération se fait à travers des ordres de commande appliqués aux divers interrupteurs.

On peut citer quelques techniques de commande des onduleurs multiniveaux. La tension de sortie dépend essentiellement de la commande adoptée, parmi les techniques de commande on trouve principalement :

- Commande plein d'ondes
- Commande MLI sinusoïdale
- Commande MLI Vectorielle
- Commande par hystérisées

### III.2.Stratégie de commande d'onduleur

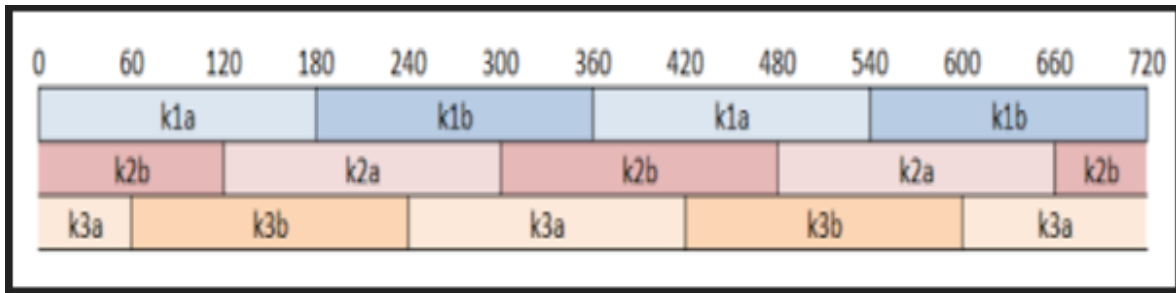
Dans ce chapitre nous appliquons deux types de commandes :

- La commande pleine onde.
- La commande MLI sinus –triangle.

#### III.2.1.Commande en pleine onde

La commande en pleine onde ( $180^\circ$ ) se produit lorsque la séquence de commande de fermeture d'un interrupteur coïncide avec l'interrupteur d'ouverture d'un interrupteur situé sur le même bras. Pour la première branche de l'onduleur, l'interrupteur K1a est fermé pendant une demi-

période ( $180^\circ$ ) et K1b est fermé pendant l'autre demi-période. Pour les deux autres bras de l'onduleur, la procédure est la même, mais décalé par rapport au premier bras de  $2\pi/3$  et  $4\pi/3$ . Figure (III.1) présenté ce principe.



**Figure III.1** : Commande pleine onde ( $180^\circ$ )

### III.2.2. Commande MLI Sinus-Triangle

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence.

Le principe de la commande est de comparer un signal de modulation à un signal de type « triangle » ou « dent de scie » notée  $S_p$  appelée la porteuse. Le résultat de cette comparaison crée un signal de commande pour les gâchettes des interrupteurs d'une façon complémentaire.

Il existe plusieurs types de commandes, leur but est d'améliorer les formes des grandeurs de sortie des onduleurs tel que la tension et le courant, c'est -à-dire de les rendre les plus sinusoïdales possible.

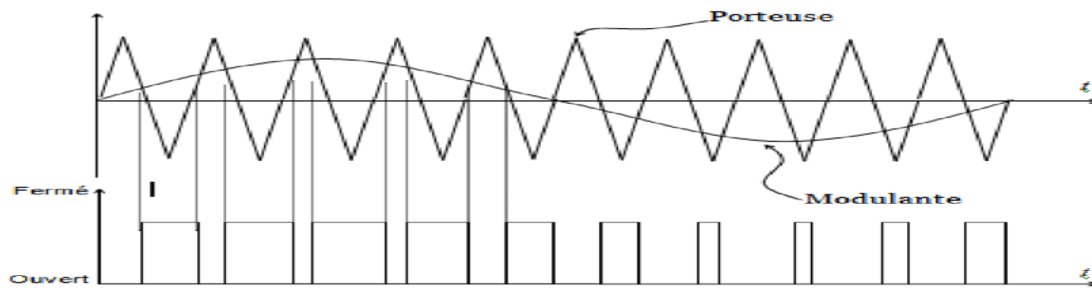
La modulation de largeur d'impulsion est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire (Figure III.2) (Figure III.3). Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [28].

En triphasé, trois références sinusoïdales déphasés de  $2\pi/3$  à la même fréquence  $f$ .

Comme à la sortie de l'onduleur, la tension n'est pas purement sinusoïdale, donc elle comporte des harmoniques, seules responsables des parasites ce qui engendre des pertes supplémentaires.

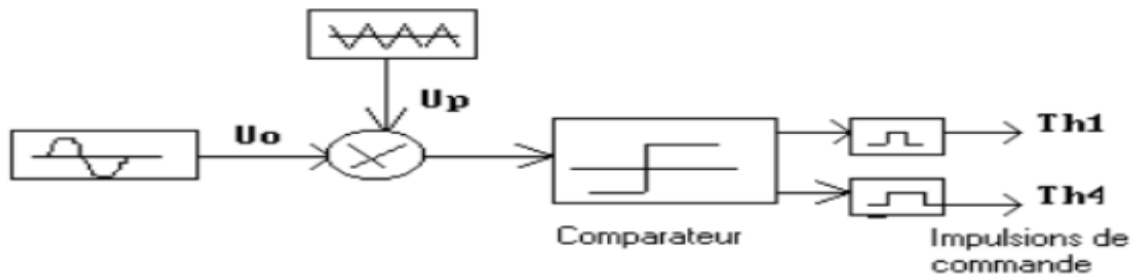
Cette MLI sert à remédier ces problèmes et elle a les avantages suivantes :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- Elimination de certaines harmoniques de tension.



**Figure III.2 :** schéma de principe de la technique sinus-triangle

La Figure III.3 illustre comment construire un MLI sinusoïdal



**Figure III.3 :** Schéma synoptique de la loi de modulation sinusoïdale-Triangle

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, les caractéristiques sont :

1. l'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence  $f_p$  de la porteuse à la fréquence  $f_m$  de la référence :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{III.1})$$

2. le coefficient de réglage  $r$  égal au rapport de l'amplitude  $A_m$  de la référence à l'amplitude Crête  $A_p$  de la porteuse :

$$r = \frac{A_m}{A_p} \quad (\text{III.2})$$

2. le facteur d'évaluation des performances de la MLI qui est le « taux d'harmonique de distorsion » de la tension de sortie (THD), définit par le rapport de la somme quadratique des harmoniques de tension à la valeur de la somme quadratique du fondamental et des harmoniques de la tension.

$$THD = \frac{\sqrt{V_{eff}^2 - (V_1)_{eff}^2}}{(V_1)_{eff}} \quad (\text{III.3})$$

### III.3.Simulation d'un onduleur multiniveaux par la commandé en pleine onde

#### III.3.1.Simulation d'un onduleur NPC trois niveaux monophasé

##### a. Montage

Nous allons simuler le montage d'un onduleur monophasé sur logiciel Simulink afin de vérifier la robustesse de montage et la stratégie de commande choisie qui est la commande en pleine onde.

Les paramètres de la simulation sont :

- ✚ Sources de tension continue :  $E=100V$
- ✚ Charge monophasé équilibrée :  $R=10\text{ Ohm}$   $L=0.04\text{ H}$
- ✚ Signal de la commande pleine onde d'amplitude 1
- ✚ La fréquence 50 HZ

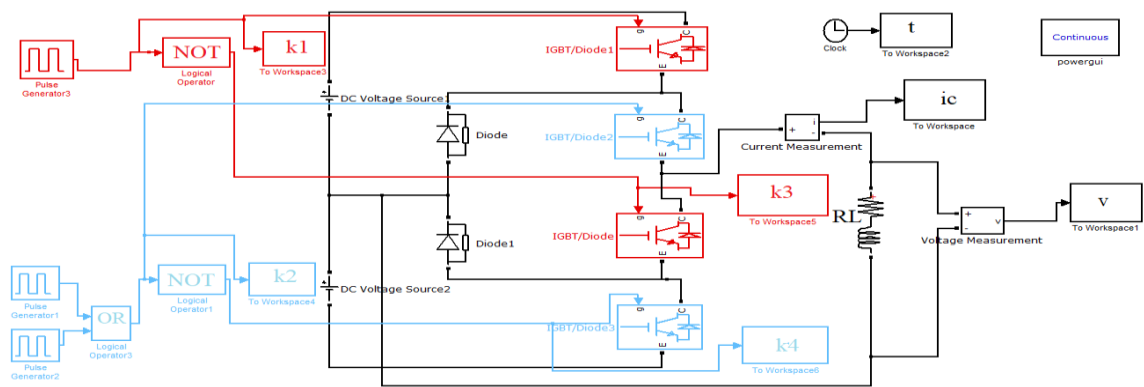


Figure III.4 : schéma bloc d'un onduleur monophasé NPC trois niveaux

##### b. Résultats de simulation

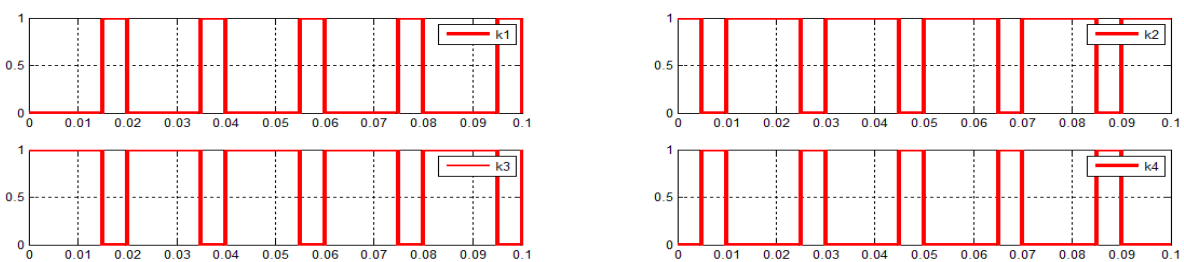


Figure III.5 : séquence de commande d'onduleur monophasée NPC trois niveaux (k1...k4)

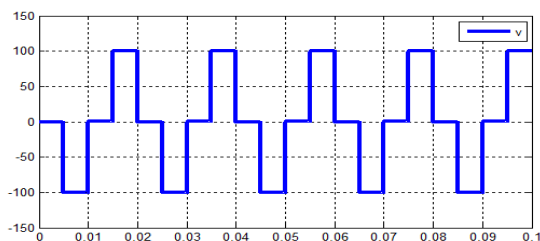


Figure III.6 : tension de sortie v

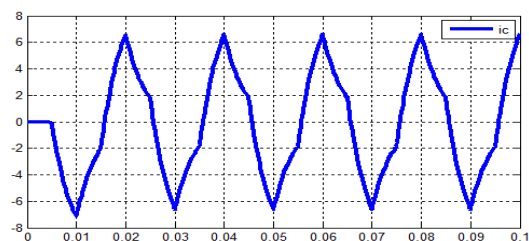


Figure III.7 : courant de sortie ic

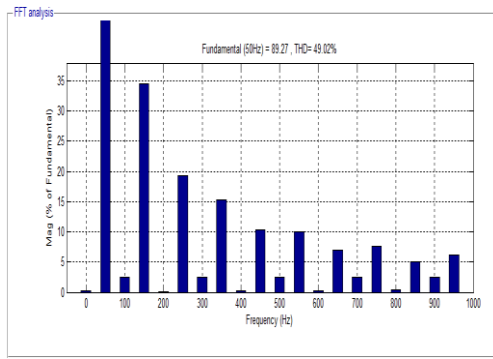


Figure III.8 : spectre d'harmonique de tension v

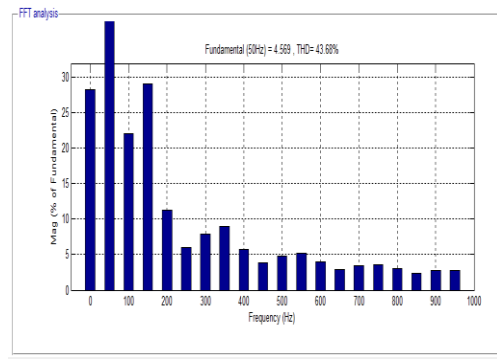


Figure III.9 : spectre d'harmonique de courant ic

### III.3.2.Simulation d'un onduleur NPC cinq niveaux monphasé

#### a. Montage

Pour les mêmes paramètres précédents, nous allons simuler le montage d'un onduleur

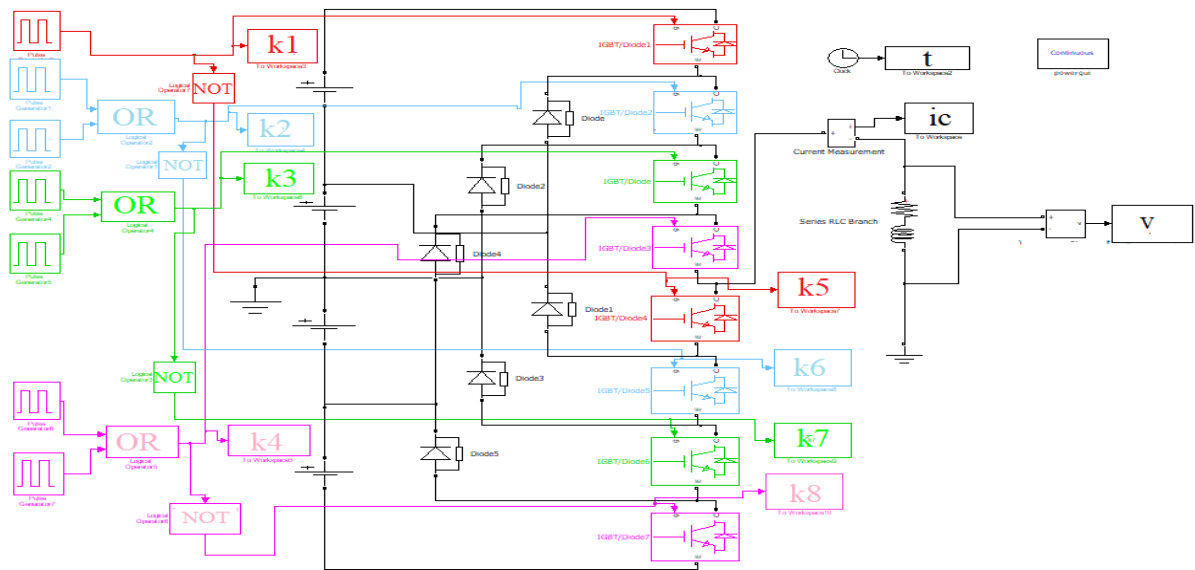


Figure III.10 : schéma bloc d'un onduleur monphasé NPC cinq niveaux

#### b. Résultats de simulation

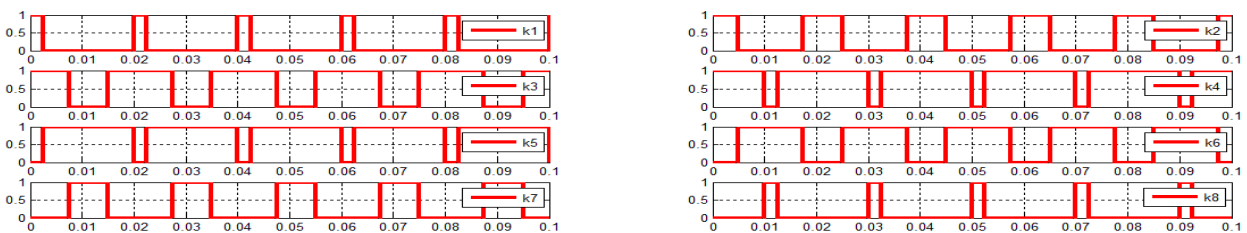


Figure III.11 : séquence de commande d'onduleur monphasée NPC Cinq niveaux (k1...k8)

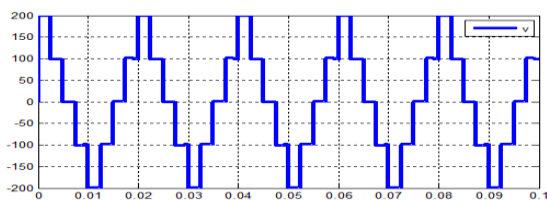


Figure III.12 : tension de sortie v

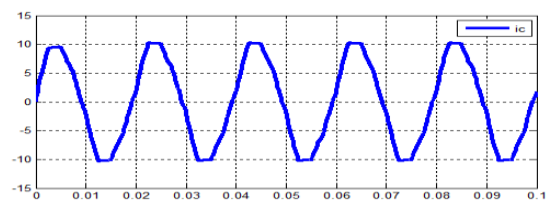


Figure III.13 : courant de sortie ic

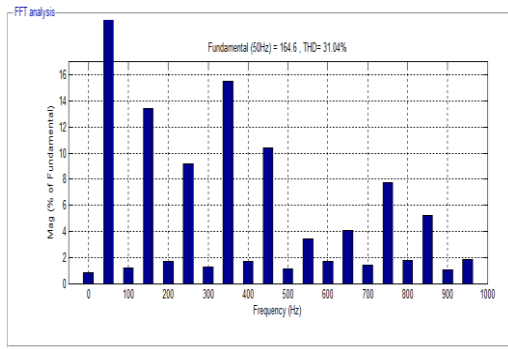


Figure III.14 : spectre d'harmonique de tension v

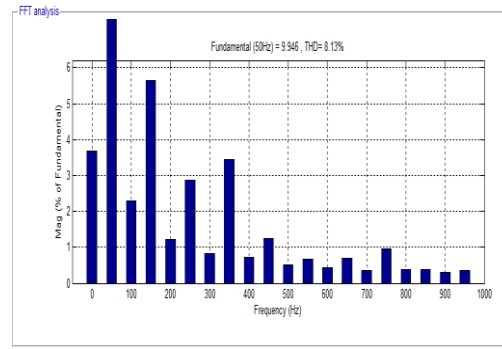


Figure III.15 : spectre d'harmonique de courant ic

### III.3.3.Simulation d'un onduleur NPC sept niveaux monphasé

#### a. Montage

Pour les mêmes paramètres précédents, nous allons simuler le montage d'un onduleur monphasé NPC à 7 niveaux.

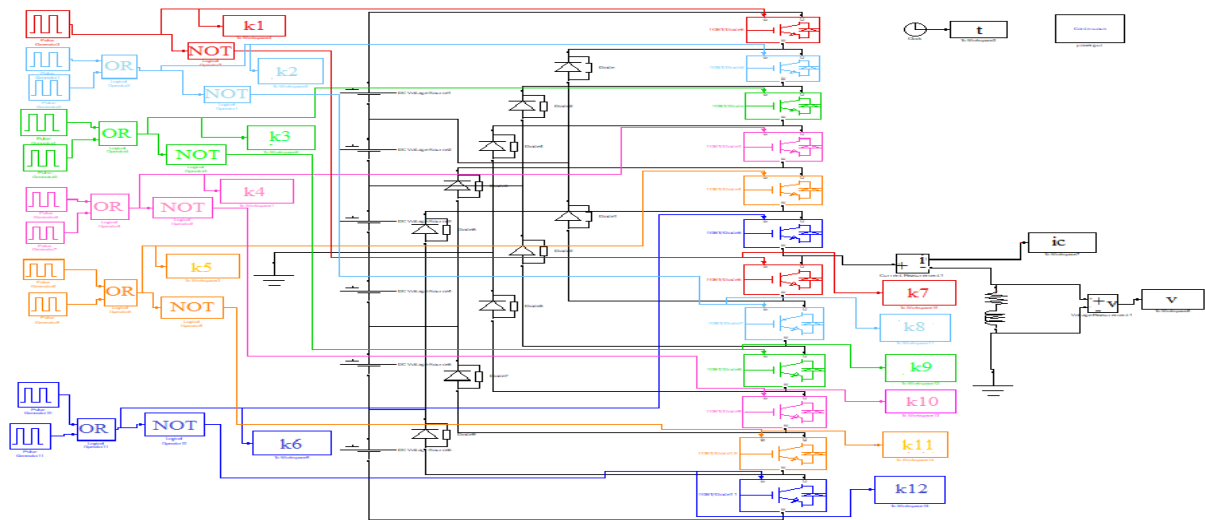


Figure III.16 : schéma bloc d'un onduleur monphasé NPC Sept niveaux

#### b. Résultats de simulation

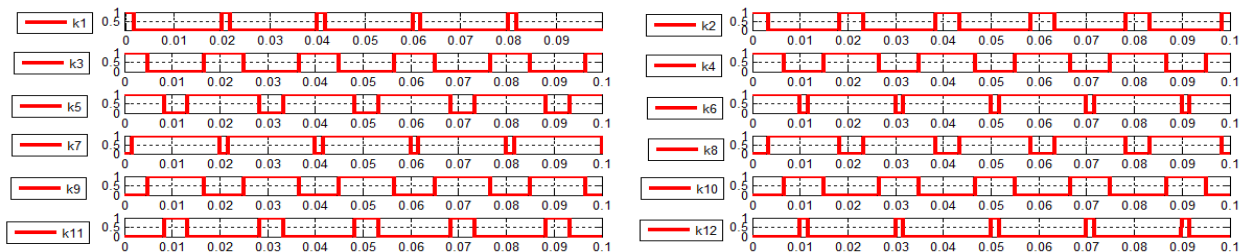


Figure III.17 : séquence de commande d'onduleur monphasée NPC sept niveaux (k1...k12)

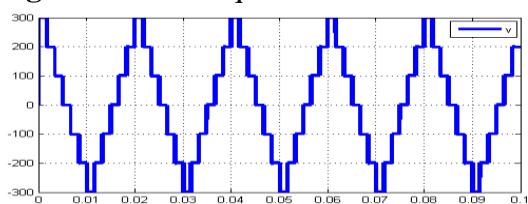


Figure III.18 : tension de sortie v

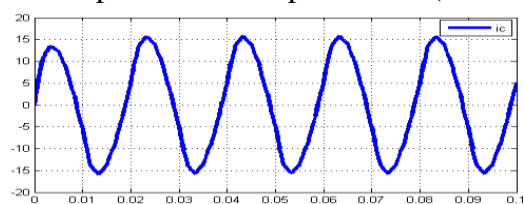


Figure III.19 : courant de sortie ic



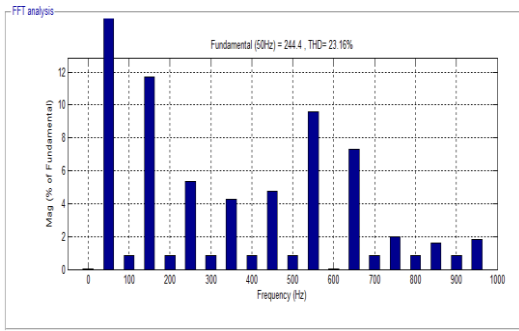


Figure III.20 : spectre d'harmonique de tension v

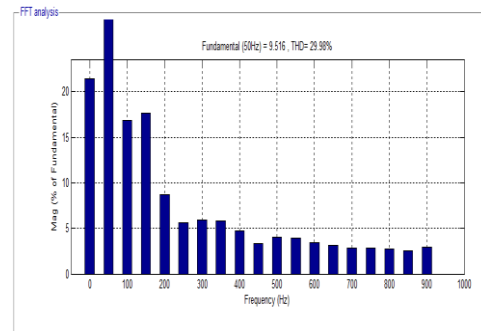


Figure III.21 : spectre d'harmonique de courant ic

Tableau III.1 : Facteurs de distorsion de type NPC d'onduleur monophasé

Commande commandé par une pleine onde						
Nombre de niveaux	Trois Niveaux		Cinq niveaux		Sept niveaux	
	La tension	Le courant	La tension	Le courant	La tension	Le courant
THD %	49,02	43,68	31,04	8,13	23,16	9,71

**Interprétation des résultats**

- Les figures III.5 et III.11 et III.17 montrent respectivement les signaux de commande nécessaires pour la génération d'une tension ayant trois niveaux (n=3) et cinq niveaux (n=5) et sept niveaux (n=7) d'un onduleur NPC monophasé.
- Les figures III.6, III.12, et III.18 présentent les résultats de simulation des tensions de la sorties de chaque onduleur (3, 5 et 7 niveaux NPC). La tension aux bornes de la charge est alternative entre +100V et -100V pour le NPC à 3 niveaux, entre +200V et -200V pour le NPC à 5 niveaux et entre 300V et -300V pour celui de sept niveaux. Ces trois figures représentent les niveaux de tension souhaitées de chaque structure.
- Les figures III.7, III.13, et III.19 présentent les résultats de simulation des courant de la sorties de chaque structure d'onduleur (3, 5 et 7 niveaux NPC).

D'après l'analyse des figures III.8, III.9, III.14, III.15, III.20, III.21 ainsi du Tableau III.1 il ressort que pour cette stratégie de la commande pleine onde du NPC monophasé que :

- Pour l'onduleur NPC à trois niveaux on remarque que le taux de distorsion harmonique des tensions et des courant est très élevé (faible qualité d'énergie). La tension générée par cette stratégie à une forme quasi rectangulaire (trois Niveaux), sa décomposition en série de Fourier montre qu'elle est riche en harmoniques le spectre d'harmoniques de la tension de sortie est très riche en harmoniques de haut rang faible fréquence donc le

filtrage difficile, ce qui montre que sa forme est très éloignée à la forme sinusoïdale. Les harmonique de rang faible ont une amplitude très élevée ce qui infule négativement sur la forme du courant.

- Pour l'onduleur NPC à cinq niveaux on remarque que si on observe les harmoniques des tensions et des courants avec cette structure, on constate que nous avons beaucoup moins d'harmoniques par rapport à la structure à trois niveaux, ce qui signifie que le signal est moins polluant.
- Pour l'onduleur NPC à sept niveaux on remarque nous avons beaucoup moins d'harmoniques par rapport à la structure à trois niveaux et cinq niveaux, ce qui signifie que le signal est moins pollué. Dans le cas d'onduleur à sept niveaux les résultats sont meilleurs que ceux dans l'onduleur à trois niveaux et cinq niveaux d'un point de vue qualité de l'allure. Nous concluons que la structure NPC à sept niveaux fournit un signal plus proche de la forme sinusoïdale que l'onduleur trois et cinq niveaux.

### III.3.4.Simulation d'un onduleur cascade pont H monophasé

#### a. Montage

Les paramètres de la simulation sont :

- Source de tension continue  $E=100V$
- Charge monophasé équilibrée :  $R=10\text{ Ohm}$   $L=0.04\text{ H}$
- Signal de la commande pleine onde d'amplitude 1
- La fréquence 50 HZ

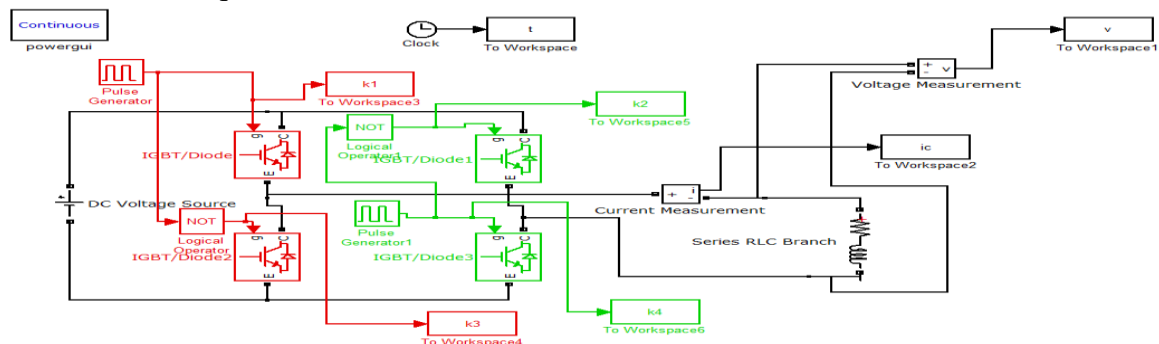


Figure III.22 : schéma bloc d'un pont H monophasé

#### b. résultats de simulation

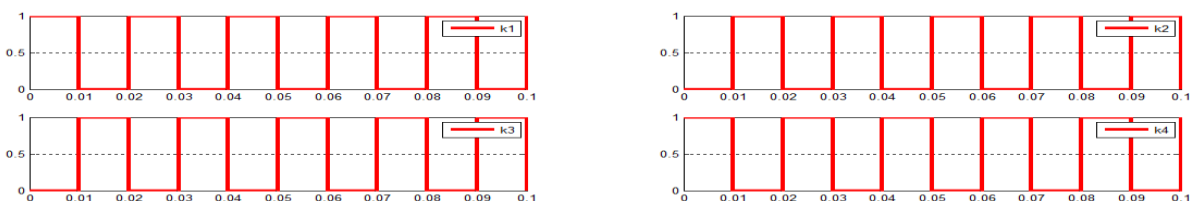


Figure III.23 : séquence de commande d'un pont H (k1...K4)

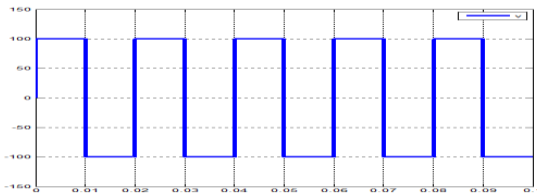


Figure III.24 : tension de sortie v

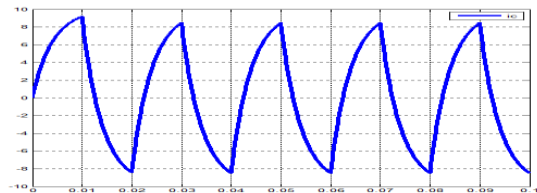


Figure III.25 : courant de sortie ic

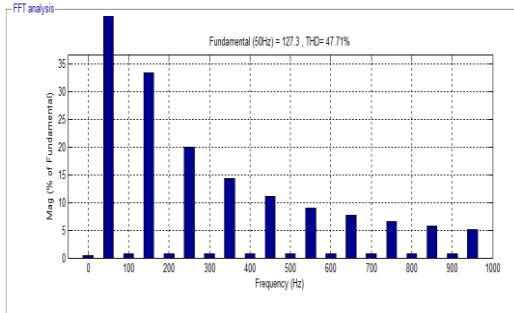


Figure III.26 : spectre d'harmonique de tension v

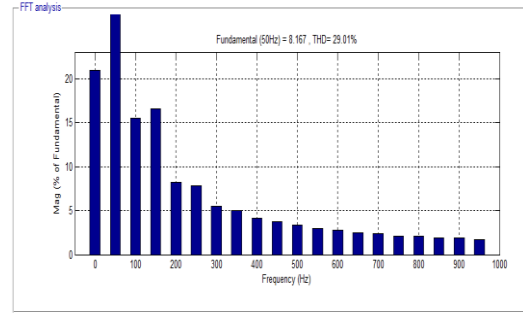


Figure III.27 : spectre d'harmonique de courant ic

### III.3.5.Simulation d'un onduleur cascade cinq niveaux monophasés

#### a. Montage

Pour les mêmes paramètres précédents, nous allons simuler le montage d'un onduleur monophasé cascade à 5 niveaux

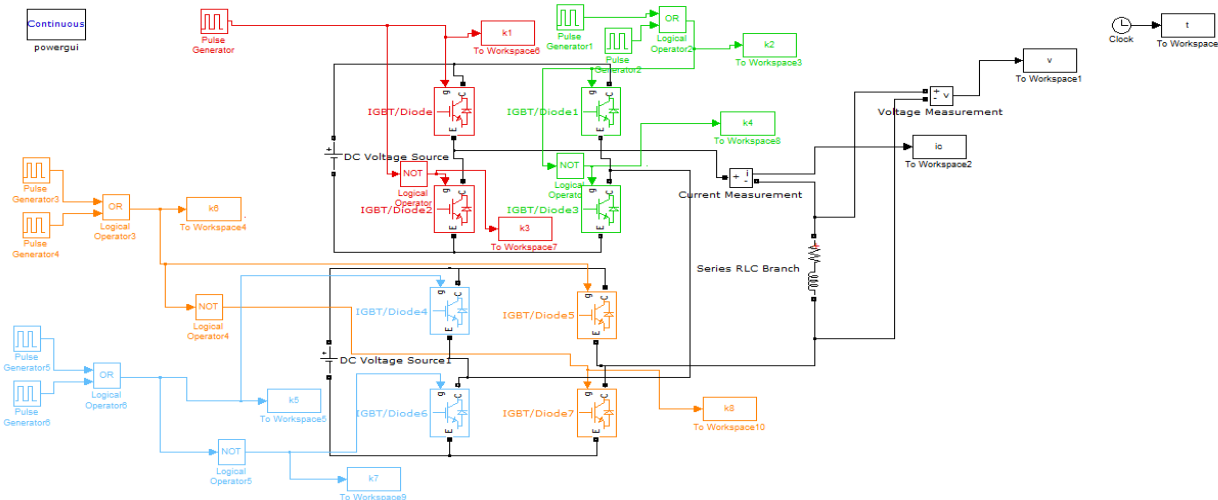


Figure III.28 : schéma bloc d'un onduleur monophasé cascade cinq niveaux

#### b. Résultats de simulation

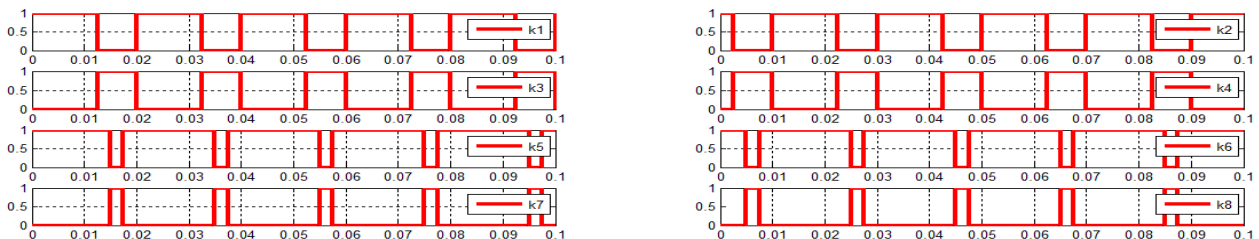


Figure III.29 : séquence de commande d'un onduleur monophasé cascade cinq niveaux (k1...K8)

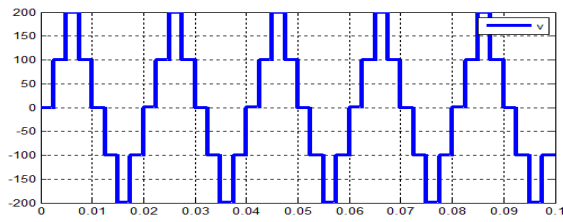


Figure III.30 : tension de sortie v

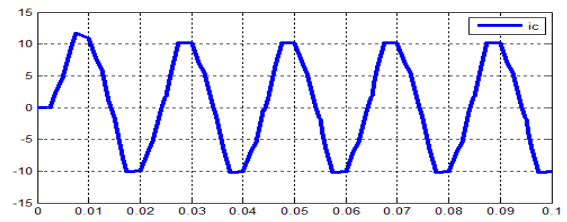


Figure III.31 : courant de sortie ic

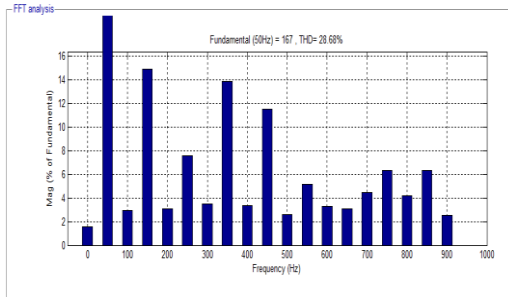


Figure III.32 : spectre d'harmonique de tension v

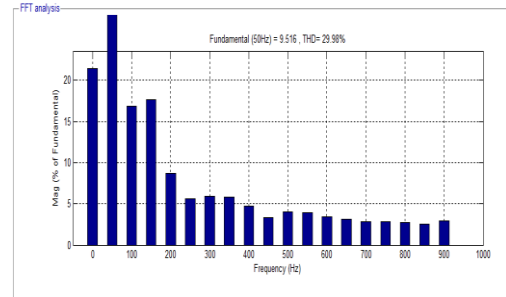


Figure III.33 : spectre d'harmonique de courant ic

### III.3.6. Simulation d'un onduleur cascade sept niveaux monophasés

#### a. Montage

Pour les mêmes paramètres précédents, nous allons simuler le montage d'un onduleur monophasé cascade à 7 niveaux

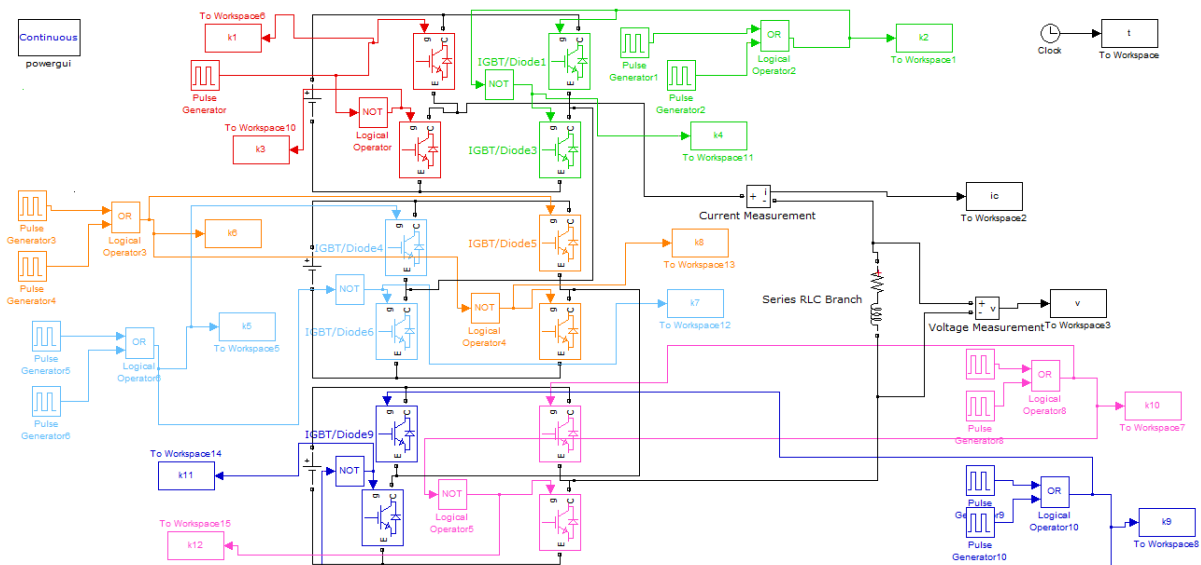


Figure III.34 : schéma bloc d'un onduleur monophasé cascade sept niveaux

#### b. Résultats de simulation

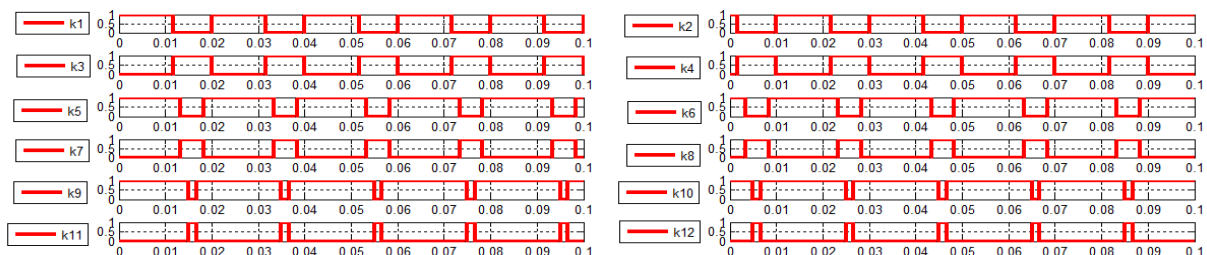


Figure III.35 : séquence de commande d'un onduleur monophasé cascade sept niveaux (k1...K12)

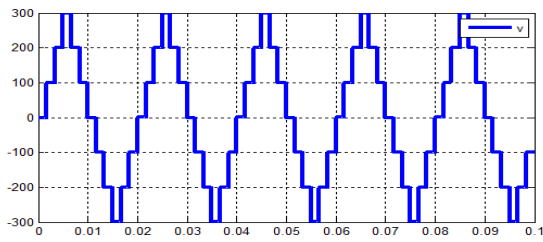


Figure III.36 : tension de sortie v

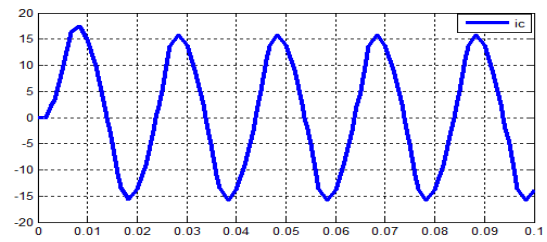


Figure III.37 : courant de sortie ic

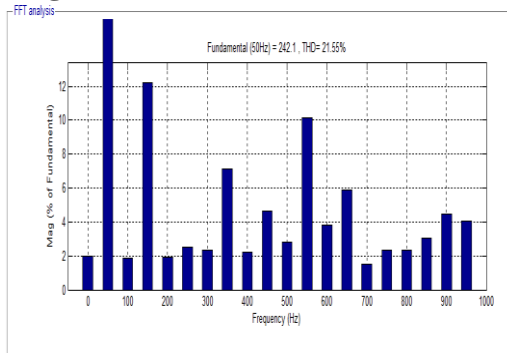


Figure III.38 : spectre d'harmonique de tension v

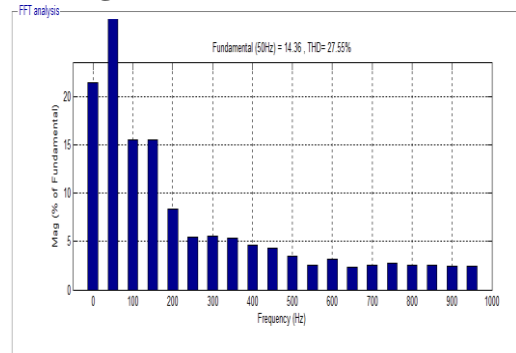


Figure III.39 : spectre d'harmonique de courant ic

### III.3.7.Simulation d'un onduleur cascade neuf niveaux monophasés

#### a. Montage

Pour les mêmes paramètres précédents, nous allons simuler le montage d'un onduleur monophasé cascade à 9 niveaux

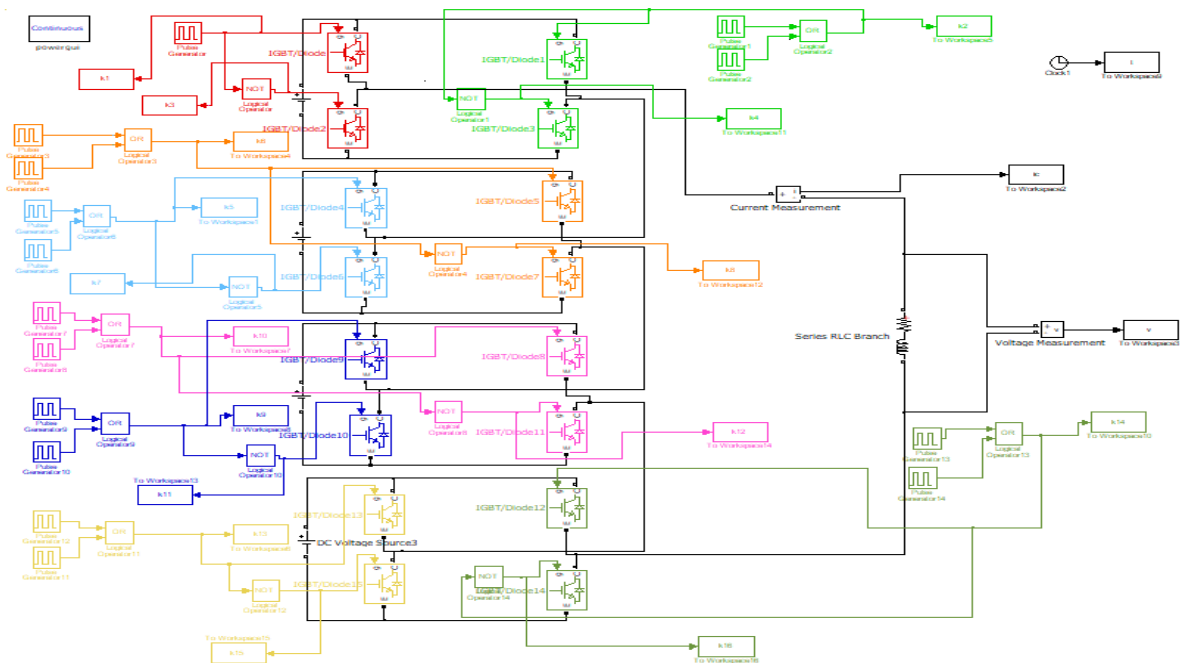
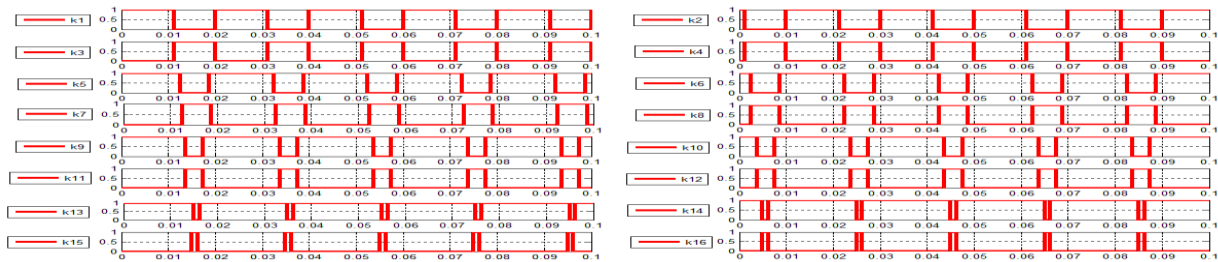
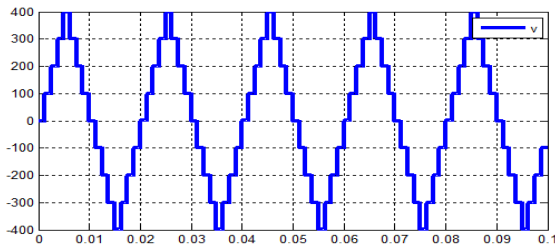


Figure III.40 : schéma bloc d'un onduleur monophasé cascade neuf niveaux

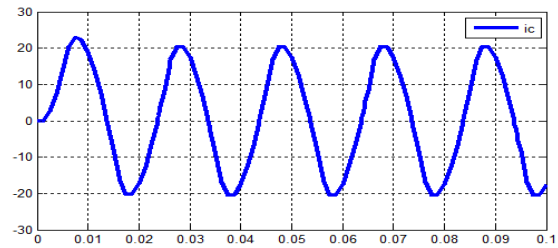
**b. Résultats de simulation**



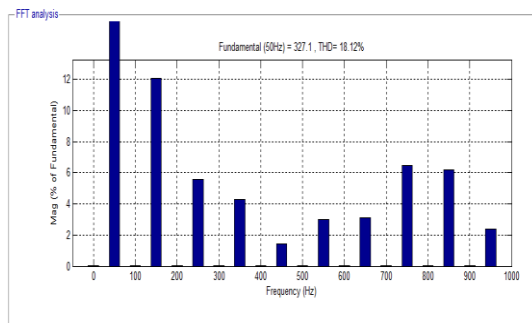
**Figure III.41 :** séquence de commande d'un onduleur monophasé cascade neuf niveaux (k1...K16)



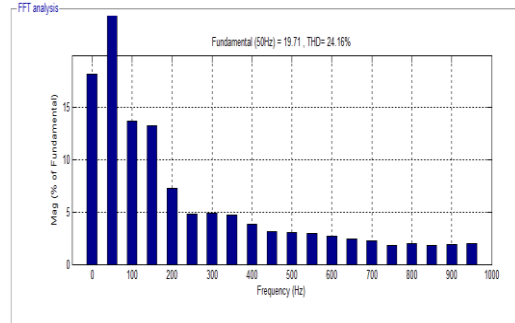
**Figure III.42 :** tension de sortie v



**Figure III.43 :** courant de sortie ic



**Figure III.44 :** spectre d'harmonique de tension v



**Figure III.45 :** spectre d'harmonique de courant ic

**Tableau III.2 :** Facteurs de distorsion de type cascade d'onduleur monophasé

Commande commandé par une pleine onde								
Nombre de niveaux	Trois Niveaux		Cinq niveaux		Sept niveaux		Neuf niveaux	
THD%	La tension	Le courant	La tension	Le courant	La tension	Le courant	La tension	Le courant
		47.71	29.01	28.68	29.98	21.55	27.55	18.12

**Interprétation des résultats**

- Les figures III.23 et III.29 et III.35 et III.41 montrent les signaux de commande pour la génération d'une tension pour les structures en pont H, cinq niveaux (n=5), sept niveaux (n=7) et neuf niveaux (n=9) d'un onduleur cascade monophasé.

- Les figures III.24, III.30, et III.36, III.42 représentent les résultats de simulation des tensions de la sorties de chaque structures (pont H, 5, 7 et 9 niveaux cascade) La tension aux bornes de la charge est alternative entre +100V et -100V pour le pont en H, entre +200V et -200V pour 5 niveaux, entre +300V et -300V pour sept niveaux, entre +400V et -400V pour 9 niveaux toute en représentant les niveaux tension souhaitées de chaque structure.
- Les figures III.25, III.31, III.37, et III.43 présentent les résultats de simulation des courant de la sorties pour la charge R-L (pont H, 5,7 et 9 niveaux cascade)

L'analyse des figures III.26, III.27, III.32, III.33, III.38, III.39, III.44, III.45 ainsi que du Tableau III.2 montre que :

- pour d'un onduleur cascade à pont H on remarque que Le taux de distorsion harmonique des tensions et des courant est très élevé (faible qualité d'énergie). La tension générée par cette stratégie à une forme quasi rectangulaire, cela signifie que nous sommes encore loin d'obtenir un signal sinusoïdal et cela se constate au niveau des harmoniques où le signal est très pollué.

Le courant a une croissance exponentielle de la valeur minimale à la valeur maximale.

- Pour l'onduleur cascade à cinq niveaux on constate que nous avons moins d'harmoniques par rapport à la structure en pont H ce qui signifie que le signal est moins pollué. Cependant, nous sommes encore loin d'obtenir un signal sinusoïdal et cela se constate au niveau des harmoniques où le spectre d'harmoniques de la tension de sortie et de courant est très riche en harmoniques pour les rangs de faible fréquences et donc présente un filtrage difficile, ce qui indique que leurs formes sont très éloignées de la forme sinusoïdale.
- pour le cas de l'onduleur en cascade à sept niveaux nous remarquons que les résultats sont meilleurs que ceux dans l'onduleur en cascade à trois niveaux et que ceux de l'onduleur en pont H.

Les résultats obtenus confirment que la montée en niveaux réduit le THD qui passe de 29,98%(en courant) et 28,68% (en tension) en cinq niveaux, à 27,55%(en courant) et 21,55%(en tension) dans les cas de l'onduleur sept niveaux, nous concluons alors lorsqu'on augmente le nombre de niveaux de l'onduleur, le THD se diminue c.à.d. que la forme du courant et de tension serait proche a la sinusoïde.

- Pour l'onduleur cascade à neuf niveaux Nous remarquons les résultats sont meilleurs par rapport aux structures précédentes ainsi que les THD du courant et de la tension sont

réduits. Nous concluons alors que la structure en cascade neuf niveaux fournit un signal plus proche de la forme sinusoïdale que les autre structures.

Ainsi nous remarquons que la commande en pleine onde est relativement simple à mettre en œuvre pour n'importe quelle structure (onduleur monophasé ou triphasé) mais elle fournit un signal qui n'est pas parfaitement sinusoïdal.

### III.4.Simulation d'un onduleur multiniveaux commandé par la technique MLI Sinusoïdale-Triangle

#### III.4.1.Simulation d'un onduleur NPC trois niveaux monophasés :

##### a. Montage

Les paramètres de la simulation sont :

- ✚ Source de tension continue :  $E=100V$
- ✚ Charge monophasé équilibrée :  $R=10\text{ Ohm}$   $L=0.04\text{ H}$
- ✚ Rapport de la fréquence de la porteuse :  $f_p=500\text{ HZ}$
- ✚ Rapport de la fréquence de la référence :  $f_m=50\text{ HZ}$
- ✚ Le rapport de l'amplitude de la référence :  $A_m=1$
- ✚ Le rapport de l'amplitude de la porteuse :  $A_p=1$

Donc : L'indice de modulation :  $m = 10$       Le coefficient de réglage :  $r = 1$

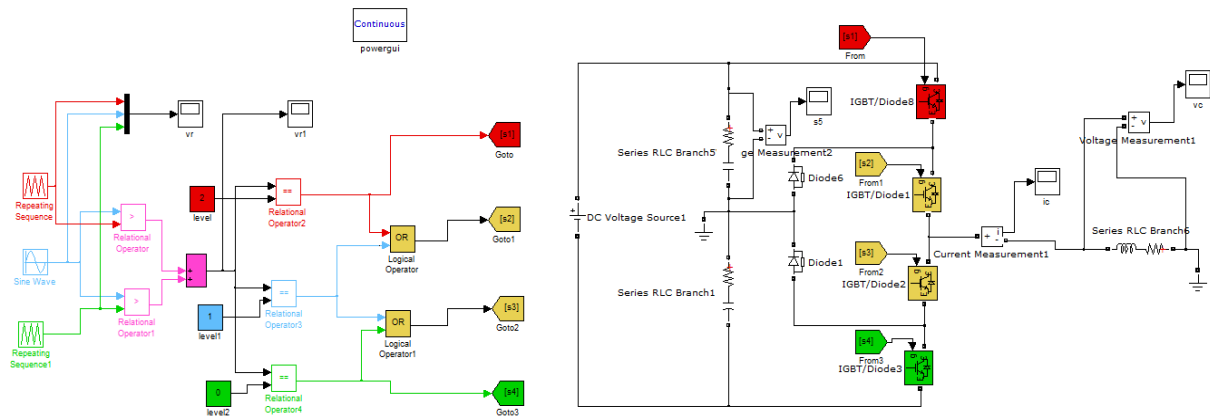


Figure III.46 : schéma bloc d'un onduleur monophasé NPC trois niveaux

##### b. Résultats de simulation

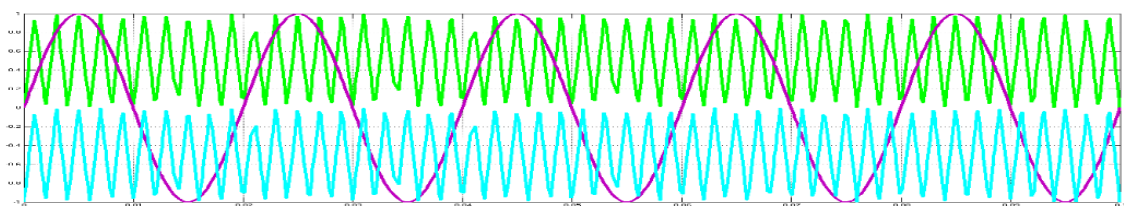


Figure III.47 : signaux de références avec deux porteuses pour un onduleur NPC à trois niveaux monophasé



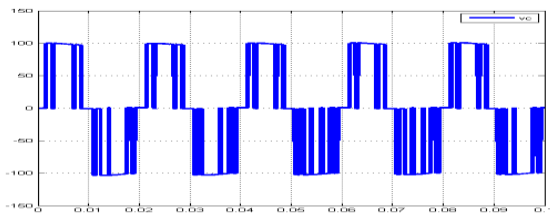


Figure III.48 : tension de sortie vc à la sortie de l'onduleur 3N

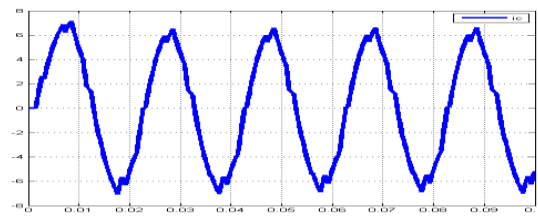


Figure III.49 : courant de sortie ic à la sortie de l'onduleur 3N

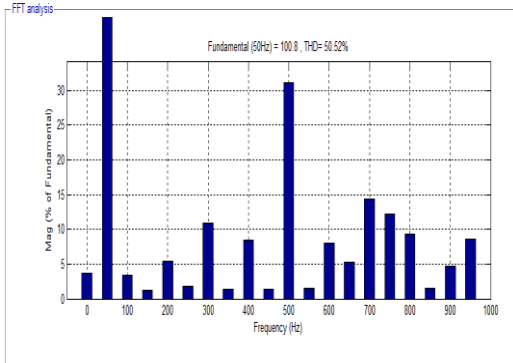


Figure III.50 : spectre d'harmonique de tension vc

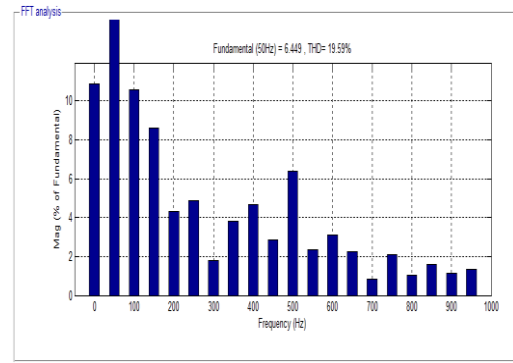


Figure III.51 : spectre d'harmonique de courant ic

### III.4.2. Simulation d'un onduleur NPC cinq niveaux monophasés

#### a. Montage

Pour les mêmes paramètres précédents, nous allons simuler le montage d'un onduleur monophasé NPC à 5 niveaux avec un changement de  $A_m$  et  $A_p$  comme suit :

- ✚ Le rapport de l'amplitude de la référence :  $A_m=2$
- ✚ Le rapport de l'amplitude de la porteuse :  $A_p=2$

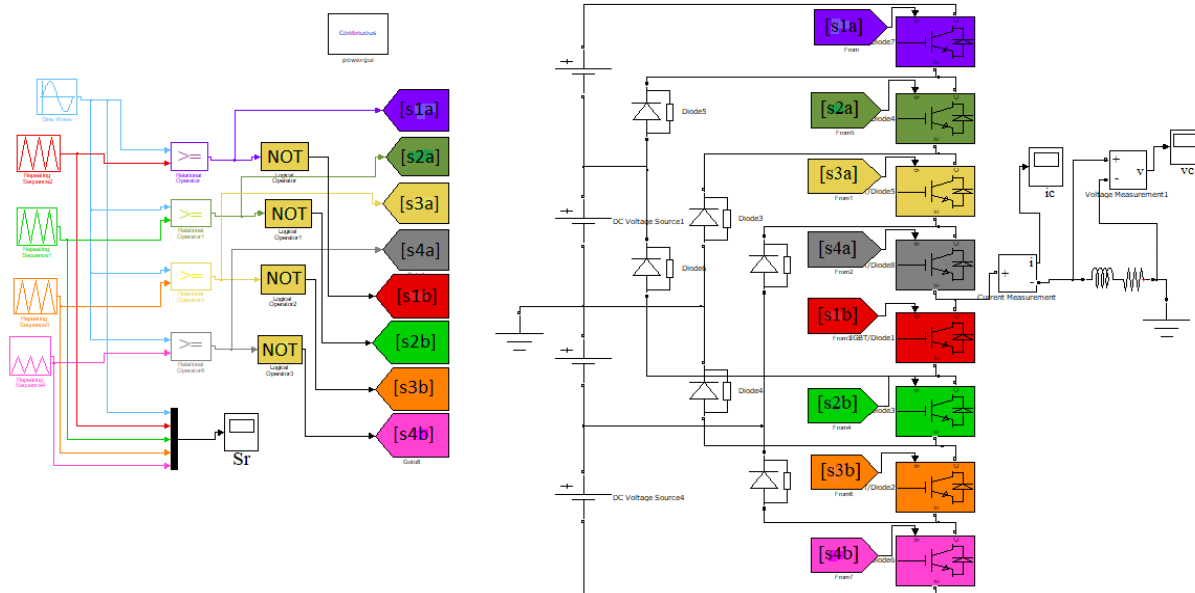
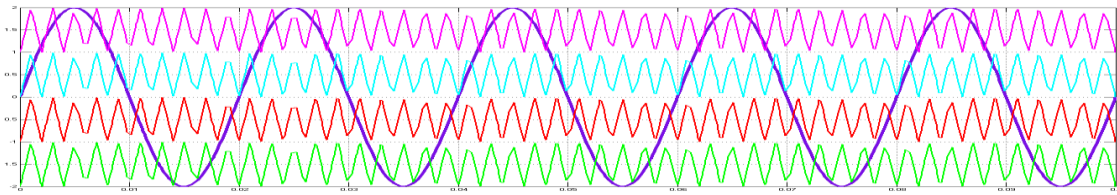
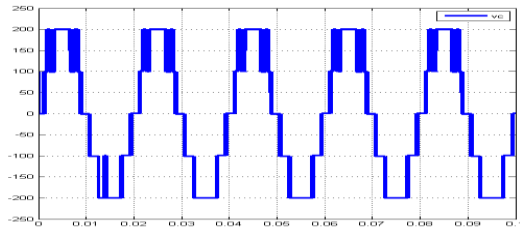


Figure III.52 : schéma bloc d'un onduleur monophasé NPC cinq niveaux

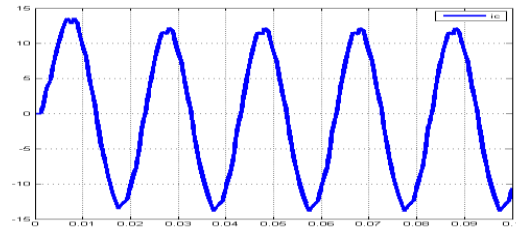
**b. Résultats de simulation**



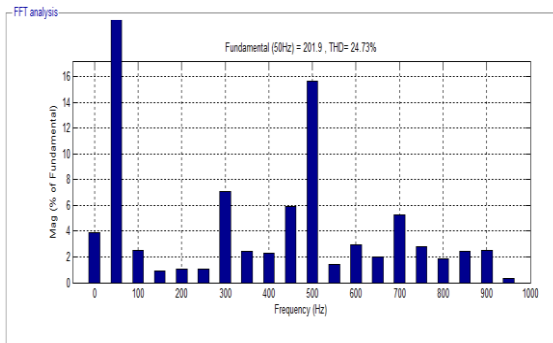
**Figure III.53 :** signaux de références avec quatre porteuses pour un onduleur à cinq niveaux



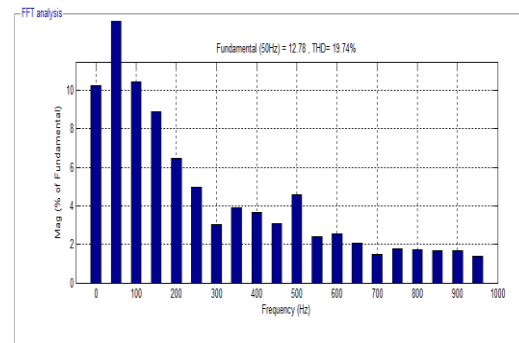
**Figure III.54 :** tension de sortie vc à la sortie de l'onduleur 5N



**Figure III.55 :** courant de sortie ic à la sortie de l'onduleur 5N



**Figure III.56 :** spectre d'harmonique de tension vc



**Figure III.57 :** spectre d'harmonique de courant ic

**III.4.3.Simulation d'un onduleur NPC sept niveaux monophasés**

**a. Montage**

Pour les mêmes paramètres précédents, nous allons simuler le montage d'un onduleur monophasé NPC à 7 niveaux avec un changement de  $A_m$  et  $A_p$  comme suit :

- ✚ Le rapport de l'amplitude de la référence :  $A_m=3$
- ✚ Le rapport de l'amplitude de la porteuse :  $A_p=3$

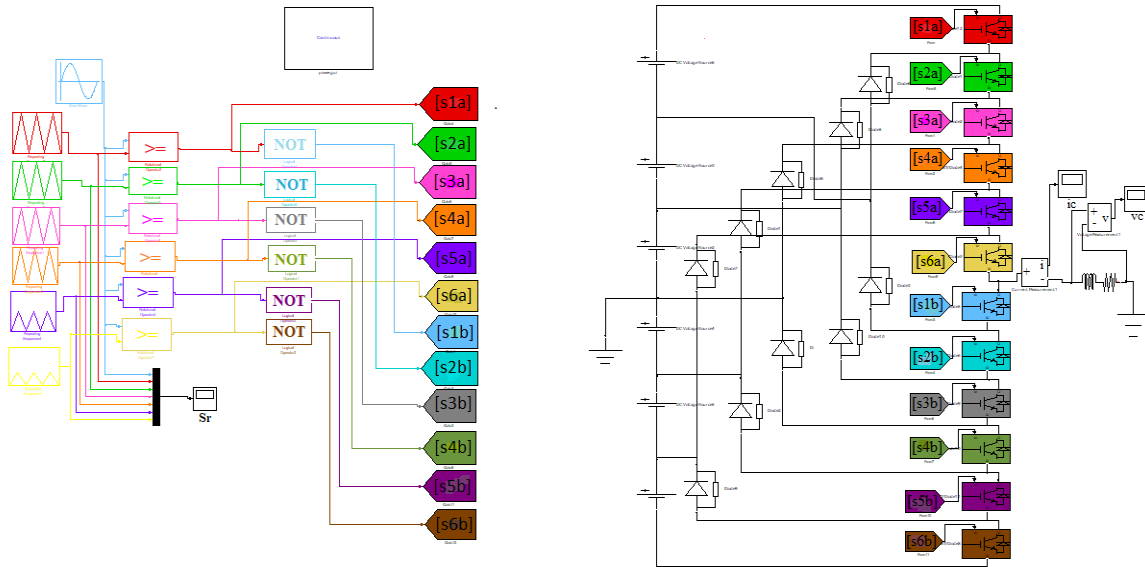


Figure III.58 : schéma bloc d'un onduleur monophasé NPC sept niveaux

**b. Résultats de simulation**

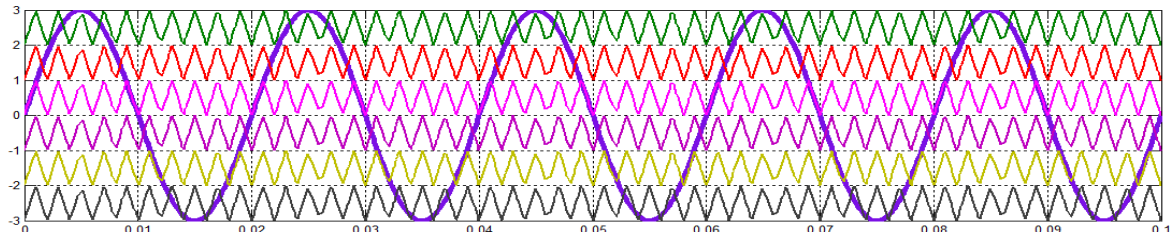


Figure III.59 : signaux de références avec six porteuses pour un onduleur à sept niveaux

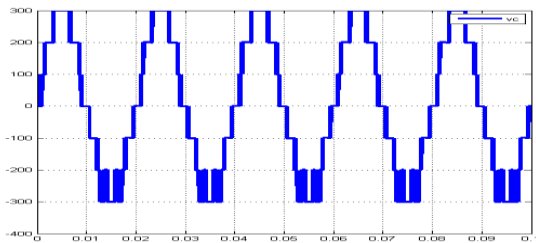


Figure III.60 : tension de sortie vc à la sortie de l'onduleur 7N

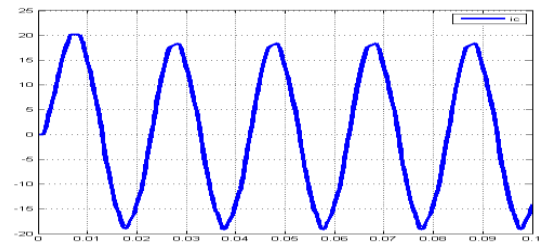


Figure III.61 : courant de sortie ic à la sortie de l'onduleur 7N

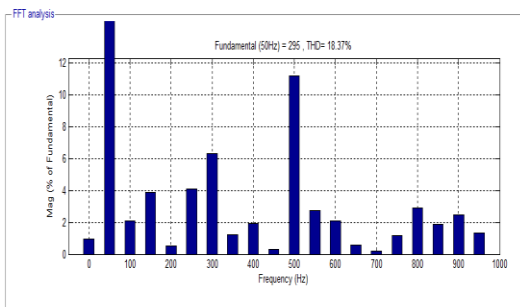


Figure III.62 : spectre d'harmonique de tension vc

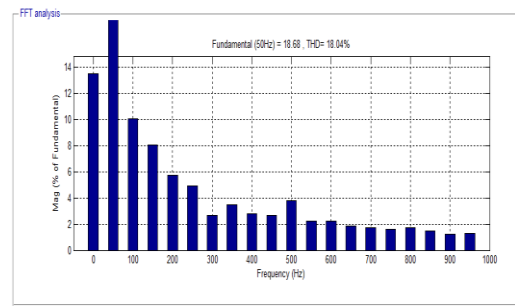


Figure III.63 : spectre d'harmonique de courant ic

**Tableau III.3** : Facteurs de distorsion de type NPC d'onduleur monophasé

Commande MLI sinusoïdale-Triangle						
Nombre de niveaux	Trois Niveaux		Cinq niveaux		Sept niveaux	
Le THD %	La tension	Le courant	La tension	Le courant	La tension	Le courant
		50,52	19,59	24,73	19,74	18,37

### Interprétations des Résultats

- Les figures III.47 et III.53 et III.59 montrent les signaux nécessaires pour la génération d'une tension ayant trois niveaux (n=3), cinq niveaux (n=5) et sept niveaux (n=7) d'un onduleur NPC, avec  $m=10$  ( $f_p = 500$  Hz) et  $r=1$ .
- Les figures III.48, III.54, et III.60 présentent les résultats de simulation des tensions simples de la sorties de chaque onduleur (3, 5 et 7 niveaux NPC).
- Les figures III.49, III.55, et III.61 présentent les résultats de simulation des courant de la sorties de chaque onduleur (3, 5 et 7 niveaux NPC).

L'analyse des figures III50, III51, III56, III57, III62, III63 ainsi que du Tableau III.3 donne :

- pour d'un onduleur NPC à trois niveaux on remarque que le taux d'harmonique de tension et de courant est assez élevé.
- pour d'un onduleur NPC à cinq niveaux on remarque que le taux d'harmonique est inférieur à celui de l'onduleur 3 niveaux.
- pour d'un onduleur NPC à sept niveaux on remarque que le taux d'harmonique de tension  $v_c$  et de courant  $i_c$  est inférieur à celui de l'onduleur 5 niveaux. Le taux de distorsion harmonique de tension simple de l'onduleur 7 niveaux est un bon taux.
- les harmoniques proches du fondamentale, sont faibles tandis que les harmoniques de rang élevé prennent une amplitude importante.

On remarque que, lorsqu'on augmente le nombre de niveaux de l'onduleur, le THD se diminuait, la forme du courant et de tension se reproche de plus en plus en sinusoïde.

### III.4.4.Simulation d'un onduleur NPC trois niveaux triphasé

#### a. Montage

Nous utilisons les mêmes paramètres de la structure monophasé précédentes avec :

- ✚ Le rapport de l'amplitude de la référence :  $A_m=1$
- ✚ Le rapport de l'amplitude de la porteuse :  $A_p=1$

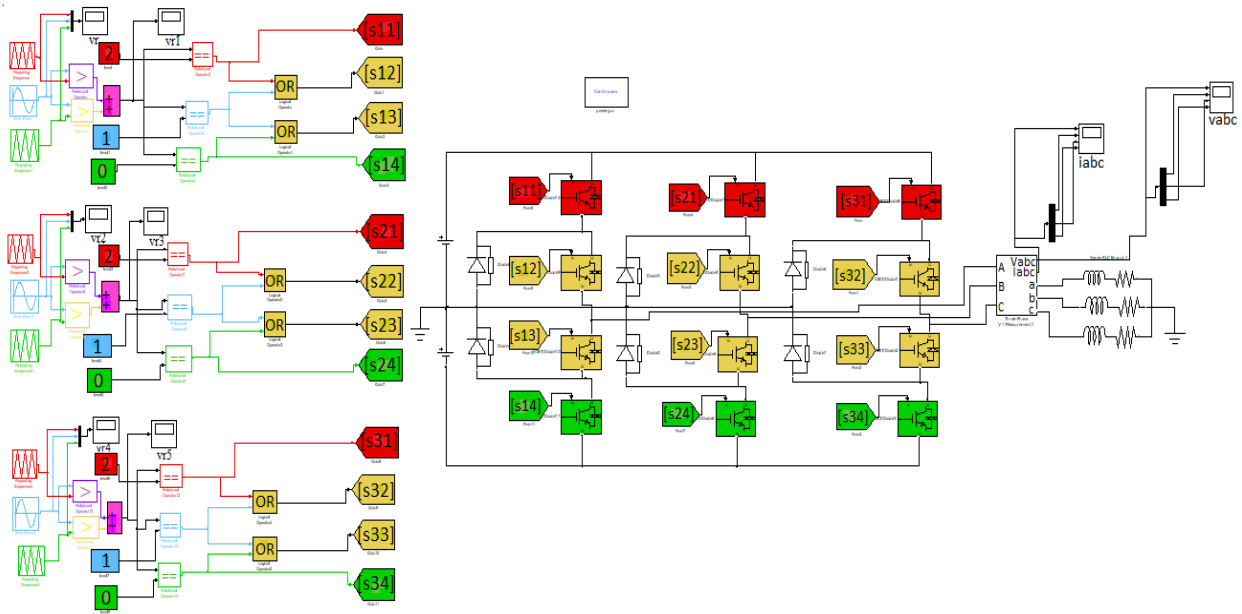


Figure III.64 : schéma bloc d'un onduleur triphasé NPC trois niveaux

a. Résultats de simulation

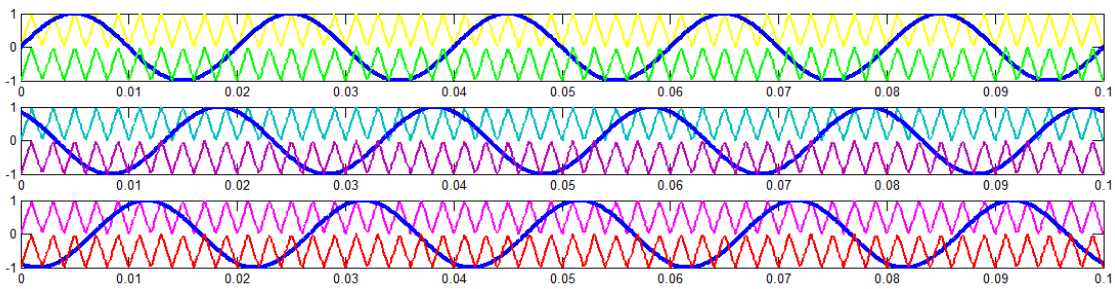


Figure III.65 : signaux de références avec deux porteuses de trois bras pour un onduleur à trois niveaux triphasé

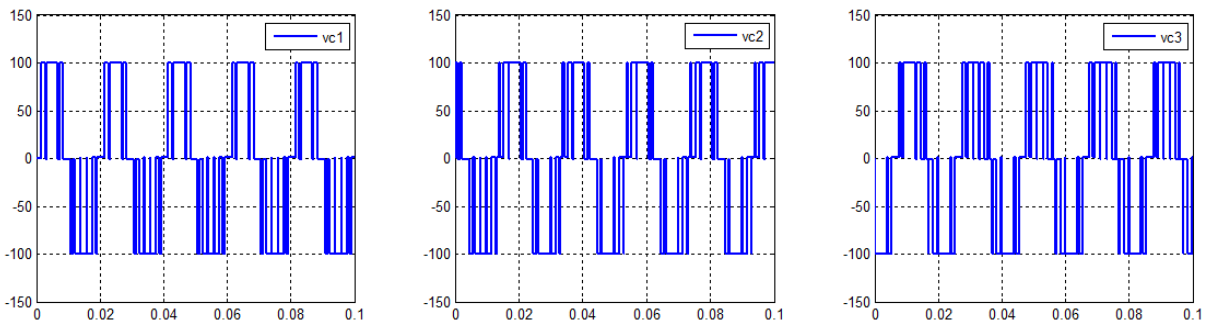


Figure III.66 : tension simple de sortie vc1 vc2 vc3 à la sortie de l'onduleur triphasé 3N

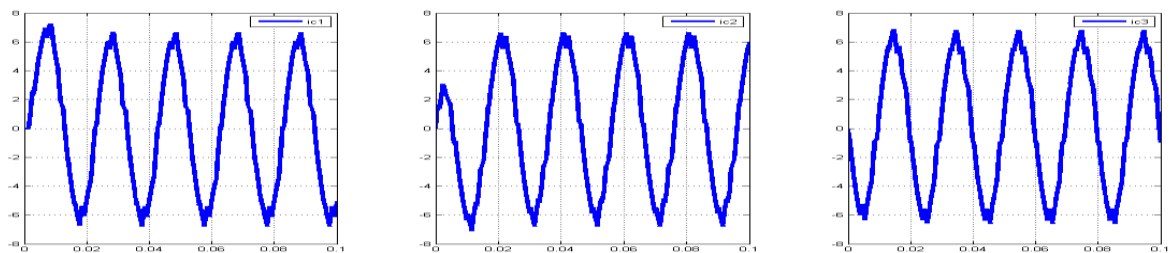


Figure III.67 : courant de sortie ic1 ic2 iv3 à la sortie de l'onduleur triphasé 3N

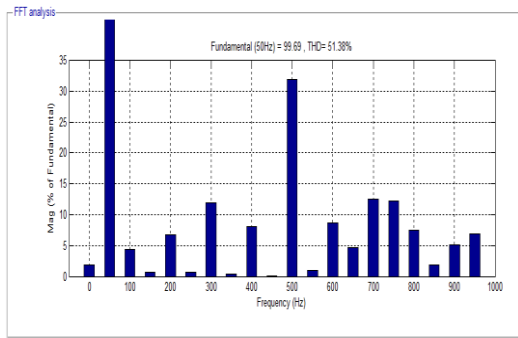


Figure III.68 : spectre d'harmonique de tension simple  $v_{c1}$

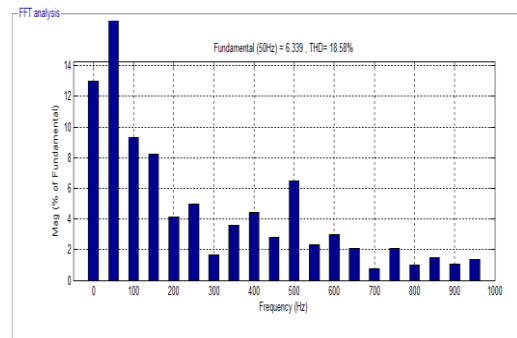


Figure III.69 : spectre d'harmonique de courant  $i_{c1}$

### III.4.5. Simulation d'un onduleur NPC cinq niveaux triphasé

#### a. Montage

Pour les mêmes paramètres précédents, nous allons simuler le montage d'un onduleur triphasé NPC à 5 niveaux avec  $A_m=2$  et  $A_p=2$

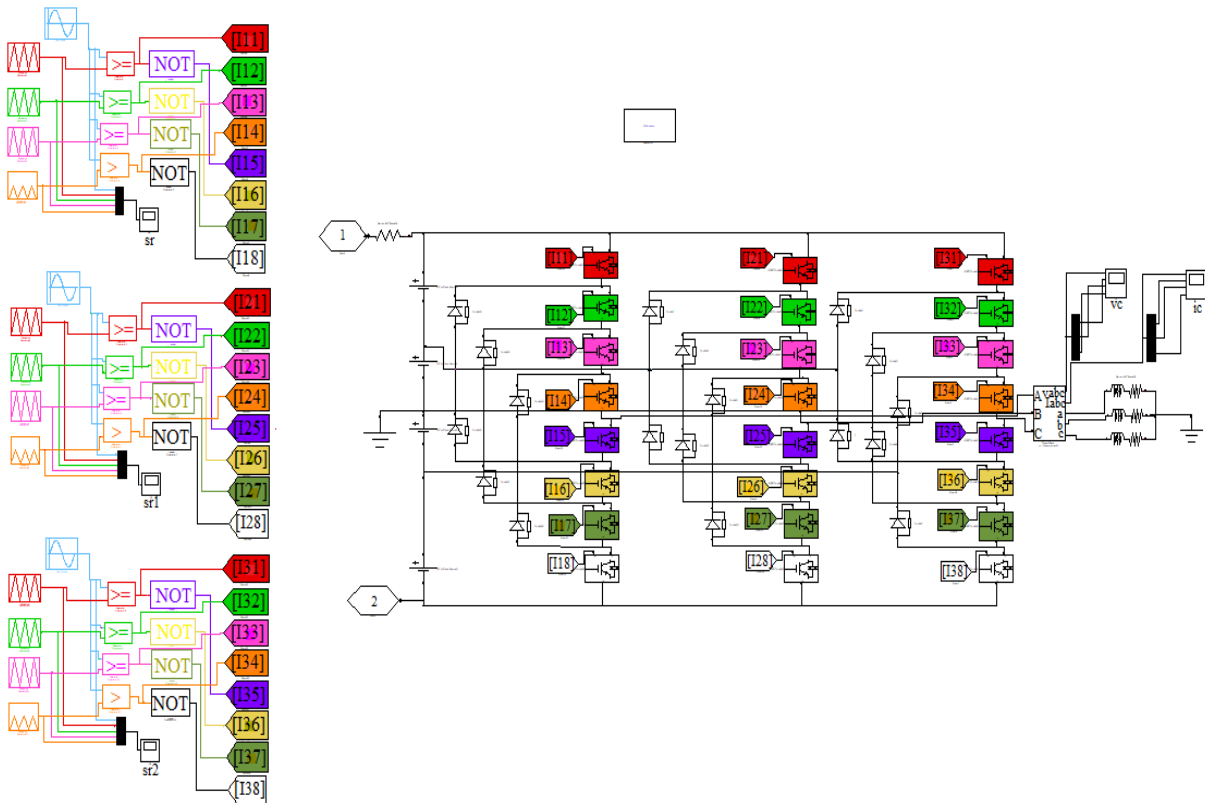


Figure III.70 : schéma bloc d'un onduleur triphasé NPC cinq niveaux

#### b. Résultats de simulation

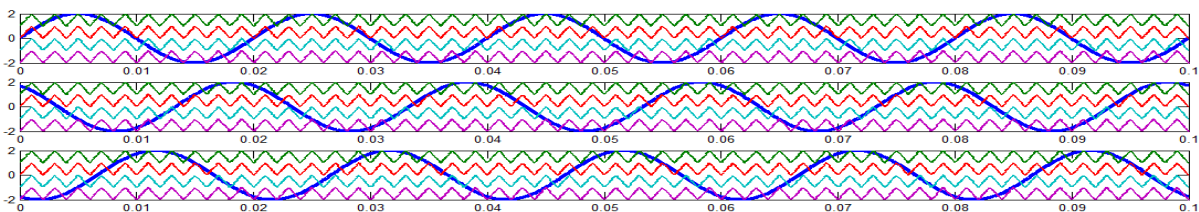


Figure III.71 : signaux de références avec quatre porteuses de trois bras pour un onduleur à cinq niveaux triphasé

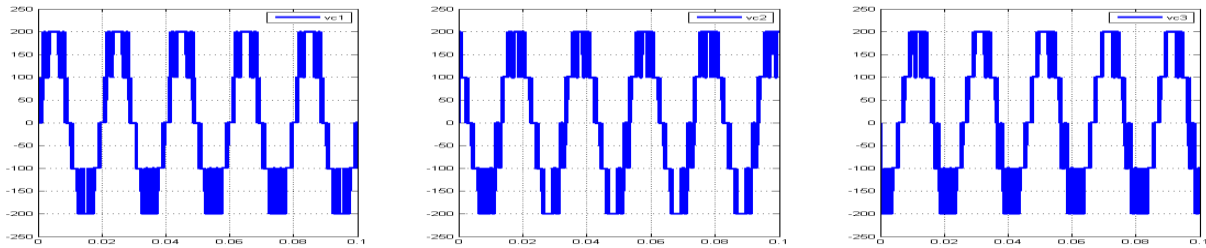


Figure III.72 : tension simple de sortie vc1 vc2 vc3 à la Sortie de l'onduleur triphasé 5N

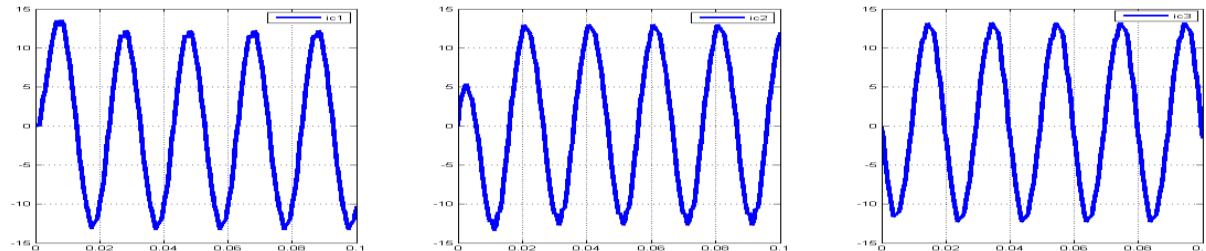


Figure III.73 : courant de sortie ic1 ic2 ic3 à la sortie de l'onduleur triphasé 5N

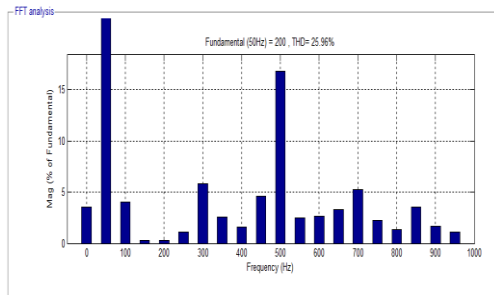


Figure III.74 : spectre d'harmonique de tension simple vc1

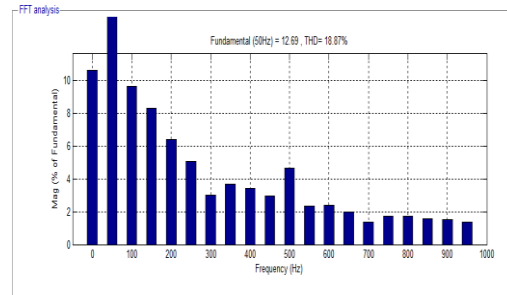


Figure III.75 : spectre d'harmonique de courant ic1

### III.4.6.Simulation d'un onduleur NPC sept niveaux triphasé

Les nouveaux paramètres de la simulation sont :

- ✚ Rapport de la fréquence de la porteuse :  $f_p=1000$  HZ
- ✚ Rapport de la fréquence de la référence :  $f_m=50$  HZ
- ✚ Le rapport de l'amplitude de la référence :  $A_m=1.5$
- ✚ Le rapport de l'amplitude de la porteuse :  $A_p=1.5$

Donc : L'indice de modulation :  $m = 20$  Le coefficient de réglage :  $r = 1$

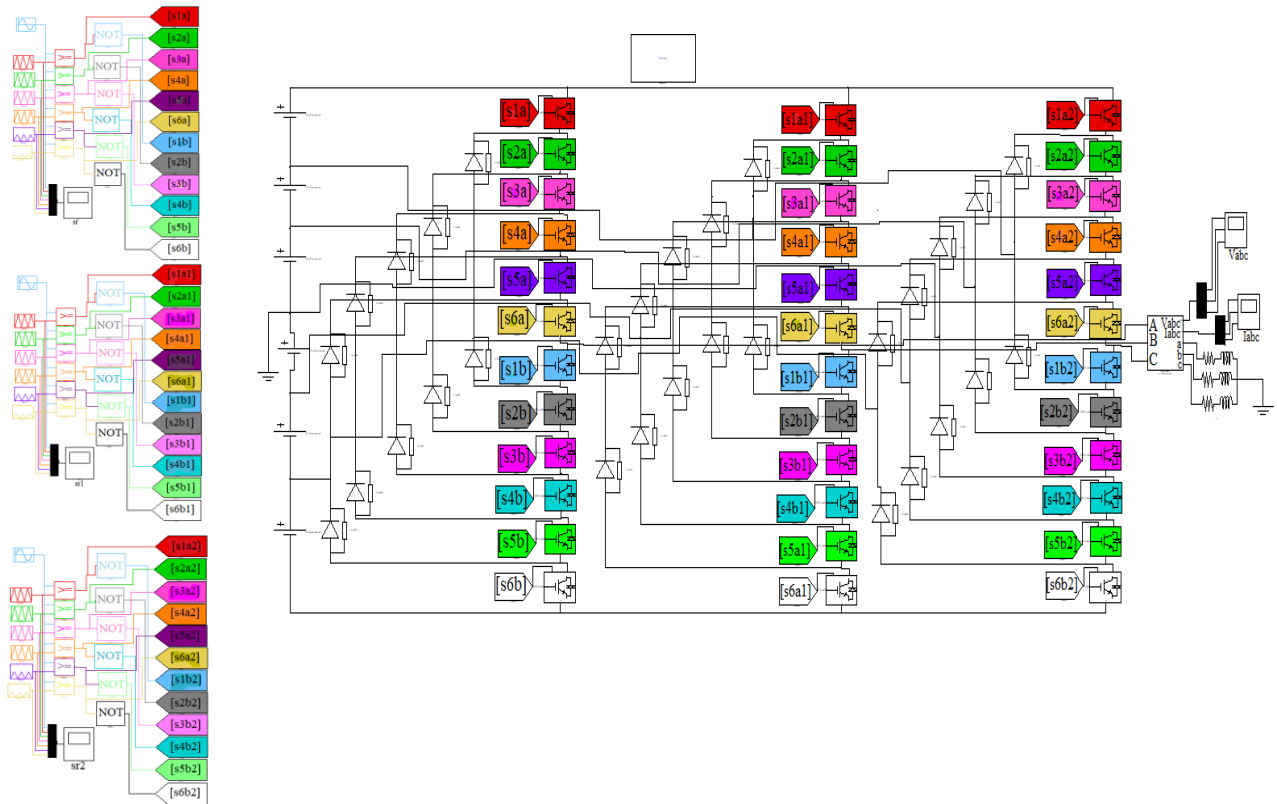


Figure III.76 : schéma bloc d'un onduleur triphasé NPC sept niveaux

**b. Résultats de simulation**

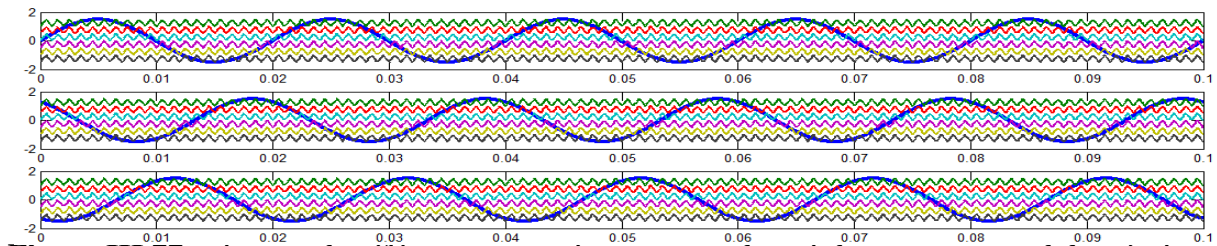


Figure III.77 : signaux de références avec six porteuses de trois bras pour un onduleur à cinq niveaux triphasé

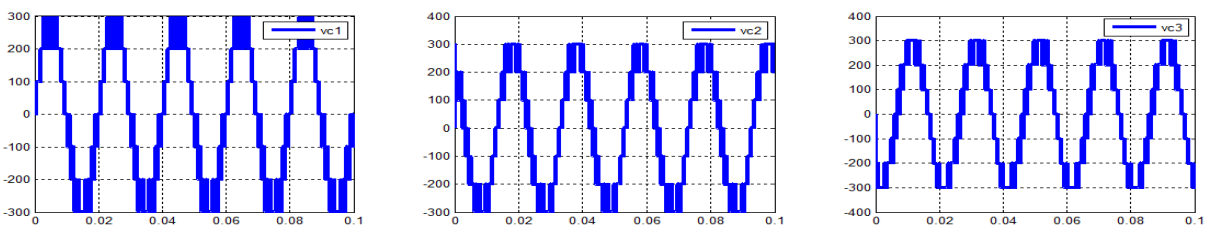


Figure III.78 : tension simple de sortie vc1 vc2 vc3 à la Sortie de l'onduleur triphasé 7N

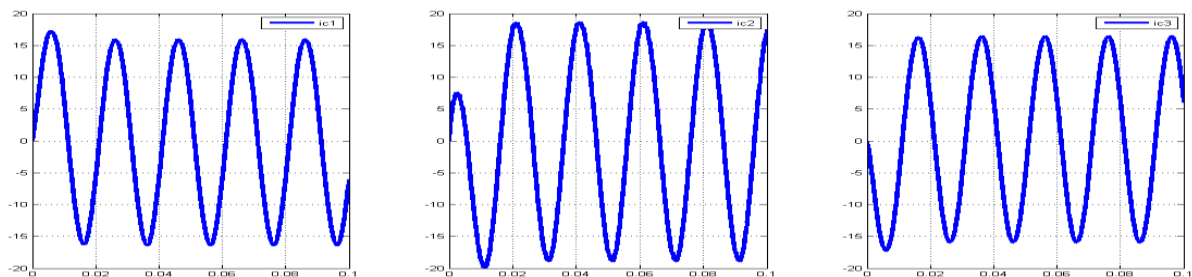


Figure III.79 : courant de sortie ic1 ic2 ic3 à la sortie de l'onduleur triphasé 7N



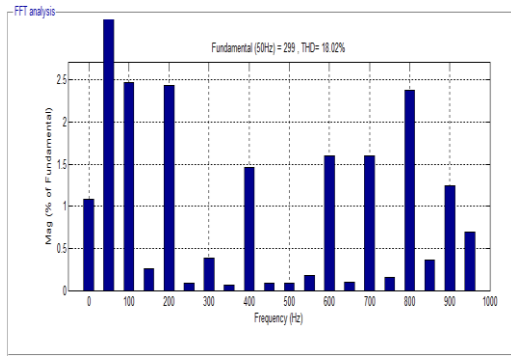


Figure III.80 : spectre d'harmonique de tension simple vc1

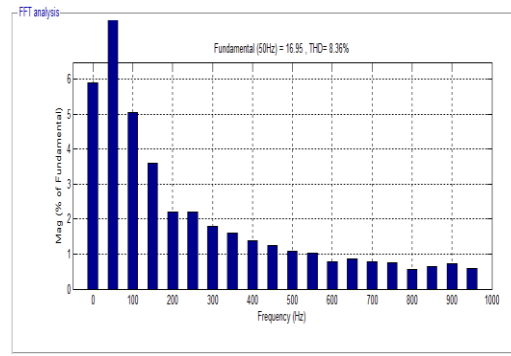


Figure III.81 : spectre d'harmonique de courant ic1

Tableau III.4 : Facteurs de distorsion de type NPC d'onduleur triphasé commande MLI sinusoïdale-Triangle

Nombre de niveaux	Trois Niveaux		Cinq niveaux		Sept niveaux	
	La tension	Le courant	La tension	Le courant	La tension	Le courant
THD %	51,38	18,58	25,96	18,87	18,02	8,36

Interprétations des Résultats

- Les figures III.65 et III.71 et III.77 montrent les signaux de commande de la structure NPC triphasé de trois niveaux (n=3), cinq niveaux (n=5), avec m=10 (fp = 500 Hz) et r=1 et sept niveaux (n=7) avec m=20 (fp=1000 Hz) et r=1.
- Les figures III.66, III.72, et III.78 présentent les courbes des tensions simples de sorties de chaque structure (3, 5 et 7 niveaux NPC triphasé)
- Les figures III.67, III.73, et III.79 présentent les allures des courant de la sorties de chaque structures (3, 5 et 7 niveaux NPC triphasé)

Les figures III.68, III.69, III.74, III.75, III.80, III.81 ainsi le Tableau III.4 montrent que :

- Un taux d'harmonique de tension et de courant assez élevé pour l'onduleur NPC triphasé à trois niveaux.
- pour l'onduleur NPC triphasé à cinq niveaux on remarque que le taux d'harmonique est inférieur à celui de l'onduleur triphasé à 3 niveaux.
- pour l'onduleur NPC triphasé à sept niveaux les taux d'harmoniques de tension simple vc et de courant ic sont inférieurs aux deux structures précédentes et présentent des THD raisonnables.

On remarque que :

- ✓ lorsqu'on augmente le nombre de niveaux de l'onduleur, le THD diminue, la forme du courant et de tension proche à la sinusoïde.
- ✓ L'augmentation de l'indice de modulation « m » permet de repousser les harmoniques de la tension de phase vers les fréquences très élevées et améliore les performances des grandeurs de sortie notamment le THD. Cela dit que les harmoniques proches du fondamentale, sont faibles tandis que les harmoniques de rang élevé prennent une amplitude importante.

### III.4.7.Simulation d'un onduleur cascade trois niveaux monophasés

#### a. Montage

Les paramètres de la simulation sont :

- ✚ Source de tension continue :  $E=100V$
- ✚ Charge monophasé équilibrée :  $R=10\text{ Ohm}$   $L=0.04\text{ H}$
- ✚ Rapport de la fréquence de la porteuse :  $f_p=500\text{ HZ}$
- ✚ Rapport de la fréquence de la référence :  $f_m=50\text{ HZ}$
- ✚ Le rapport de l'amplitude de la référence :  $A_m=1$
- ✚ Le rapport de l'amplitude de la porteuse :  $A_p=1$

Donc :

L'indice de modulation :  $m = 10$

Le coefficient de réglage :  $r = 1$

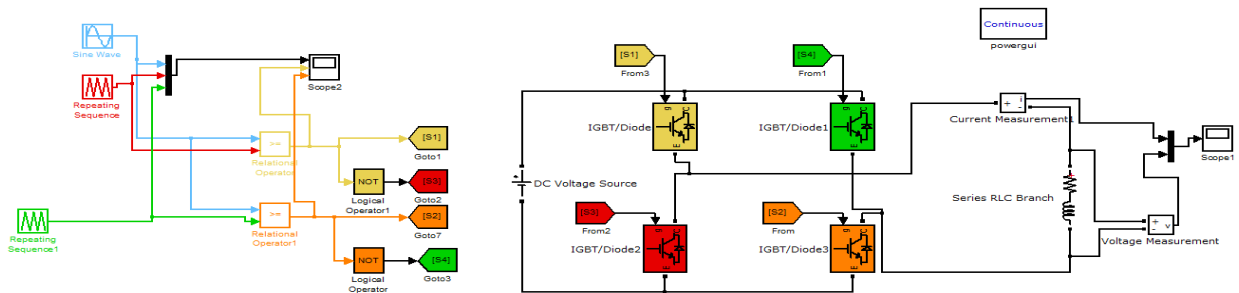


Figure III.82 : schéma bloc d'un onduleur monophasé cascade trois niveaux

#### b. résultats de simulation

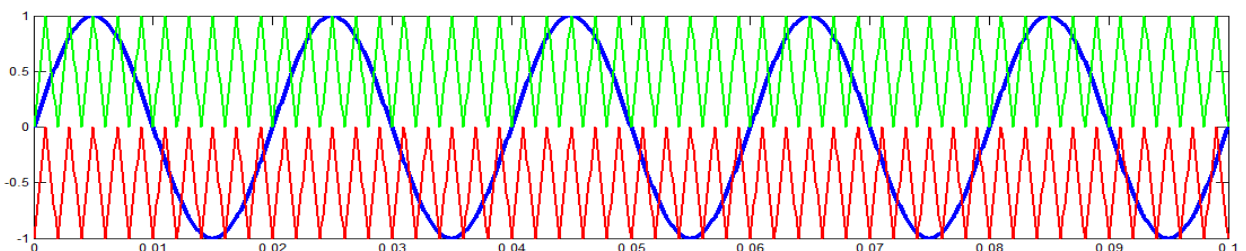


Figure III.83 : signaux de références avec deux porteuses pour un onduleur cascade à trois niveaux monophasé

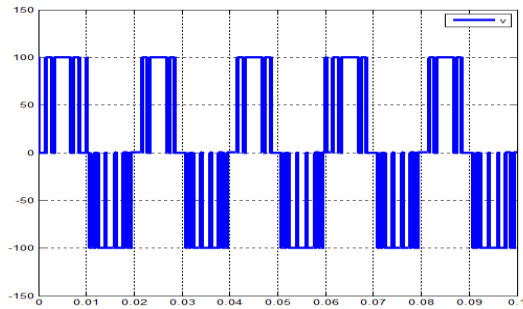


Figure III.84 : tension de sortie v à la sortie de l'onduleur 3N

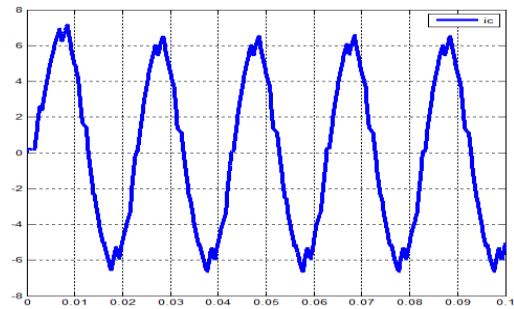


Figure III.85 : courant de sortie ic à la sortie de l'onduleur 3N

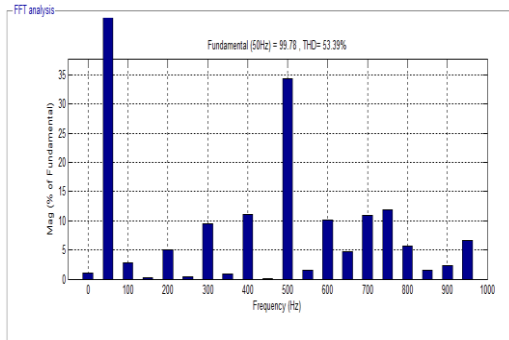


Figure III.86 : spectre d'harmonique de tension v

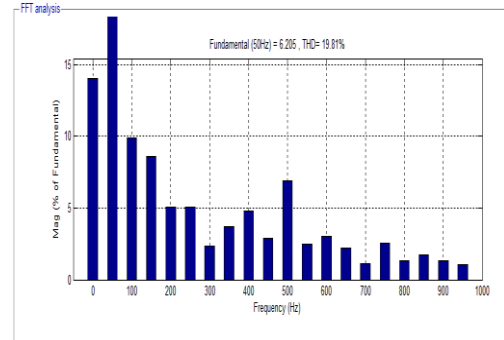


Figure III.87 : spectre d'harmonique de courant ic

### III.4.8. Simulation d'un onduleur cascade cinq niveaux monophasés

#### a. Montage

Pour les mêmes paramètres précédents, nous allons simuler le montage d'un onduleur monophasé cascade à 5 niveaux sauf que :

- ✚ Le rapport de l'amplitude de la référence :  $A_m=2$
- ✚ Le rapport de l'amplitude de la porteuse :  $A_p=2$

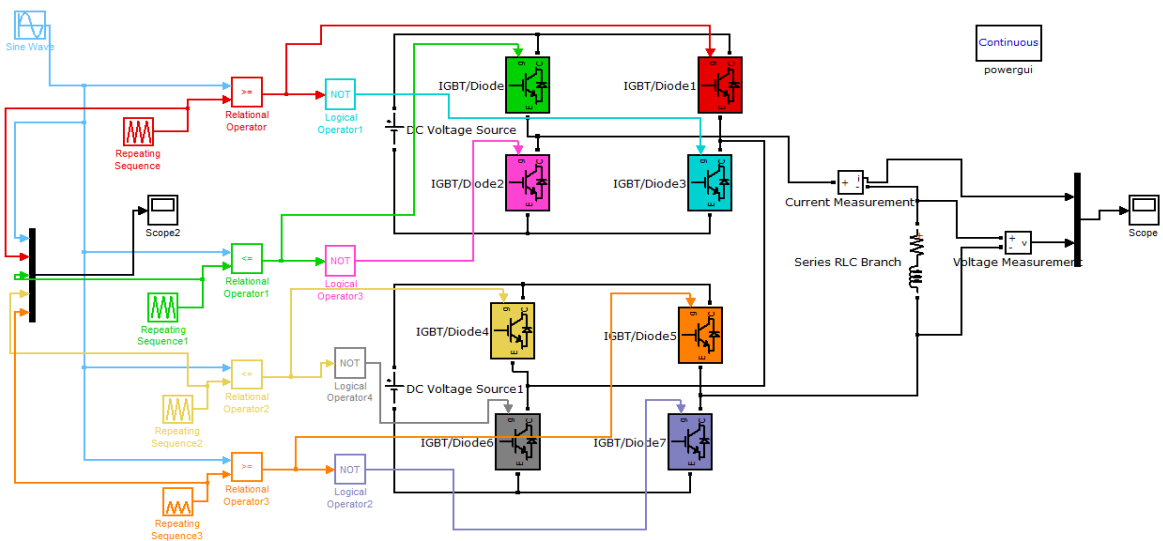
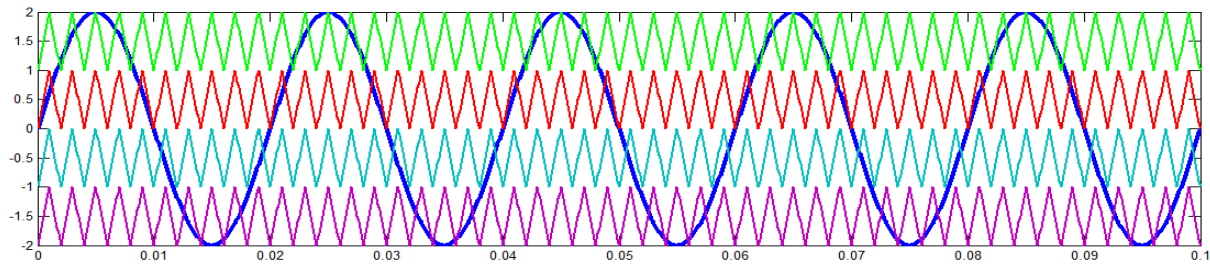
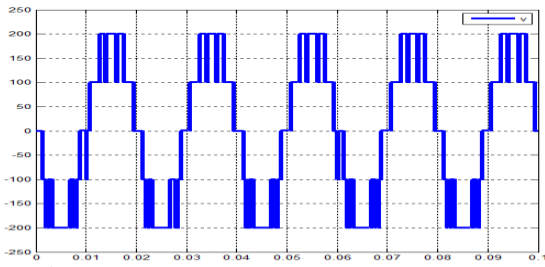


Figure III.88 : schéma bloc d'un onduleur monophasé cascade cinq niveaux

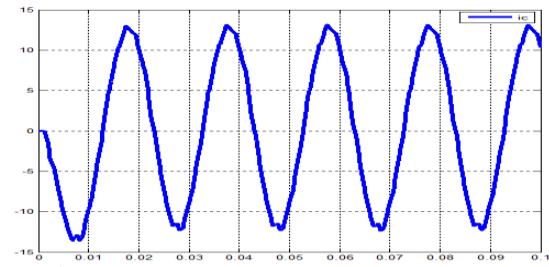
**b. Résultats de simulation**



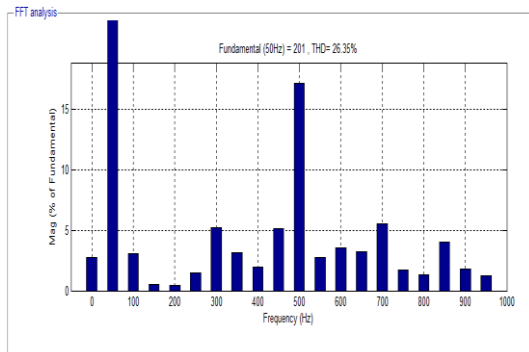
**Figure III.89 :** signaux de références avec quatre porteuses pour un onduleur cascade à cinq niveaux monophasé



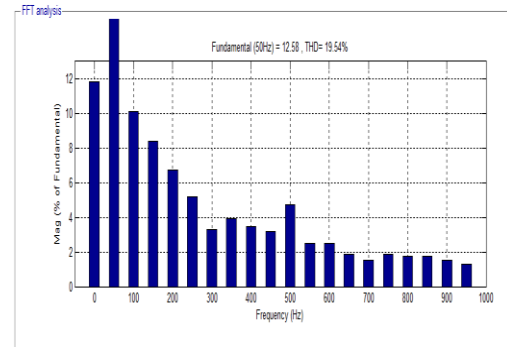
**Figure III.90 :** tension de sortie v à la sortie de l'onduleur 5N



**Figure III.91 :** courant de sortie ic à la sortie de l'onduleur 5N



**Figure III.92 :** spectre d'harmonique de tension v



**Figure III.93 :** spectre d'harmonique de courant ic

**III.4.9. Simulation d'un onduleur cascade sept niveaux monophasés**

**a. Montage**

Pour les mêmes paramètres précédents, nous allons simuler le montage d'un onduleur monophasé cascade à 7 niveaux

- ✚ Le rapport de l'amplitude de la référence :  $A_m=3$
- ✚ Le rapport de l'amplitude de la porteuse :  $A_p=3$

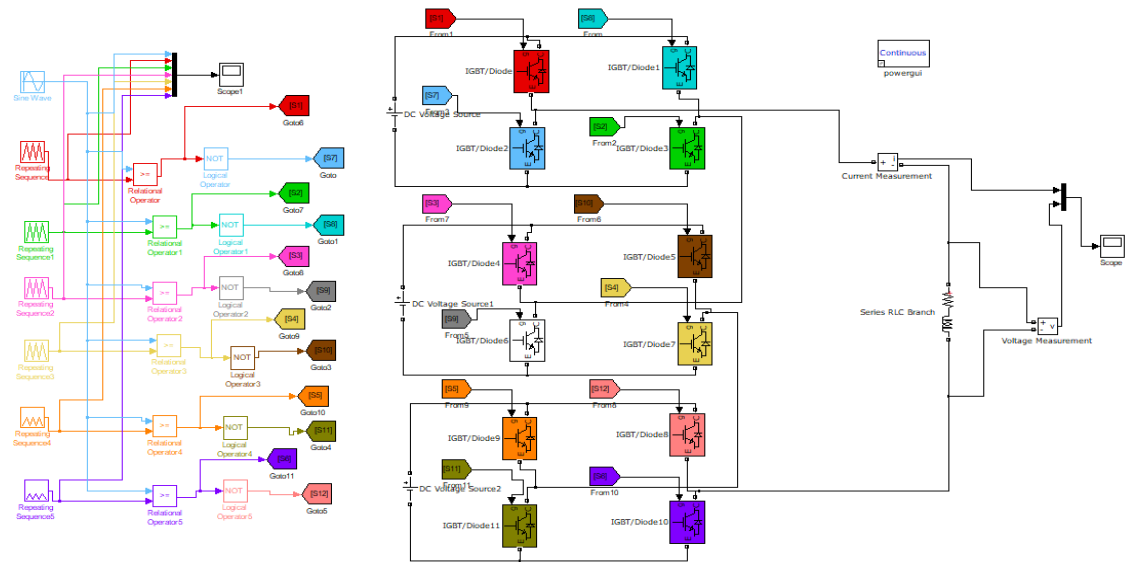


Figure III.94 : schéma bloc d'un onduleur monophasé cascade sept niveaux

**b. Résultats de simulation**

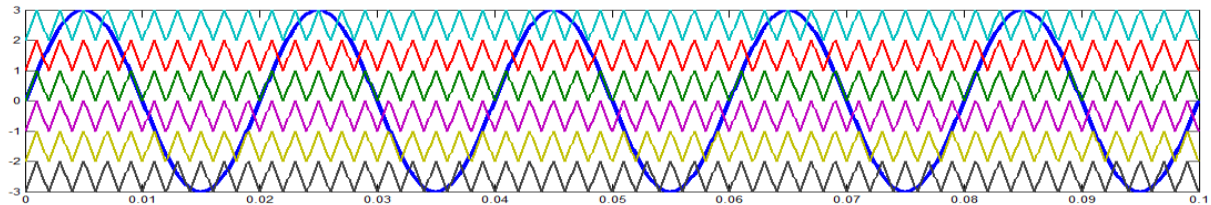


Figure III.95 : signaux de références avec six porteuses pour un onduleur cascade à sept niveaux monophasé

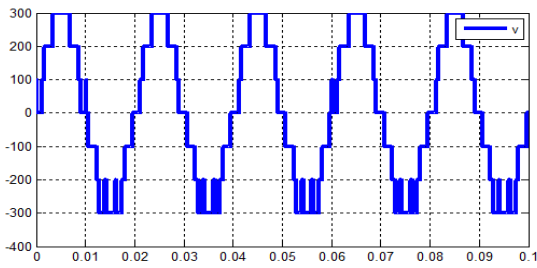


Figure III.96 : tension de sortie v à la sortie de l'onduleur 7N

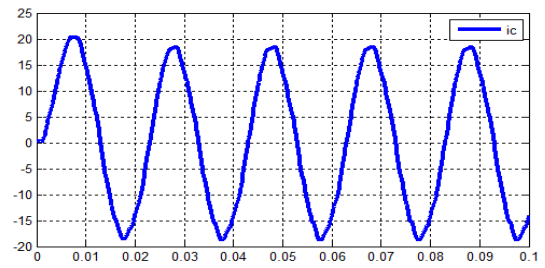


Figure III.97 : courant de sortie ic à la sortie de l'onduleur 7N

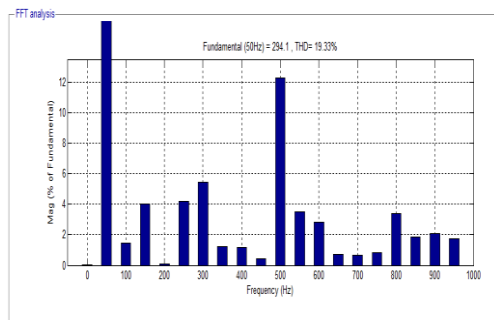


Figure III.98 : spectre d'harmonique de tension v

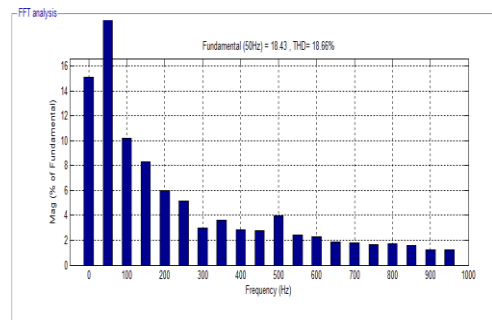


Figure III.99 : spectre d'harmonique de courant ic

**Tableau III.5** : Facteurs de distorsion de type cascade d'onduleur monophasé

commande MLI sinusoïdale-Triangle						
Nombre de niveaux	Trois Niveaux		Cinq niveaux		Sept niveaux	
THD %	La tension	Le courant	La tension	Le courant	La tension	Le courant
		53,39	19,81	26,35	19,54	19,33

### Interprétations des Résultats

- Les figures III.83 et III.89 et III.95 montrent les signaux de commande des structures à trois niveaux (n=3), cinq niveaux (n=5) et sept niveaux (n=7) d'un onduleur en cascade, avec  $m=10$  ( $f_p = 500$  Hz) et  $r=1$ .
- Les figures III.84, III.90, et III.96 présentent allures des tensions de sorties de chaque structures (3, 5 et 7 niveaux cascade)
- Les figures III.85, III.91, et III.97 présentent les allures des courant sorties de chaque structures (3,5 et 7 niveaux cascade)

Les figures III.86, III.87, III.92, III.93, III.98, III.99 ainsi que du Tableau III.5 illustre que :

- La structure de l'onduleur en cascade monophasé à cinq niveaux présente un taux d'harmonique de tension  $v$  est inférieur à celui de l'onduleur 3 niveaux qui a un THD assez élevé.
- pour l'onduleur cascade monophasé à sept niveaux, le THD de tension  $v$  est raisonnable et est inférieur à celui des onduleurs à trois niveaux et cinq niveaux.

Nous remarquons que dans le cas d'onduleur à sept niveaux les résultats sont meilleurs que ceux dans l'onduleur cascade à trois niveaux et cinq niveaux. Nous concluons que la structure cascade sept niveaux fournit un signal plus proche de la forme sinusoïdale que les structures à trois et à cinq et sept niveaux.

### Remarque

- ❖ La MLI sinusoïdale triangulaire permet de faire varier la valeur du fondamentale de la tension de sortie avec le changement de  $m$ .
- ❖ La commande MLI donne des résultats plus performants que la technique de commande pleine onde illustrée précédemment on voit bien qu'elle nous donne un très faible taux de distorsion harmonique THD en courant. Donc la commande MLI

se montre la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques si on la compare à la commande en pleine onde.

### III.5.Conclusion

Deux techniques de commande à savoir la commande en pleine onde et la MLI sinusoidal ont été appliquées pour simuler des structures d'onduleur de tension à trois, cinq, sept jusqu'à neuf niveaux des topologies de base NPC et en cascade de la conversion multi-niveaux. Leurs performances sont comparées en termes de qualité de forme d'onde de tension et de courant de sortie. On peut conclure de ce chapitre d'après les résultats obtenus par simulation

- La commande MLI sinusoidale offre la tension de charge la moins polluée avec des harmoniques basses fréquences faibles. La commande pleine onde présente l'inconvénient majeur lié à l'existence d'harmoniques basses fréquences élevées.
- Si on augmente le nombre de niveaux on aura un taux de distorsion harmonique (THD) en courant et en tension très intéressant (faible), ce qui fait une bonne qualité spectrale en tension et un courant qui se rapproche de plus en plus de la sinusoïde.

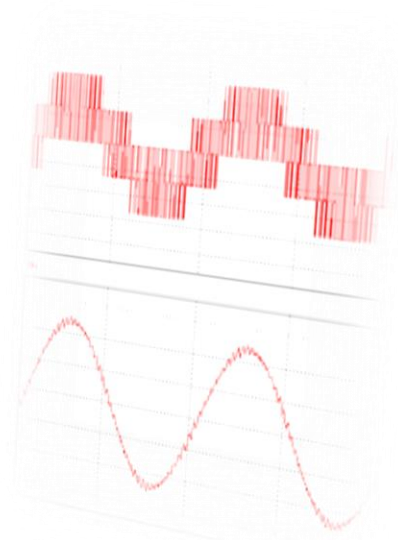
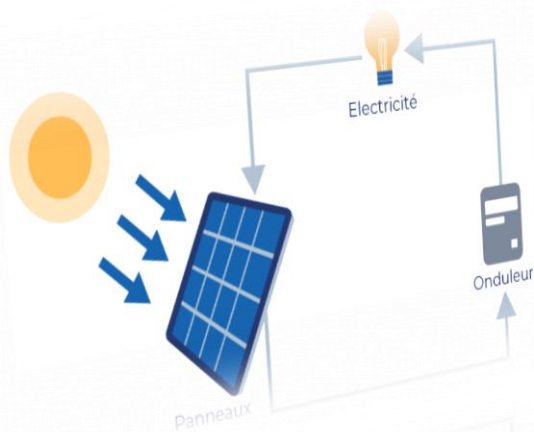
# CHAPITRE IV :

# APPLICATION SUR

# LES ONDULEURS

# MULTINIVEAUX

# ASYMÉTRIQUES





## IV.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous parlerons des applications des convertisseurs asymétriques et multiniveaux dont nous avons discuté précédemment dans le chapitre 2, nous expliquerons dans un premier temps comment augmenter la tension générée par un panneau solaire par l'utilisation d'un convertisseur DC-DC qui le Boost et qui permet de délivrer une tension optimale. Ensuite nous utiliserons des convertisseurs multi-niveaux asymétriques en cascade afin d'obtenir le plus grand nombre de niveaux en utilisant le moins de commutateurs à deux étages.

## IV.2.Structure et mode de fonctionnement du convertisseur Boost

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, sert à convertir une tension continue à une autre tension continue de plus forte valeur, Il est basé sur deux interrupteurs (Transistor et Diode) qui fonctionnent en complémentaire durant une période, un filtre LC et une résistance peuvent être utilisés dans ce montage.

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases selon l'état du transistor, une phase d'accumulation d'énergie lorsque le transistor est fermé (passant) cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie et puisque la diode est bloquée, la charge est déconnectée de l'alimentation. Lorsque le transistor est ouvert, l'inductance se trouve en série avec la source et son énergie accumulée dans la phase 1 s'additionne à celle de la source (effet survolteur), Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

### IV.2.1.Simulation du convertisseur boost

Les paramètres de la simulation sont :

- ✚ Source de tension continue :  $E= 100V$
- ✚ Résistance :  $R=10\Omega$
- ✚ Inductance :  $L=0.04H$
- ✚ Capacité :  $C=0.006 F$
- ✚ Alpha :  $\alpha=0.5$  (rapport cyclique)

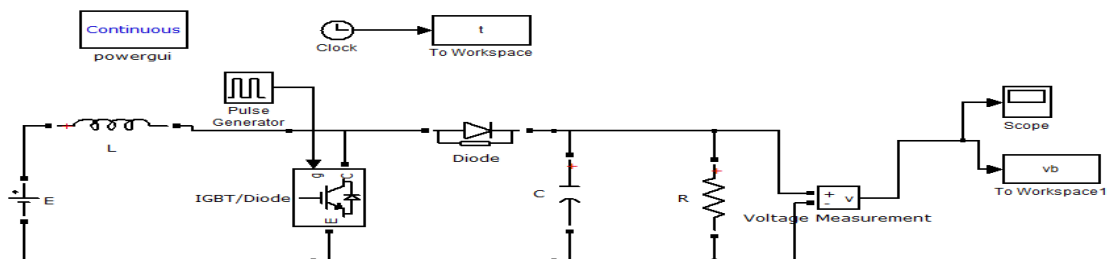
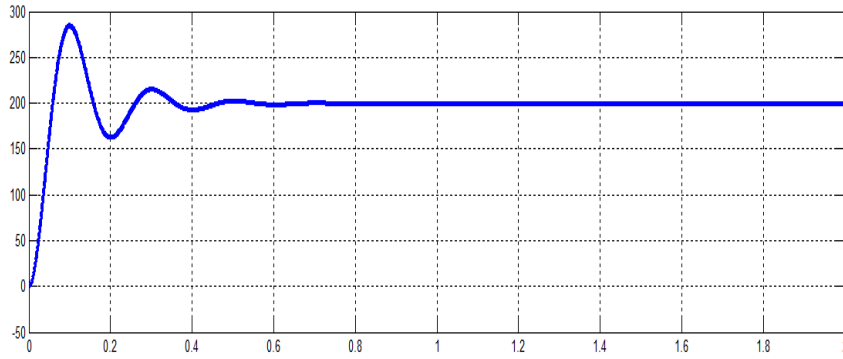


Figure IV.1 : Schéma bloc de convertisseur DC-DC Boost

**IV.2.2. Résultats de simulation**



**Figure IV.2 :** tension de sortie  $V_b$

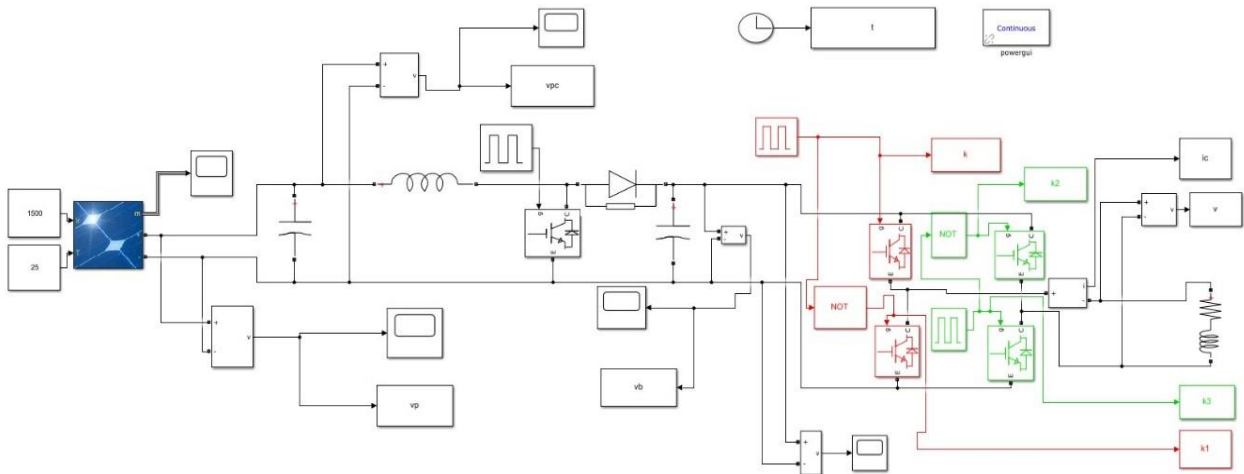
D’après la figure IV.2 et pour  $\alpha=0.5$ , on remarque bien que la tension de sortie  $V_b$  qui atteint 200V est égale à deux fois la tension d’entrée E conformément à la relation :

$$V_b = \left(\frac{1}{1-\alpha}\right)E \tag{IV.1}$$

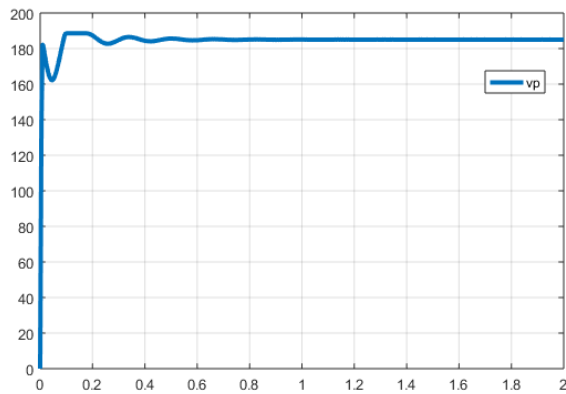
**IV.2.3. Utilisation du convertisseur boost et l’onduleur dans le un système photovoltaïque**

Lorsque nous souhaitons augmenter la tension disponible à partir de la source DC, nous utilisons un convertisseur élévateur. Le bloc de simulation d’un panneau photovoltaïque connecté à un convertisseur boost DC-DC et l’onduleur DC-AC est montré sur la Figure IV.3. Les paramètres de la simulation sont :

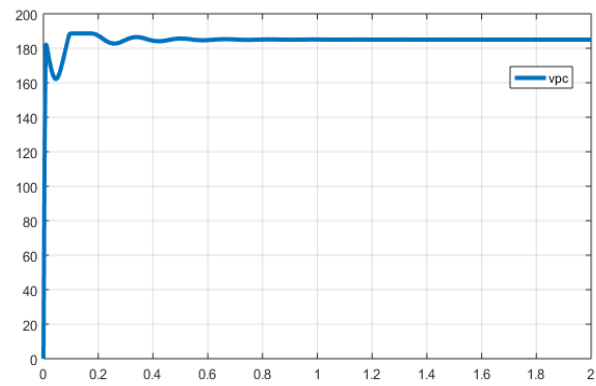
- Tension délivrée par le panneau : 185.5V.
- Inductance :  $L=0.04H$
- Capacité : 0.006 F
- Alpha :  $\alpha= 0.4$  (rapport cyclique)



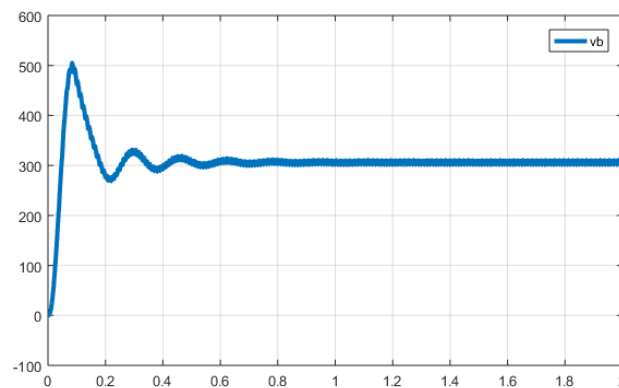
**Figure IV.3 :** Schéma bloc d’un Panneau PV connecté à un convertisseur boost DC-DC et onduleur cascade



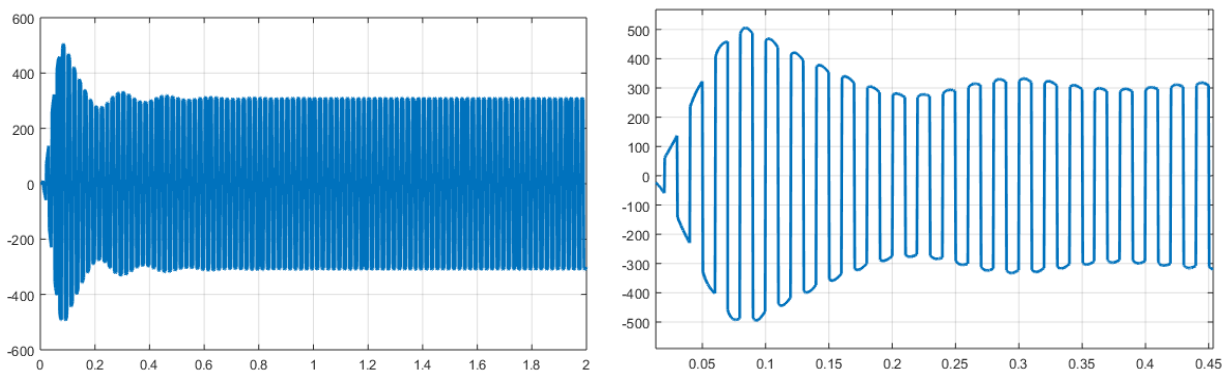
**Figure IV.4 :** tension  $v_p$  générée par le panneau solaire



**Figure IV.5 :** tension  $v_{pc}$  de panneau solaire lisse pour le condensateur



**Figure IV.6 :** tension de boost  $V_b$



**Figure IV.7 :** tension de sortie  $v$

La tension générée par le panneau solaire est de 185,5V. Le condensateur utilisé à la sortie de panneau solaire a pour rôle de lisser la tension. L'utilisation du convertisseur Boost avec un rapport cyclique de  $\alpha=0.4$  donne une tension  $V_b= 309.16$  V, après cela, cette tension continue est convertie en alternative par l'onduleur.

### IV.3.Simulation d'un onduleur multiniveaux symétriques et asymétriques

#### IV.3.1.Onduleurs multiniveaux symétriques deux ponts ( $U_{d2} = U_{d1}$ )

##### a. Montage

Les paramètres de la simulation sont :

$U_{d1} = U_{d2} = 185.5V$  (tension délivrée par chaque panneau)

$R=10\text{ Ohm}$   $L=0.04H$   $C=0.006F$

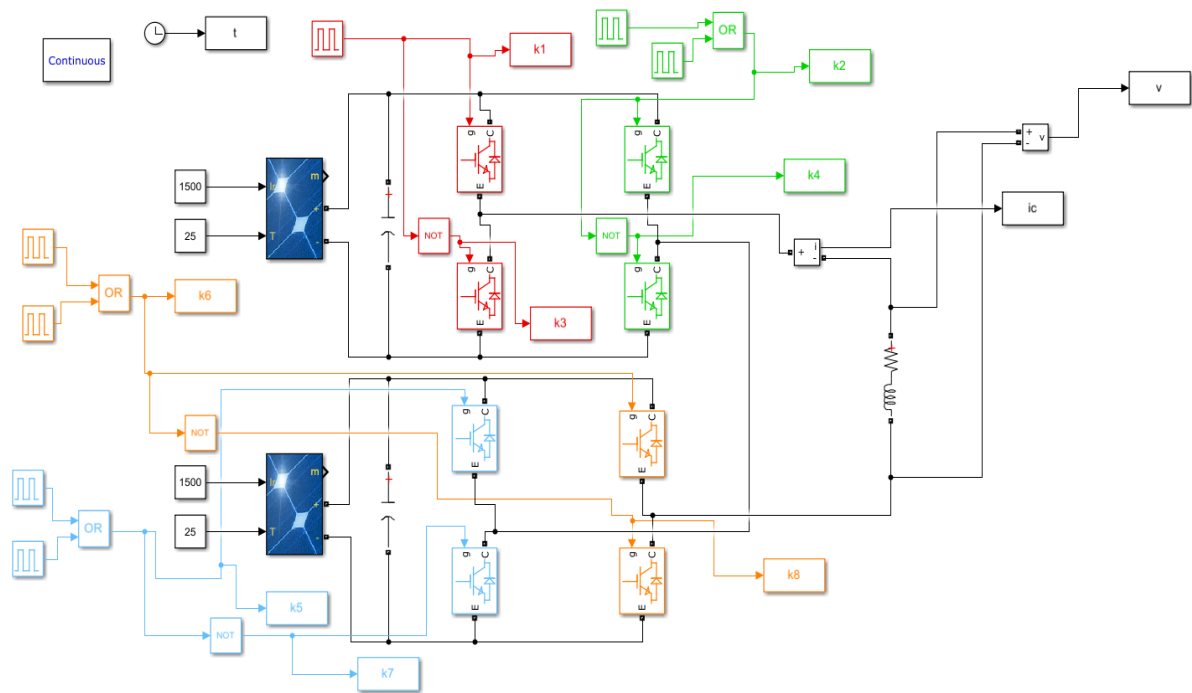


Figure IV.8 : schéma bloc d'onduleur cascade 2 pont symétrique 5 niveaux

##### b. Résultat de simulation

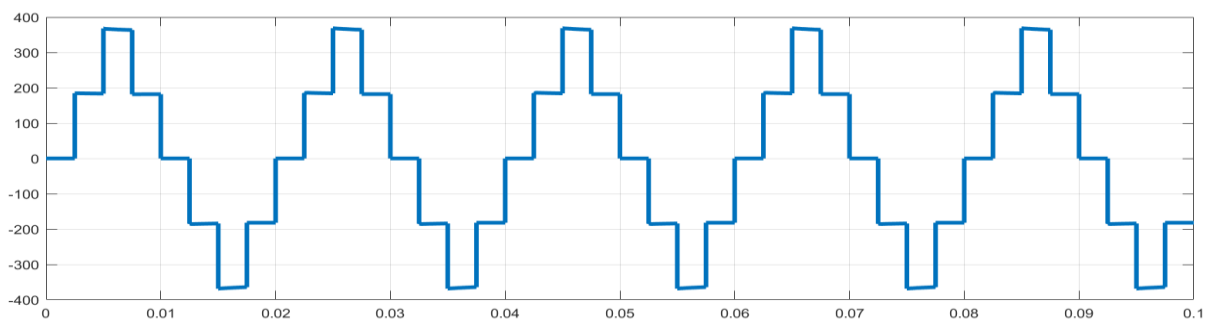


Figure IV.9 : tension de sortie 5 niveaux

### IV.3.2. Onduleurs multiniveaux asymétriques deux ponts ( $U_{d2} = 2U_{d1}$ )

#### a. Montage

Dans cette application, nous travaillerons sur 7 niveaux en utilisant deux ponts de valeurs différentes :

- utiliserons un facteur  $\beta=2$  entre les deux alimentations :

Tension délivrée par le 1<sup>er</sup> panneau :  $U_{d1} = 185.5V$

Tension délivrée par le 2<sup>eme</sup> panneau :  $U_{d2} = 2U_1 = 371V$

$R=10\text{ Ohm}$     $L=0.04H$     $C=0.006F$

Le schéma bloc de simulation est le suivant :

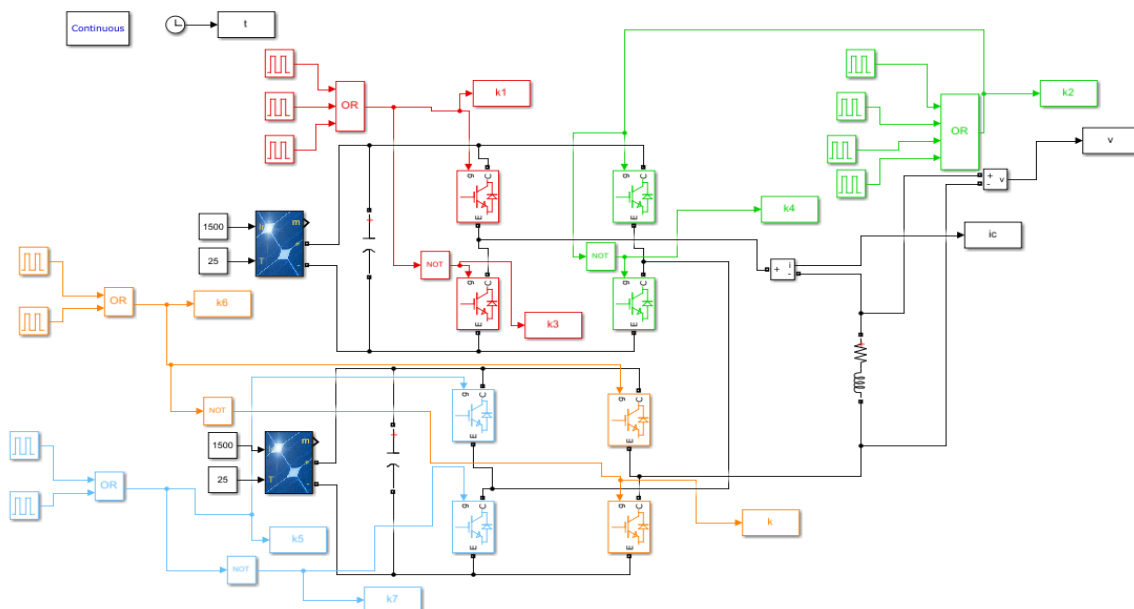


Figure IV.10 : schéma bloc d'ondeur cascade 2 pont asymétrique 7 niveaux

#### b. Résultat de simulation

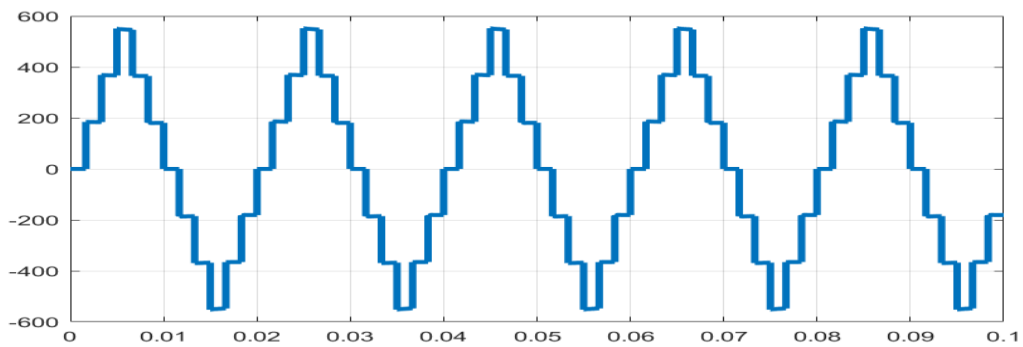


Figure IV.11 : tension de sortie 7 niveaux

On note que nous avons pu obtenir sept niveaux avec le minimum de ponts possible et avec l'utilisation des tensions délivrées des panneaux différentes.

### IV.3.3. Onduleurs multiniveaux asymétriques deux ponts ( $U_{d2} = 3U_{d1}$ )

#### a. Montage

Dans cette application, nous travaillerons sur 9 niveaux en utilisant deux ponts

➤ Avec un facteur  $\beta = 3$  entre les deux alimentations :

Tension délivrée par le 1<sup>er</sup> panneau :  $U_{d1} = 185.5V$

Tension délivrée par le 2<sup>eme</sup> panneau :  $U_{d2} = 3U_1 = 556.5V$

$R=10\text{ Ohm}$      $L=0.04H$      $C=0.006F$

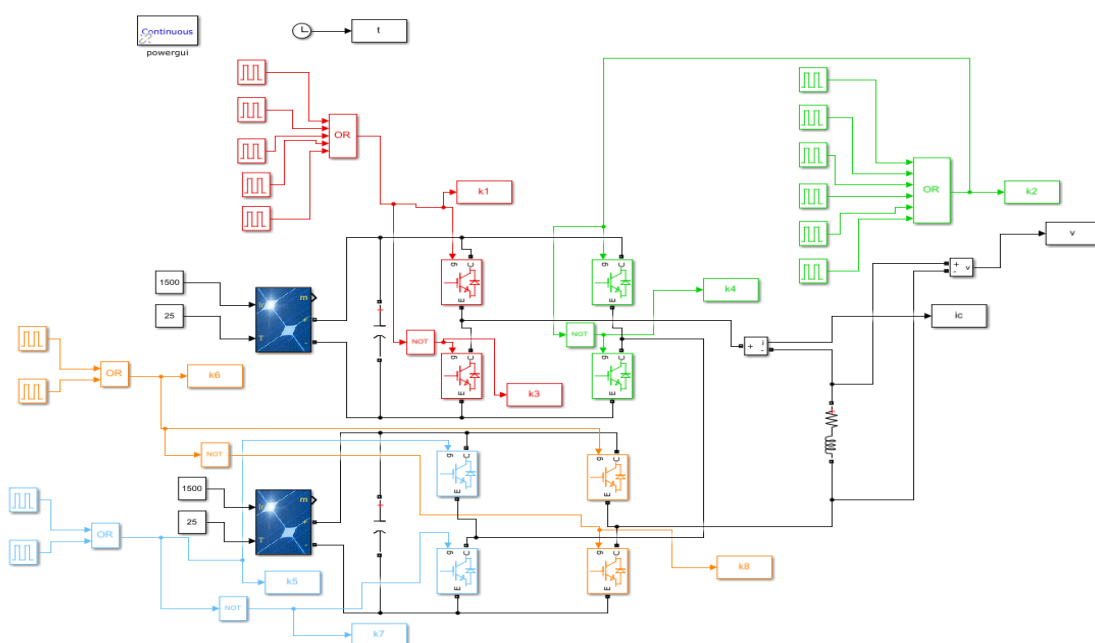


Figure IV.12 : schéma bloc d'ondeur cascade 2 ponts asymétrique 9 niveaux

#### b. Résultat de simulation

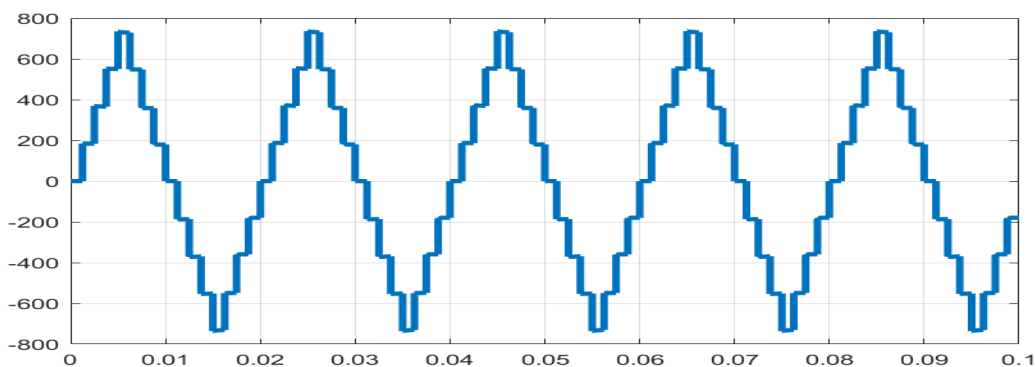


Figure IV.13 : tension de sortie 9 niveaux

A noter que pour  $\beta=3$ , nous avons pu obtenir neuf niveaux avec le nombre minimum de ponts, et c'est le niveau le plus élevé pouvant être atteint avec deux ponts.

#### **IV.4.Conclusion**

Nous avons considéré l'approche générale pour les applications de convertisseurs multiniveaux en cascade asymétriques basse tension à deux ponts. Ces dispositifs sont susceptibles de générer un nombre impair de niveaux, jusqu'à neuf, Ces onduleurs sont alimentés par différentes tension de courant continu, et fournissent une tension de sortie de qualité améliorée sans augmenter le nombre de cellules ni le nombre d'interrupteurs. Ainsi, on peut obtenir le plus grand nombre de niveaux avec le moins de pertes possibles.

CONCLUSION

GÉNÉRAL





## Conclusion générale

Les onduleurs de tension multiniveaux sont très utilisés dans l'industrie et touchent des domaines d'applications les plus variés. Ces onduleurs permettent la conversion de l'énergie continue en énergie alternatif. L'utilisation des onduleurs classiques à deux niveaux dans le domaine des applications de forte puissance ne convient pas assez et présentent des limites de fonctionnement. Pour contourner ces limites, on a proposé dans la littérature, les onduleurs multi niveaux qui permettent selon une commande appropriée de générer une tension de sortie plus proche à la sinusoïdale et une augmentation en puissance du convertisseur.

Le travail effectué dans ce mémoire avait comme objectif de faire une analyse et simulation des modèles d'onduleur multi-niveaux notamment celles qui peuvent être utilisés dans les applications photovoltaïques.

En première partie, on a donné des généralités sur les onduleurs multi niveaux de type NPC, à condensateurs flotteurs et en cascade ainsi des comparaisons entre ces trois principaux convertisseurs multi niveaux de base. Ensuite on a abordé les systèmes photovoltaïques où nous avons donné les principes de production d'énergie photovoltaïque tout en présentant les onduleurs multi-niveaux de type symétriques et asymétriques qui peuvent être associés.

Les simulations effectuées par Matlab-Simulink des onduleurs multi niveaux NPC et en cascade ont donné des résultats révélant que les deux types de commande à savoir la commande pleine onde et la commande MLI sinus- triangle satisfont largement les besoins imposés pour atteindre le nombre de niveaux souhaités. Nous avons remarqué que la commande MLI sinus triangle donne des résultats encore meilleurs, on a constaté que les harmoniques peuvent être repoussées vers les hautes fréquences et l'augmentation de l'indice de modulation « m » permet de repousser les harmoniques de la tension de phase vers les fréquences très élevées et améliore les performances des grandeurs de sorties. Nous avons également constaté que plus le nombre de niveaux augmente, plus le THD est faible.

La simulation des onduleurs multi niveaux asymétrique en cascade à deux ponts alimenté par des panneaux photovoltaïques a montré qu'il est possible d'atteindre un nombre de niveaux supérieurs équivalents à celui trouvé par des onduleurs multi niveaux symétrique à quatre ponts d'où la souplesse d'utilisation de ces convertisseurs asymétriques.

Comme perspectives, nous pouvons proposer une continuité à ces travaux les points suivants :

- Utilisation de techniques de commande qui permettent d'avoir une tension à la sortie la plus sinusoïdale possible et d'améliorer le taux de distorsion harmonique (THD).
- Emploi des onduleurs multi niveaux asymétrique avec plusieurs cellules.

## Références bibliographique

- [1] Bemana Ngueouele Yannick, « Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public », Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, Mémoire de master, 2012.
- [2] Brighen Haroun, Halaimia safouane, « Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoidale », Mémoire de master, Université larbi tebssi, Tébessa, 2016.
- [3] Karima Berkoune, « Approche mathématique pour la modulation de largeur d'impulsion pour la conversion statique de l'énergie électrique : Application aux onduleurs multi-niveaux », Thèse de doctorat, Université toulouse, France, 2016.
- [4] Abdelkader Boukaroura, « Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche bond graph », mémoire de magister en électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2009.
- [5] Jiang Xueyang, « Étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes Photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension », Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2019.
- [6] Kambiz Arab tehrani, « Conception synthèse et application d'une nouvelle commande robuste par PID fractionnaire pour les onduleurs Multi-niveaux », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 2010.
- [7] A. Benaboud, « Convertisseur de fréquence indirect à rapport de tension fixe : Interface entre turbo-alternateurs à haut vitesse et réseau électrique », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [8] K. Bouchareb, « Etude de différentes topologies des onduleurs multi niveaux (Cascade et NPC) », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2020.
- [9] AIS Belkacem, « Topologie des onduleurs solaire Etude et synthèse », université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Mémoire de magister, 2012.
- [10] Dekkiche Mohamed Lotfi, « Etude d'un onduleur multiniveaux en cascade de type 3/2 », Mémoire de master de réseaux électrique, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, 2018.
- [11] TAOUCHE Soulef, « Commande et réalisation d'un convertisseur multi-niveau », mémoire de master, université Saad Dahlab, blida-1, 2020.

- [12] Houria Ben Zemammouch, « Application de la MLI vectorielle aux onduleurs multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba 2010.
- [13] Bouzelmaden Salim, « Etude et réalisation d'un onduleur sept niveaux en cascade », Mémoire de master en génie électrique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2012.
- [14] Aboub Hania « Contribution à l'étude des onduleurs neuf niveaux triphasés connectes aux convertisseurs DC-DC survolteurs multi-sortires dans des systèmes » Doctorat en sciences en electrotechnique, Université batna 2 chahid Mostafa Benboulaid, 2023.
- [15] Belharachi Wisssem, Rabahi Faouzi, « Etude et simulation d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'un séparateur électrostatique », Mémoire de master en réseaux Electriques, Université Mustapha Stampfli de Mascara, 2022.
- [16] Benzaida Mohamed Abdelghani, Ouail Mohamed, « Utilisation du convertisseur Z-source dans un système photovoltaïque », En vue l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique, Ecole nationale polytechnique Alger, 2015.
- [17] M. Angel cid pastor, « Conception de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de doctorat de conception de circuits microélectroniques et microsystèmes, l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 2006.
- [18] Rjem Fethi, Lechab Abdelghani, « Commande d'onduleur multiniveaux asymétrique application à la conduite de la machine asynchrone double étoile », Mémoire de master en electrotechnique industrielle, Université kasdi merbah ouargla, 2020.
- [19] Abdoulwahab Adaine, « optimisation numérique de cellules solaires à très haut rendement à base d'InGaN », Thèse de doctorat, Université de lorraine et centralesupélec, Français 2018.
- [20] B. Hanane, A. Nadjia, « Etude et simulation d'un onduleur multi niveaux pour système Photovoltaïque », Mémoire de master en réseaux électriques, Université Djillali Liabes Sidi-bel – Abbés, 2020.
- [21] Mr. Lamraoui Soufyane, Mr. Titouche Nacer « Etude et Commande D'un Système De Production Hybride Eolien photovoltaïque », Mémoire du projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 10 Avenue Hassen Badi, El-Harrach, Alger, Juin 2014.
- [22] <https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/SOLAIRE/SEM04/S04P09.HTM>.
- [23] <https://www.researchgate.net/publication/229042211>

[24] Debba Ammar Akram, Debba Tahar, « Conception et commande d'un système PV connecté au réseau électrique utilisant les réseaux de neurones », Mémoire de master, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2023 .

[25] LOUKRIZ Abdelhamid, « Implementation of photovoltaic inverter controller on DSP », Mémoire de master in electroniques, Ecole nationale polytechnique, Msila, 2016.

[26] Mustafa Boukhermouche, Badreddine Fenchouch, « Etude et réalisation d'un onduleur solaire contrôlé par une carte DSP », En vue de l'obtention du titre de ingénieur d'état en électrotechnique de l'ENP, Ecole nationale polytechnique, 2022.

[27] Gohmes Mohammed Yacine, Djellali Belkasem, Djedai Akram, « Modélisation et commande d'un système PV connecté au réseau électrique utilisant DSTATCOM », Mémoire de master, Université kasdi merbah, Ouargla, 2020.

[28] BOUCHEKOUK Oussama, « Etude comparative entre les différentes topologies et les commandes des onduleurs », Mémoire de master en électronique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2015.