

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

Faculté : Sciences de L'Ingéniorat
Département : Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

**Topologie d'onduleurs Multiniveaux et Stratégie de
Commande (Application aux Systèmes photovoltaïques)**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : BOUTARBOUCHA HOUSSEM EDDINE

DEVANT LE JURY

Président : Mr SAAD SALAH U.B.M. Annaba

Directeur de mémoire : Mr BOUGHABA MOURAD U.B.M. Annaba

Examineur : Mr FARAH LOTFI U.B.M. Annaba

Année 2021

Remerciement

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné la Volonté pour accomplir ce travail.

Mes vifs remerciements sont adressés à Monsieur ***M. BOUGHABA***, pour son aide précieuse, ses qualités scientifiques et humaines. Je lui exprime toute ma gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur ***S. SAAD***, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant d'être président du jury.

Il m'est agréable de pouvoir exprimer ma reconnaissance envers, Monsieur ***L. FARAH***, Pour avoir accepté d'examiner et de rapporter ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Ma mère,

Mon père,

Ma grande mère,

Mon grand père,

Mes oncles et tantes

Ma sœur,

Mes frères,

Au reste de ma famille et à tous mes amis,

Tous mes collègues de la promotion M2 Electromécanique 2021.

H.BOUTARBOUCHA

TABLE DES MATIÈRES

Remerciement	
Dédicace	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des Symboles et Abréviations	
Résumé	
Introduction générale :	1

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

I.1. introduction :.....	3
I.2. Définition des onduleurs	3
I.3. Principe de l'onduleur multiniveaux.....	4
I.4. Topologies Principales D'onduleurs Multiniveaux	4
I.4.1. Onduleur de tension à diode de bouclage	5
I.4.2. Onduleurs multi-niveaux à condensateur flottant	7
I.4.3. Onduleur multiniveaux en pont H cascades.....	9
I.4.4. Autres topologies	10
I.5. Les objectifs de l'MLI.....	11
I.6. Généralités sur les systèmes photovoltaïques	11
I.6.1. Introduction.....	11
I.6.2. Le principe	12
I.8. Générateur photovoltaïque.....	14
I.8.1. panneau photovoltaïques.....	14
I.8.2. Module photovoltaïque	14
I.9. Classification d'un système solaire photovoltaïque :.....	15
I.9.1. Système autonome	15
I.9.2. Système hybride.....	15
I.9.3. système raccordé au réseau	16

I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	16
I.11. Conclusion	17

CHAPITRE II: ONDULEUR MULTINIVEAU NPC

II.1. Introduction.....	18
II.2. Onduleur NPC à diode de bouclage.....	18
II.2.1. Onduleur NPC à trois niveaux.....	18
II.2.2. Onduleur NPC à cinq niveaux.....	20
II.2.3. Onduleur NPC à sept niveaux.....	24
II.3. simulation Onduleur NPC.....	30
II.3.1. Onduleur NPC à trois niveaux.....	30
II.3.2. Onduleur NPC à cinq niveaux.....	32
II.3.3. Onduleur NPC à sept niveaux.....	35
II.3.3. Onduleur NPC à neuf niveaux.....	38
II.4. Interprétations des Résultats.....	41
II.5. Conclusion.....	42

CHAPITRE III : ONDULEUR MULTINIVEAU CASCADE

III.1 introduction	43
III.2. Onduleur cascade (H-Bridge).....	43
III.2.1. Onduleur cascade à trois niveaux.....	43
III.2.2. Onduleur cascade à cinq niveaux	44
III.2.3. Onduleur cascade à N niveaux (cas générale).....	45
III.3. simulation Onduleur cascade (H-Bridge).....	46
III.3.1. simulation Onduleur cascade à trois niveaux	46
III.3.2. simulation Onduleur cascade à cinq niveaux	49
III.3.3. simulation Onduleur cascade à sept niveaux.....	52
III.3.4. simulation Onduleur cascade à neuf niveaux	55
III.4. Interprétations des Résultats.....	58
III.5. Conclusion.....	59

CHAPITRE IV : SIMULATION DU SYSTÈME PV-ONDULEUR MULTINIVEAU

IV.1. Introduction.....	60
IV.2. modalisation d'un module photovoltaïque.....	60
IV.2.1. Modèle d'une cellule solaire idéal.....	60

IV.2.2. modèle d'une cellule solaire réel :.....	60
IV.3. Paramètres du module.....	62
IV.4. Caractéristiques I-V et P-V.....	62
IV.5. Adaptation d'un capteur photovoltaïque.....	65
IV.6. Simulation du système PV- Onduleur multiniveaux type Cascade à cinq niveaux.....	65
IV.6.1. Modèle de simulation.....	66
IV.6.2 Résultats de simulation.....	67
IV.7 Simulation du système PV- Onduleur multiniveaux type Cascade à sept niveaux.....	69
IV.7.1 Modèle de simulation.....	70
IV.7.2 Résultats de simulation.....	71
IV.8. Interprétation des résultats.....	72
IV.9. Conclusion.....	72
Conclusion générale.....	73

LISTE DES FIGURES

N° Figure	Titre	N° page
Figure I.1	Synoptique d'une conversion continue-alternative	3
Figure I.2	Onduleur à niveaux multiples (a à deux niveaux, b) à trois niveaux et c) à n niveaux	4
Figure I.3	Les différentes topologies des onduleurs multiniveaux	5
Figure I.4	Circuit d'une phase d'onduleur NPC a) à trois niveaux. b) à cinq niveaux	6
Figure I.6	circuit d'une phase d'un onduleur à condensateur flottant a) trois niveaux, b) à cinq niveaux	8
Figure I.7	Circuit d'une phase d'un onduleur en pont H cascade a) à trois niveaux; b) à cinq niveaux ; c) à n niveaux	9
Figure I.8	Structure générale d'un système PV	12
Figure I.9	Schéma d'une cellule photovoltaïque	13
Figure I.10	le soleil source de l'énergie solaire	13
Figure I.11	panneau photovoltaïque	14
Figure I.12	Exemple de la structure d'un système PV autonome	15
Figure I.13	Système PV raccordé au réseau sans batterie	16
Figure II.1	séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux	19
Figure II.2	Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC	20
Figure II.3	1ère séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux	20
Figure II.4	2ème séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux	21
Figure II.5	3ème séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux	22
Figure II.6	4ème séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux	22
Figure II.7	5ème séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux	23
Figure II.8	Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé à cinq niveaux de type NPC	23
Figure II.9	1 ère séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux	24
Figure II.10	2ème séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux	25
Figure II.11	3ème séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux	25
Figure II.12	4ème séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux	26
Figure II.13	5 ^{ème} séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux	27
Figure II.14	6ème séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux	28
Figure II.15	7 ^{ème} séquencé d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux	29
Figure II.16	Structure de puissance de l'onduleur à trois niveaux de type NPC	30
Figure II.17	Commande MLI d'un bras de l'onduleur NPC à 3 niveaux	30
Figure II.18	forme d'onde de la tension simple de l'onduleur NPC 3 niveaux et spectre harmonique	31
Figure II.19	forme d'onde de la tension composée de l'onduleur NPC 3 niveaux et spectre harmonique	31

Figure II.20	MLI Onduleur NPC à trois niveaux	32
Figure II.21	Structure de puissance de l'onduleur à cinq niveaux de type NPC	32
Figure II.22	Commande MLI de trois bras de l'onduleur NPC à 5 niveaux	33
Figure II.23	forme d'onde de la tension simple de l'onduleur NPC 5 niveaux et spectre harmonique	33
Figure II.24	forme d'onde de la tension composée de l'onduleur NPC 5 niveaux et spectre harmonique	34
Figure II.25	MLI Onduleur NPC à cinq niveaux	34
Figure II.26	Structure de puissance de l'onduleur à sept niveaux de type NPC	35
Figure II.27	Commande MLI de trois bras de l'onduleur NPC à 7 niveaux	36
Figure II.28	forme d'onde de la tension simple de l'onduleur NPC 7 niveaux et spectre harmonique	37
Figure II.29	forme d'onde de la tension composée de l'onduleur NPC 7 niveaux et spectre harmonique	37
Figure II.30	Structure de puissance de l'onduleur à neuf niveaux de type NPC	38
Figure II.31	Commande MLI de trois bras de l'onduleur NPC à 9 niveaux	39
Figure II.32	forme d'onde de la tension simple de l'onduleur NPC 9 niveaux et spectre harmonique	40
Figure II.33	forme d'onde de la tension composée de l'onduleur NPC 9 niveaux et spectre harmonique	40
Figure III.1	Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en Cascade	43
Figure III.2	Schéma d'un onduleur cascade en pont en H à 5 niveaux	44
Figure III.3	Schéma d'un onduleur cascade à N niveaux	45
Figure III.4	Structure de puissance de l'onduleur à trois niveaux de type cascade	46
Figure III.5	Commande MLI d'un pont H de l'onduleur cascade à 3 niveaux	46
Figure III.6	forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade 3 niveaux et spectre harmonique	47
Figure III.7	forme d'onde de la tension composée de l'onduleur cascade 3 niveaux et spectre harmonique	47
Figure III.8	MLI Onduleur cascade à trois niveaux	48
Figure III.9	Commandes des interrupteurs d'un onduleur cascade à 3 niveaux	48
Figure III.10	Structure de puissance de l'onduleur à cinq niveaux de type cascade	49
Figure III.11	Commande MLI d'un pont H de l'onduleur cascade à 5 niveaux	50
Figure III.12	forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade 5 niveaux et spectre harmonique	50
Figure III.13	forme d'onde de la tension composée de l'onduleur cascade 5 niveaux et spectre harmonique	51
Figure III.14	MLI Onduleur cascade à cinq niveaux	51
Figure III.15	Commandes des interrupteurs d'un onduleur cascade à 5 niveaux	52
Figure III.16	Structure de puissance de l'onduleur à sept niveaux de type cascade	52
Figure III.17	Commande MLI d'un pont H de l'onduleur cascade à 7 niveaux	53

Figure III.18	forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade 7 niveaux et spectre harmonique	53
Figure III.19	forme d'onde de la tension composée de l'onduleur cascade 7 niveaux et spectre harmonique	54
Figure III.20	MLI Onduleur cascade à sept niveaux	54
Figure III.21	Commandes des interrupteurs d'un onduleur cascade à sept niveaux	55
Figure III.22	Structure de puissance de l'onduleur à neuf niveaux de type cascade	55
Figure III.23	Commande MLI d'un pont H de l'onduleur cascade à 9 niveaux	56
Figure III.24	forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade 9 niveaux et spectre harmonique	56
Figure III.25	forme d'onde de la tension composée de l'onduleur cascade 9 niveaux et spectre harmonique	57
Figure III.26	MLI Onduleur cascade à neuf niveaux	57
Figure III.27	Commandes des interrupteurs d'un onduleur cascade à 9 niveaux	58
Figure IV.1	schéma d'une cellule solaire idéal	60
Figure IV.2	Schéma électrique équivalent d'une cellule PV	61
Figure IV.3	Caractéristique I-V et P-V d'un module PV	63
Figure IV.4	Caractéristique I-V et P-V d'un module PV	63
Figure IV.5	caractéristiques I-V et P-V d'un générateurs PV	64
Figure IV.6	caractéristiques I-V et P-V d'un générateurs PV	64
Figure IV.7	Adaptation l'énergie par convertisseur statique	65
Figure IV.8	Structure de puissance de l'onduleur à cinq niveaux de type cascade alimenté par un générateur PV	66
Figure IV.9	la tension de sortie du générateur PV	67
Figure IV.10	Forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade à cinq niveaux et spectre harmonique	67
Figure IV.11	Forme d'onde de la tension composée de l'onduleur cascade à cinq niveaux et spectre harmonique	68
Figure IV.12	la tension de sortie du générateur PV(V_{pv1})	68
Figure IV.13	la tension de sortie du générateur PV(V_{pv2})	68
Figure IV.14	Forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade à cinq niveaux et spectre harmonique (Variation de la tension du générateur PV)	69
Figure IV.15	Structure de puissance de l'onduleur à sept niveaux de type cascade alimenté par un générateur PV	70
Figure IV.16	Forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade à sept niveaux et spectre harmonique	71
Figure IV.17	Forme d'onde de la tension composée de l'onduleur cascade à sept niveaux et spectre harmonique	71

LISTE DES TABLEAUX

N° tableau	Titre	N° page
Tableau I.1	Nombres de composants nécessaires pour la topologie NPC à n niveaux	6
Tableau I.2	Nombres de composants nécessaires pour la topologie à condensateur flottant à n niveaux	8
Tableau I.3	Nombres de composants nécessaires pour la topologie cascade à n niveaux	10
Tableau II.1	États de commutation de l'onduleur NPC à trois niveaux	19
Tableau II.2	États de commutation de l'onduleur NPC à cinq niveaux	23
Tableau II.3	États de commutation de l'onduleur NPC à sept niveaux	29
Tableau II.4	comparaison des résultats obtenus de l'onduleur NPC	41
Tableau III.1	États possibles de l'onduleur cascade à trois niveaux	44
Tableau III.2	États possibles de l'onduleur cascade à trois niveaux	45
Tableau III.3	comparaison des résultats obtenus de l'onduleur cascade	58
Tableau IV.1	Caractéristiques du module 1Soltech 1STH-215-PBP	62
Tableau IV.2	comparaison des résultats obtenus de l'onduleur cascade 5 et 7 niveaux avec Générateur PV	72

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

Symboles

V _{dc}	Source de tension continue (V)
N	Nombre de niveau de tension de sortie
S	le nombre de sources à courant continu
D	le nombre de diodes principales
D _c	le nombre de diodes clampées
V _{réf}	Tension de signal de référence (V)
V _p	Tension de signal de porteuse (V)
F _r	Fréquence du signal de référence (Hz)
F _p	Fréquence de la porteuse (Hz)
R	Coefficient de réglage en amplitude
M	Indice de modulation de fréquence
V _{a0}	Tension entre le point a et le point 0 (V)
V _{ab}	Tension entre la phase a et la phase b (V)
Λ	la densité d'énergie solaire
H	la constante de Planck (j.s-I)
C	la vitesse de la lumière (m.s-I)
I	Courant de la cellule photovoltaïque (A)
V	Tension de la cellule photovoltaïque (V)
V _{co}	Tension de circuit-ouvert (V)
I _{cc}	Courant de court-circuit (A)
I _d	Courant de diode (A)
I _{ph}	Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation (A)
I _p	Courant dérivé par la résistance parallèle (A)
I ₀	Courant de saturation de diode, dépendant de la température (A)
T _c	température de jonction (K)
V _d	Tension de diode (V)
K	Constant de Boltzmann (1.38x10 ⁻²³ J / K)
Q	Charge de l'électron (1.6x10 ⁻¹⁹ C)
A	le facteur d'idéalité de la jonction (1 < A < 3)
R _{sh}	résistances shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule
R _s	Résistance série de la cellule
P _c	Puissance crête (W)
P _{max}	Puissance maximale (W)
G	Éclairement (W/m ²)

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
TDH	Taux de Distorsion Harmonique
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque

Résumé :

Le travail de cette mémoire consacré à l'étude par simulation des onduleurs multiniveaux intégré dans un système photovoltaïque concernant essentiellement les deux types d'onduleurs (NPC et Cascade)

L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats de simulation sont présentés ainsi que l'analyse spectrale pour les différentes topologies utilisées.

L'objectif visé est de montrer comment les onduleurs multiniveaux peuvent conduire à une réduction des harmoniques résiduels de la tension.

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.

Mots clé : Système PV, NPC, MLI, Cascade H Bridge et THD.

Abstract :

This work is devoted to the simulation study of multilevel inverters integrated in a photovoltaic system mainly concerning the two types of inverters (NPC and Cascaded).

The simulation study is carried out under the Matlab/Simulink environment. The simulation results are presented as well as the spectral analysis for the different topologies used.

The aim is to show how multilevel inverters can lead to a reduction in residual voltage harmonics.

In high power applications, the multilevel structure is more suitable, compared to the two level structure, because the output voltages and currents have a much lower rate of harmonic distortion.

Keywords: PV Array, NPC, PWM, Cascaded H Bridge Inverter CHB and THD

ملخص :

تم تخصيص هذا العمل لدراسة محاكاة المموجات متعددة المستويات المدمجة في النظام الكهروضوئي فيما يتعلق بشكل (NPC و Cascaded) أساسي بنوعين من المموجات.

تم إجراء دراسة المحاكاة في برنامج ماطلاب. يتم عرض نتائج المحاكاة بالإضافة إلى التحليل الطيفي لأنواع المموجات المستخدمة.

الهدف هو إظهار كيف يمكن أن تؤدي المموجات متعددة المستويات إلى انخفاض في توافقيات الجهد المتبقية.

في تطبيقات الطاقة العالية ، يكون الهيكل متعدد المستويات أكثر ملاءمة ، مقارنة بهيكل المستويين ، لأن الفولتية والتيارات الناتجة لديها معدل أقل بكثير من 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 [26].

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 l'industrie est devenue un champ extrêmement vaste, car les équipements industriels utilisent de plus en plus d'entraînement à vitesse variable. Les onduleurs de tension sont largement utilisés pour la commande des machines alternatives.

Un onduleur de tension est un convertisseur statique alimenté soit par une source continue soit par un Système PV soit par une batterie d'accumulateur pour fournir une tension 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 [17].

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 mon projet vise à étudier et comparer les différentes structures des onduleurs multiniveaux (NPC et Cascade) utilisées dans les systèmes photovoltaïques.

Pour ce faire, le mémoire est organisé en quatre chapitres et une conclusion générale. Le premier chapitre décrit l'état de l'art des onduleurs multiniveaux et d'énergie photovoltaïque et ses avantages et inconvénients, Nous terminons ce chapitre par la classification d'un système PV.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et simulation des onduleurs multiniveaux de type NPC (3, 5, 7 et 9 niveaux). Pour cela, on présente les différentes séquences de commutation. On termine le chapitre par un tableau comparatif des résultats de THD de la tension de sortie.

Dans le troisième chapitre, les différentes structures d'onduleurs multiniveaux en cascade (3, 5, 7 et 9 niveaux). On termine le chapitre par un tableau comparatif des résultats de THD de la tension de sortie

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation de l'onduleur multiniveaux intégré dans un système photovoltaïque. Les résultats de simulation sont présentés ainsi que l'analyse spectrale pour la topologie utilisée. L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink.

Finalement, nous terminons notre travail par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

I.1. Introduction :

L'énergie solaire étant l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses l'énergie, les systèmes photovoltaïques (PV) deviennent de plus en plus et plus populaires. Ces dernières années, l'application multinationaux les onduleurs aux systèmes d'alimentation photovoltaïque deviennent de plus en plus attention en raison des grandes demandes d'échelle de puissance. Les Trois topologies courantes des onduleurs multinationaux sont les suivantes : 1) diode bloquée ; 2) condensateur bloqué ; et 3) onduleur à pont en H en cascade (CHB) [27].

I.2. Définition des onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu alternatif .Par exemple, si on dispose à l'entrée d'une tension continue et si grâce à des

Semi-conducteurs [1].

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 [4].

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

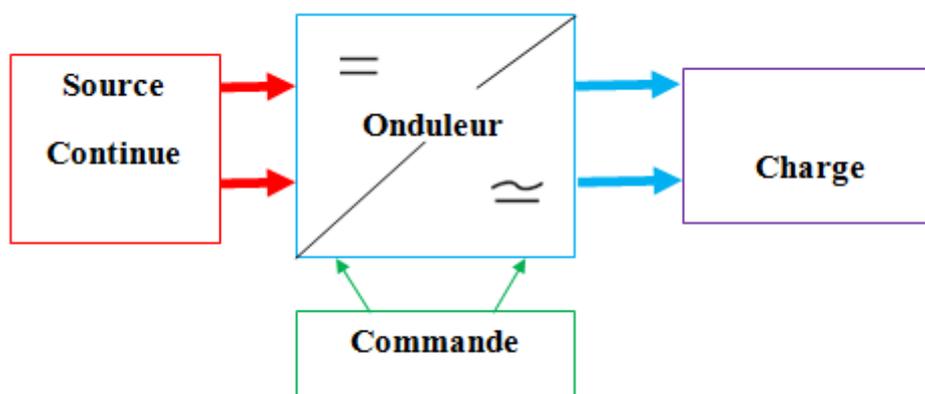


Figure I.1 Synoptique d'une conversion continue-alternative

I.3. Principe de l'onduleur multiniveaux

Ce paragraphe a pour but d'introduire le principe général du comportement multiniveaux. La figure 1.2 aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs multiniveaux. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure I.2.a, dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal [2].

La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou V_{dc1} . Sur la figure I.2.b, la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, V_{dc1} ou $V_{dc1} + V_{dc2}$

dans la figure I.2.c le cas général de m niveaux est présenté

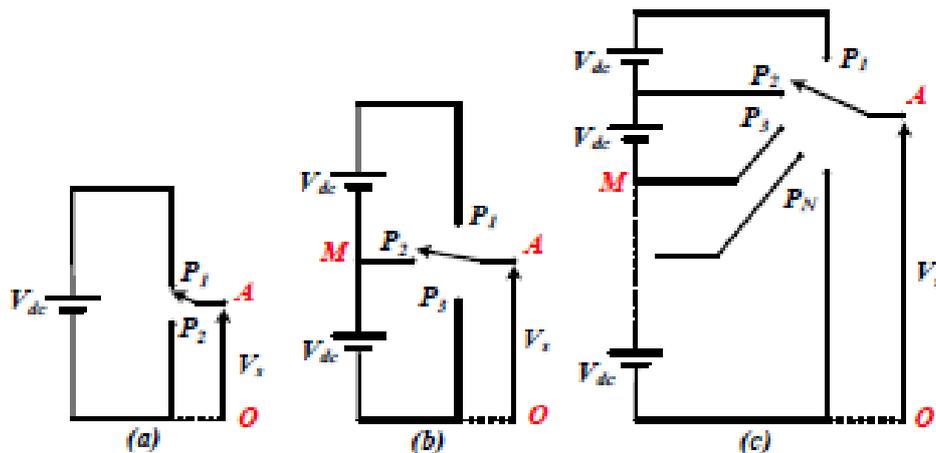


Figure I.2 Onduleur à niveaux multiples (a) à deux niveaux, (b) à trois niveaux et (c) à n niveaux [9]

En général, les convertisseurs multiniveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée à partir de plusieurs niveaux de tension discrets

I.4. Topologies Principales D'onduleurs Multiniveaux

Le concept de convertisseur multiniveaux peut être mis en œuvre par différentes structures reposent sur les associations de semi-conducteurs de puissance et pour certaines topologies de leurs connexions en série. La caractéristique commune de celle-ci sera sa capacité à fournir une forme d'onde qui puisse prendre plusieurs niveaux en sortie du convertisseur [3].

La Figure.3 représente les topologies des onduleurs multiniveaux les plus récentes.

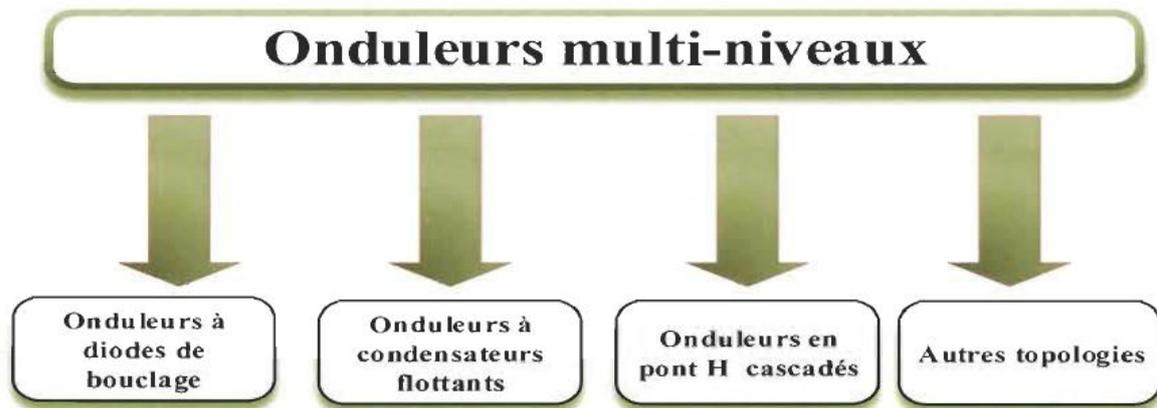


Figure I.3 Les différentes topologies des onduleurs multiniveaux [4]

Bien que cette partie ne soit en aucun cas une vue complète sur les topologies des onduleurs multiniveaux mais elle couvre celles qui polarisent l'attention des chercheurs. En raison de l'intérêt suscité récemment par ces trois types de structures multiniveaux on va présenter par la suite leurs principales caractéristiques.

I.4.1. Onduleur de tension à diode de bouclage

La structure de ce type d'onduleurs est la plus utilisée. On associe à chaque phase des diodes appelées diodes flottantes, qui sert à appliquer les différents niveaux de tension de la source continue. Par rapport à l'onduleur à capacités flottantes, on n'a pas besoin d'utiliser des capacités pour chaque phase, ce qui élimine les risques des résonances parasites. Néanmoins, Il se pose le problème d'équilibrage des tensions aux bornes des capacités de source

continue [2].

Les onduleurs NPC à trois et à cinq niveaux sont donnés par la figure I.4

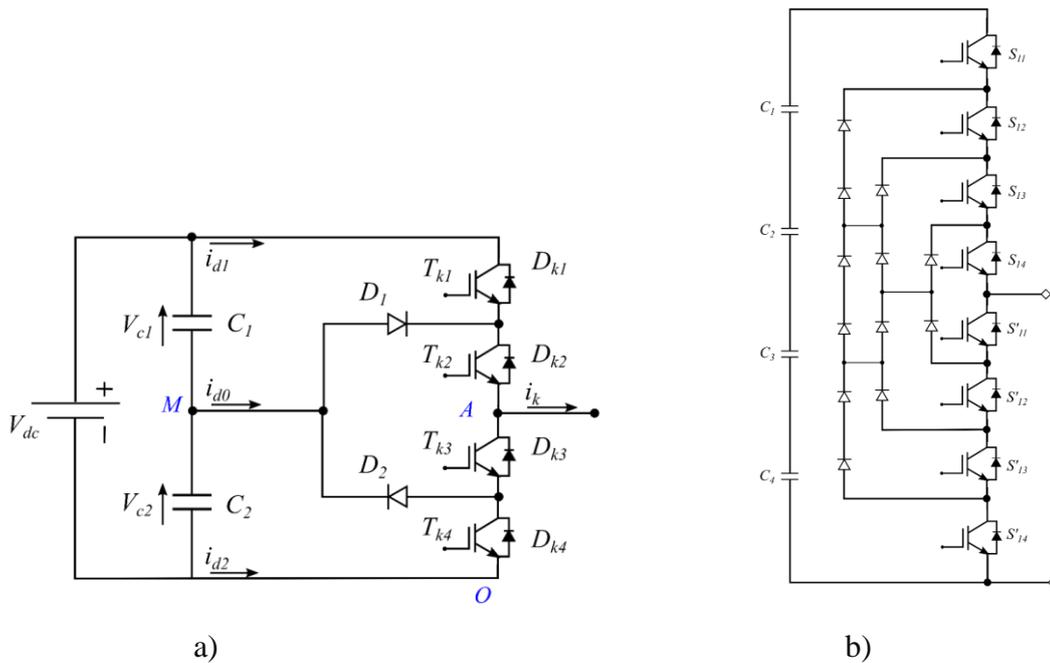


Figure I.4 Circuit d'une phase d'onduleur NPC à diode de bouclage

a) à trois niveaux. b) à cinq niveaux

Les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence. Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, N-1 condensateurs sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à $V_{dc} / (N - 1)$, V_{dc} étant la tension d'entrée totale appliquée.

Tableau I.1 Nombres de composants nécessaires pour la topologie NPC à n niveaux.

Topologie	N	S	K	D	Dc	C
NPC à diode de bouclage	N	(n-1)	2(n-1)	2(n-1)	(n-1)(n-2)	0

Avec :

- n : le nombre de niveaux de tension obtenus,
- s : le nombre de sources à courant continu,
- k : le nombre de commutateurs principaux,
- D : le nombre de diodes principales,
- DC: le nombre de diodes clampées,
- C : le nombre de condensateurs d'équilibrage.

L'onduleur de tension à trois niveaux présente des avantages par rapport à la topologie d'onduleur classique (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 [5].
- ✓ 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 $V_{dc} (N-1) / N$, où N est le nombre de niveaux. Donc, les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception et soulève des questions de fiabilité et du coût 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 [4].

I.4.2. Onduleurs multi-niveaux à condensateur flottant

Dans un convertisseur à deux niveaux de tension, chaque phase est constituée d'une paire d'interrupteurs de puissance montée en parallèle aux bornes d'un Condensateur. Ils sont souvent commandés de façon complémentaire, si bien que la tension de sortie de la branche est reliée soit à la borne positive, soit à la borne négative de ce condensateur [6].

Dans la topologie multi- niveau proposée en 1992 par T. Meynard et H. Foch, elle est également connue sous l'appellation « flying capacitors multi-level inverter »

Dans la littérature anglo-saxonne.

Plusieurs cellules « condensateur et paire d'interrupteurs » sont imbriquées les unes dans les autres comme l'illustre la figure (I.6) pour un bras d'onduleur à condensateur flottant :

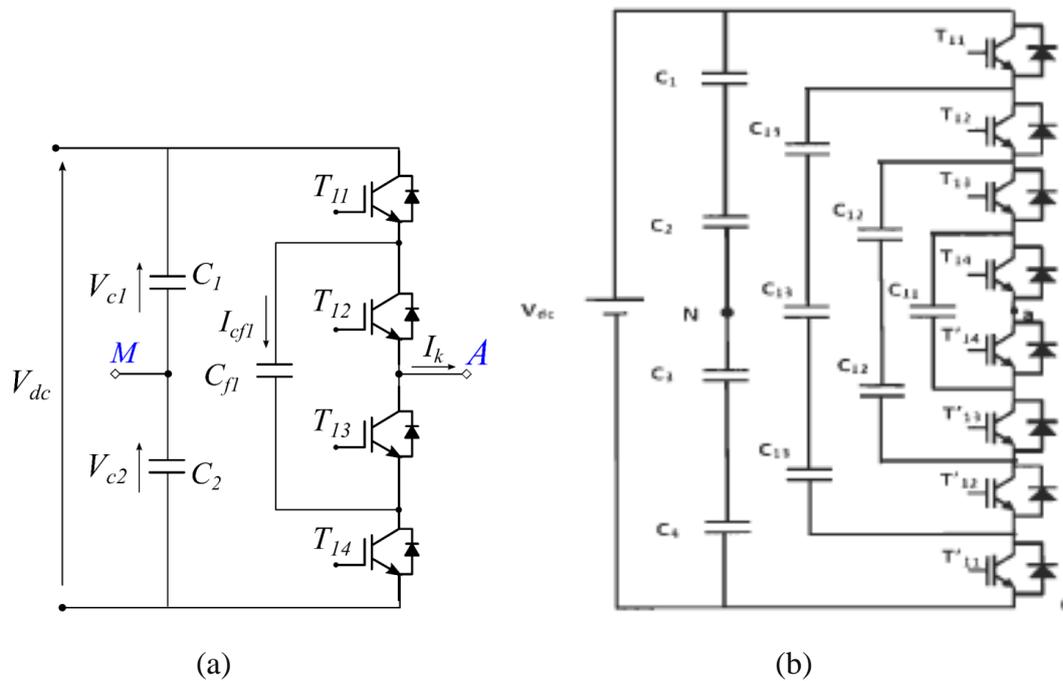


Figure I.6 circuit d'une phase d'un onduleur à condensateur flottant

a) trois niveaux ; b) à cinq niveaux

Pour un onduleur à condensateur flottant de N niveaux, chaque bras doit contenir $2(N-1)$ interrupteurs et $N(N-1)/2$ capacités, et nous avons $2N-1$ séquences de fonctionnement possible permettant de générer les n niveaux de tensions. Cette topologie élimine quelques inconvénients de la NPC comme l'équilibre des tensions supportées par les interrupteurs [4].

Tableau I.2 Nombres de composants nécessaires pour la topologie à condensateur flottant à n niveaux

Topologie	N	S	K	D	Dc	C
NPC à Condensateurs flottants	N	(n-1)	2(n-1)	2(n-1)	0	(n-1)(n-2)/2

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 [6].

Actuellement il semble que cette topologie a quelques **inconvenients**. 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.4.3. Onduleur multiniveaux en pont H cascades

Les onduleurs multiniveaux en cascade est une structure relativement nouvelle. Un onduleur multiniveaux en cascade est tout simplement une connexion en série de plusieurs onduleurs monophasés.

Les onduleurs multi-niveaux en cascade on introduit l'idée d'utiliser des sources DC séparée pour Produire une onde de tension AC. Chaque onduleur monophasé est connecté à sa propre source en courant continu. Les sorties de chaque onduleur monophasé, est une onde de tension alternative. [7]

La figure I.7c) 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 [4].

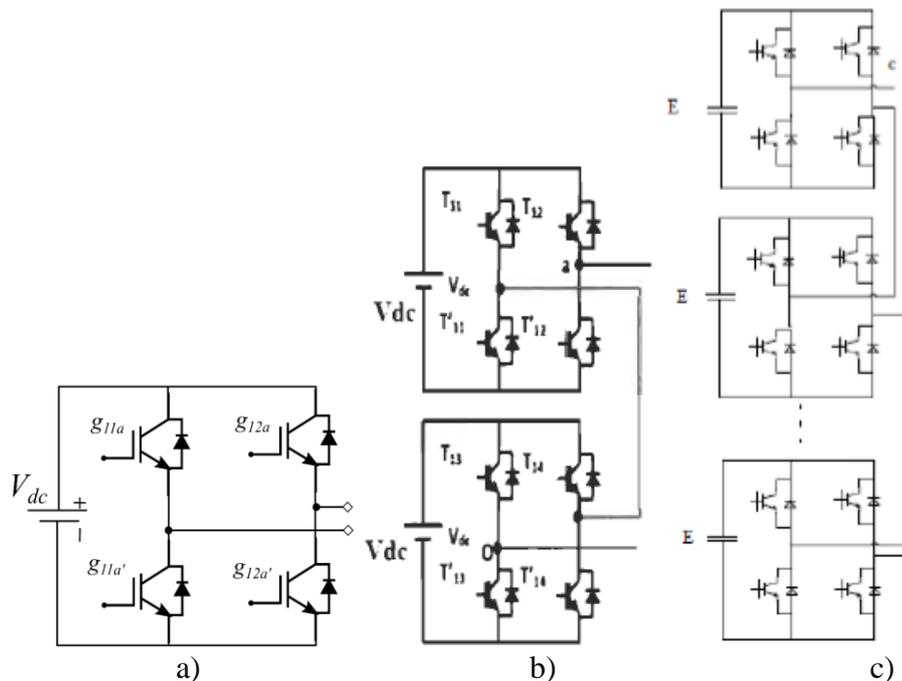


Figure I.7 Circuit d'une phase d'un onduleur en pont H cascade
a) à trois niveaux b) à cinq niveaux c) à n niveaux

Tableau I.3 Nombres de composants nécessaires pour la topologie cascade à n niveaux

Topologie	N	S	K	D	Dc	C
Cascade	N	(n-1)/2	2(n-1)	2(n-1)	0	0

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

Avantage:

L'onduleur multi niveaux en cascade est une structure de convertisseurs d'énergie, il présente l'idée d'employer des sources séparées à courant continu pour produire une forme d'onde d'une tension alternative.

- 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 [8].
- La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par chaque onduleur monophasé.
- Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraîne moins

De problèmes de sécurité.

- Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus du double du nombre de sources à Courant continu ($N = 2s + 1$).

Inconvénients:

- Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur Traditionnel [8].
- Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
- Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC

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 [8] :

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

I.5. Les objectifs de l'MLI

Les principaux objectifs de l'MLI sont les suivants:

- Obtenir dans la charge électrique des courants proche de la sinusoïde par le contrôle des rapports cycliques et grâce à une fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie.
- Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamental des tensions de sortie généralement sur une plus grande plage possible et pour une fréquence de sortie largement variable.

Les paramètres essentiels de l'MLI sont [3] :

- La fréquence de modulation : f_m
- L'indice de modulation : $m = \frac{f_m}{f}$

Où :

f est la fréquence des fondamentale des grandeurs de sortie de l'onduleur

- Le coefficient de réglage r :

$$r = \frac{\text{Valeur crête du fondamentale de la tension de la charge souhaité}}{\text{Amplitude des créneaux de la tension de sortie}}$$

On cherche généralement à obtenir une valeur maximale de r la plus élevée possible.

I.6. Généralités sur les systèmes photovoltaïques

L'hélioélectricité, qui traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium, mais ce n'est qu'en 1954, avec la réalisation des premières cellules photovoltaïques au sélénium dans les laboratoires de la compagnie Bell Telephone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie. Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux, leur développement et de rapides progrès ont été motivés par la conquête de l'espace. Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. Des événements tels que les courses de véhicules solaires offrant une image de haute technologie futuriste et écologique y ont également contribué [12].

I.6.1. Introduction

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait l'associer étroitement à un système complet correspondant à une application bien spécifique [10].

Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur précédemment décrit, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants:

- un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes),
- une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- un convertisseur DC/AC
- une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard

La Figure I.8 représente Structure générale d'un système PV, Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales.

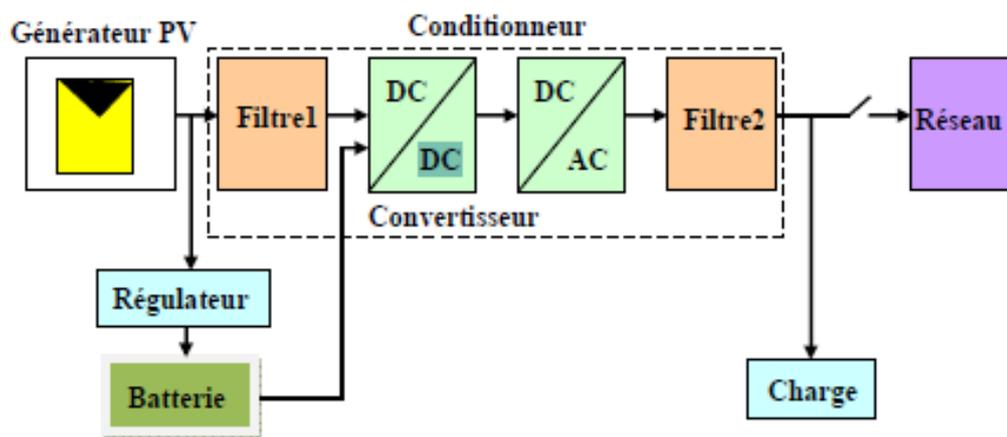


Figure I.8 Structure générale d'un système PV [11]

I.6.2. Le principe

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque (Bequerelle 1889). Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi conducteur (**Figure I.9**). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [12].

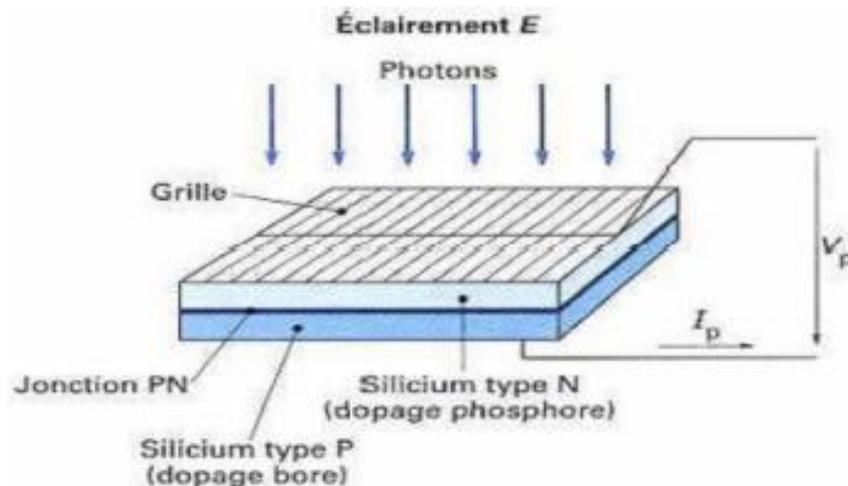


Figure I.9 Schéma d'une cellule photovoltaïque [13]

I.7. L'énergie solaire

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous forme d'un rayonnement électromagnétique de photons et de rayonnement infrarouge.

L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de :

- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

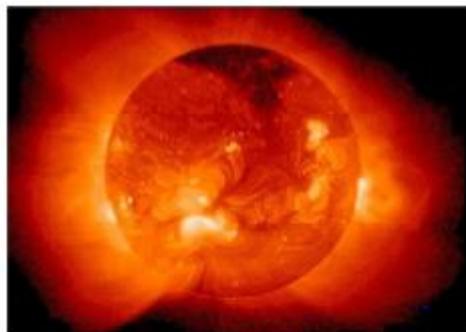


Figure I.10 le soleil source de l'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est d'environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m².

Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à 1000 W/ m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons.

L'énergie d'un photon étant donnée par la relation [14] :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

λ : la densité d'énergie solaire.

h : la constante de Planck.

C : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande

Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

I.8. Générateur photovoltaïque

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les cellules connectées en série augmentent la tension et les cellules connectées en parallèle augmentent le courant. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [25,21].

I.8.1. panneau photovoltaïques

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [15].



Figure I.11 panneau photovoltaïque [15]

I.8.2. Module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau

photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [4].

I.9. Classification d'un système solaire photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en deux grandes catégories:

Les systèmes autonomes et les systèmes raccordé au réseau.

I.9.1. Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure 1.11 qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production. Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement [7].

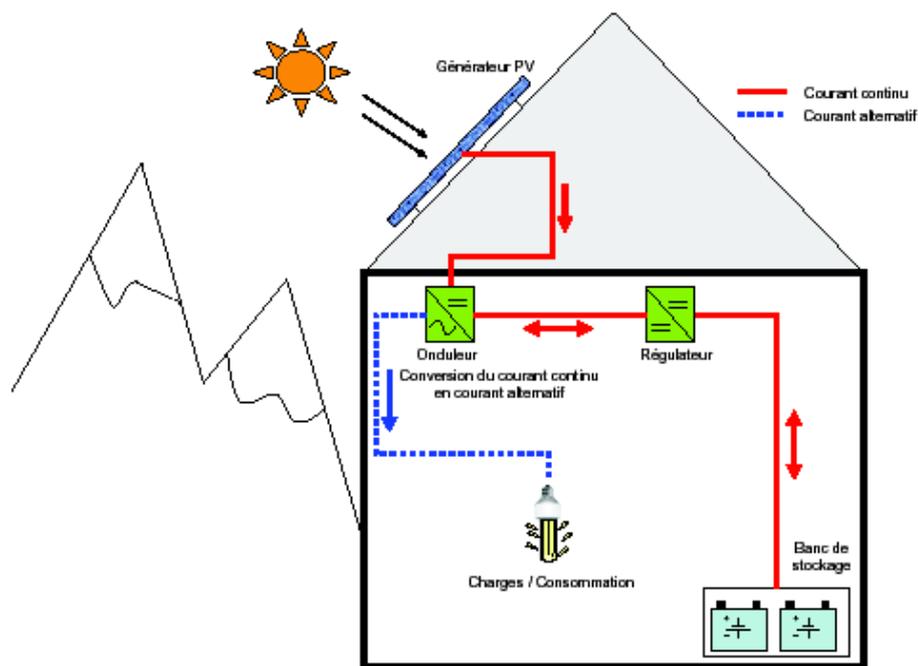


Figure I.12 Exemple de la structure d'un système PV autonome

I.9.2. Système hybride

Pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, les dispensaires, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle, la disponibilité permanente de la source primaire d'énergie est

vitale et conditionne dans une très large mesure, la fiabilité des installations et leur fonctionnement permanent. Les solutions technologiques classiques apportées par le stockage électrochimique conventionnel sont onéreuses, limitées techniquement en puissance et restreintes en capacité. Les solutions apportées par les groupes électrogènes, de part la nécessité d'approvisionnement en carburant et celle de leur maintenance, présentent des inconvénients liés au bruit, la pollution et sur tout leur mauvais rendement à charge partielle. Les nouvelles solutions technologiques apportées par les systèmes hybrides, même si elles ne sont pas encore économiquement compétitives, offrent par contre une sûreté élevée. Toutefois, à la vue de la nécessité du développement durable, ces solutions, avec l'appui de la volonté publique, peuvent être économiquement viables, à moyen et long terme [7].

I.9.3. système raccordé au réseau

Les systèmes photovoltaïques sont couplés directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (CC-CA). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même [7].

On peut distinguer des systèmes PV raccordés aux réseaux avec et sans batteries de stockage [14].

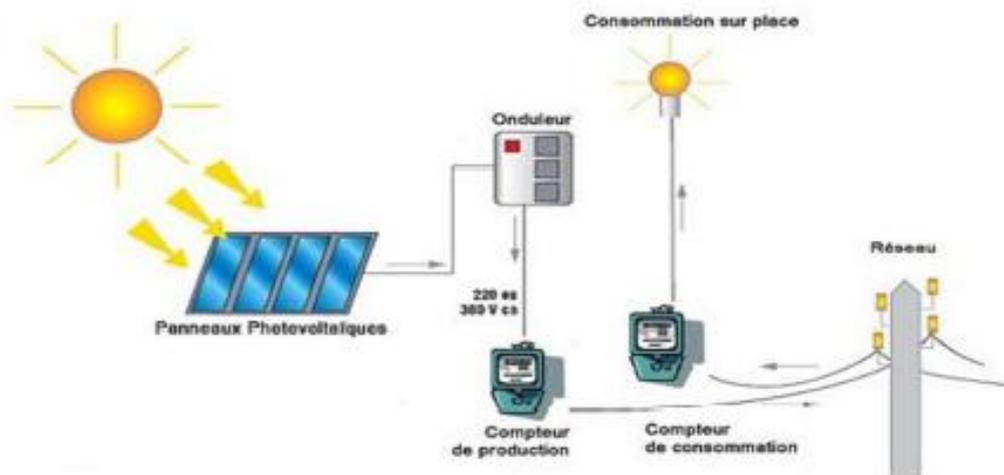


Figure I.13 Système PV raccordé au réseau sans batterie [14]

I.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

❖ Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages:

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.

- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- 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).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans [16].
- ❖ **Les 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 des batteries, le coût de l'installation augmente.
 - Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'atténuer, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [16].

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes topologies des onduleurs multiniveaux. Ensuite on fait une généralité sur les system PV

L'étude de l'onduleur multiniveaux qui présente notre intérêt dans cette étude. Les différentes topologies de base de ce dernier sont données toute en exposant leurs avantages à savoir :

- La topologie NPC permet de réduire le taux de distorsion harmonique, et l'augmentation du niveau des tensions générées;
- La topologie a condensateur flottant aussi permet la réduction du taux de distorsion mais elle constitue un grand nombre de condensateur;
- La topologie en cascade ou le nombre de niveaux possible de tension de sortie et plus du double de nombre de sources à courant continu.

CHAPITRE II

ONDULEUR MULTINIVEAU NPC

II.1. Introduction

L'onduleur est un convertisseur statique qui joue le rôle d'interface entre une source d'énergie électrique continue et une charge alimentée en alternatif. Les onduleurs de tension triphasés multiniveaux à structure NPC jouent un rôle incontournable dans des applications de forte puissance et haute tension.

II.2. Onduleur NPC à diode de bouclage

II.2.1. Onduleur NPC à trois 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 $Ka1$, $Ka2$ sont passants et $Ka3$, $Ka4$ sont bloqués comme la montre dans la figure II.1(a). La tension de sortie V_s vaut: $+E/2$.

La tension appliquée aux interrupteurs $Ka1$, $Ka2$ vaut : $+E/2$.

- Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Les interrupteurs $Ka2$, $Ka3$ sont passants et $Ka1$, $Ka4$ 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 II.1(b). La tension de sortie V_{ao} est donc nulle, $V_s = 0$.

La tension appliquée aux interrupteurs $Ka1$, $Ka4$ vaut: $+E/2$

- Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs $Ka1$, $Ka2$ sont bloqués et $Ka3$, $Ka4$ sont passants comme

la montre dans la figure II.1(c). La tension de sortie V_s vaut: $-E/2$.

La tension appliquée aux interrupteurs $Ka1$, $K2$ vaut: $+E/2[4]$.

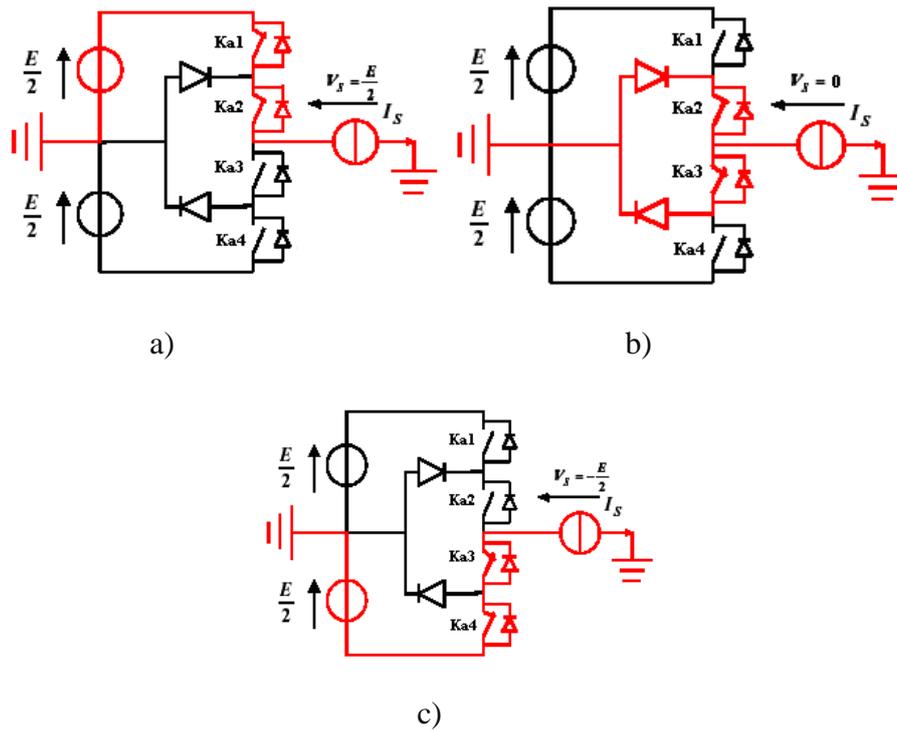


Figure II.1 séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur NPC trois niveaux [17]

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 II.1 États de commutation de l'onduleur NPC à trois niveaux

Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Vs
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 (II.2)

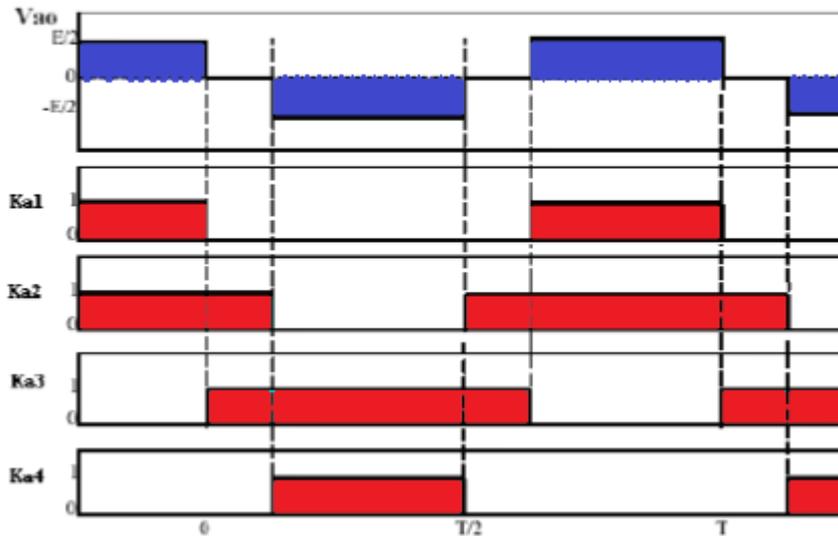


Figure II.2 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC

II.2.2. Onduleur NPC à cinq niveaux

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

- Séquences 1 :

$Ka1$, $Ka2$, $Ka3$ et $Ka4$ sont passants et $Ka5$, $Ka6$, $Ka7$ et $Ka8$ sont bloqués (Figure II.3), 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 :

$$V_{Ka5} = V_{Ka6} = V_{Ka7} = V_{Ka8} = +E/4$$

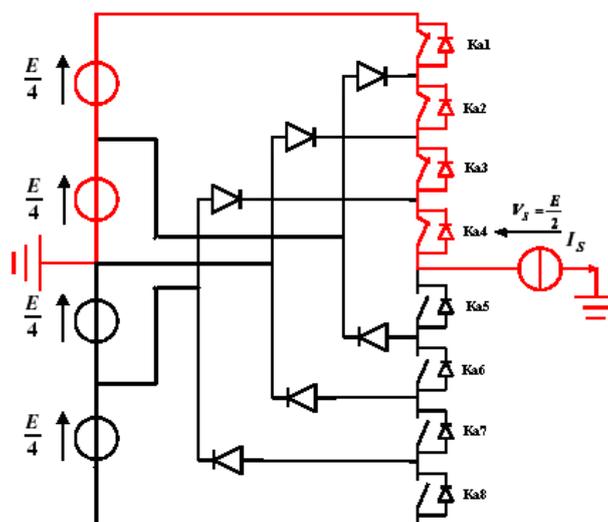


Figure II.3 1ère séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux [17]

- Séquences 2 :

K_{a2} , K_{a3} , K_{a4} , et K_{a5} sont passants et, K_{a6} , K_{a7} , K_{a8} et K_{a1} sont bloqués (**Figure II.4**), on a la tension de sortie est :

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

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

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

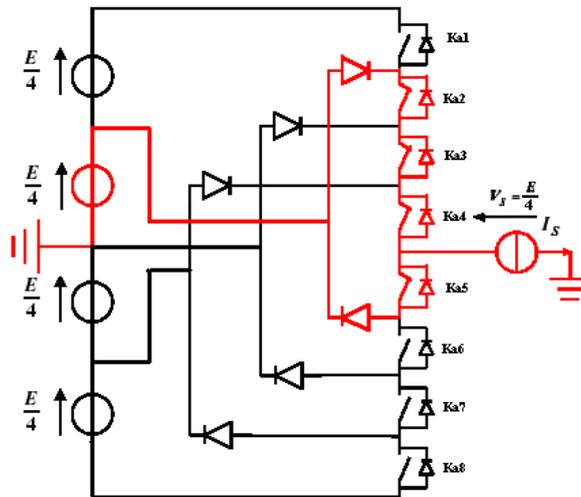


Figure II.4 2^{ème} séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux [17]

- Séquence 3 :

K_{a3} , K_{a4} , K_{a5} , et K_{a6} sont passants et, K_{a7} , K_{a8} , K_{a1} et K_{a2} sont bloqués (**Figure III.5**), on a la tension de sortie est :

$$V_{ao} = 0$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

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

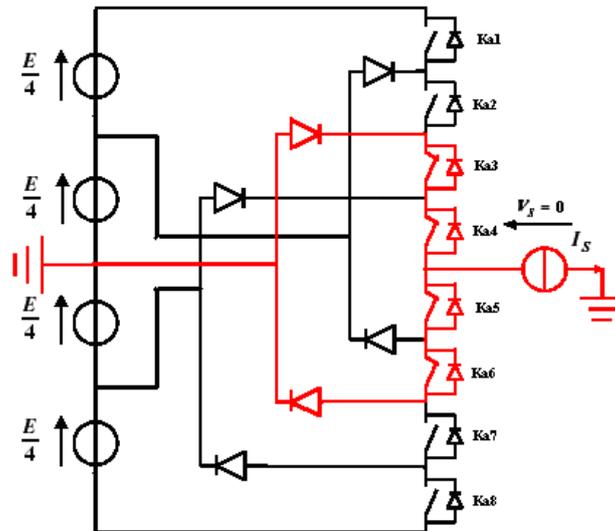


Figure II.5 3^{ème} séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux [17]

- Séquence 4 :

K_{a4} , K_{a5} , K_{a6} , et K_{a7} sont passants et, K_{a8} , K_{a1} , K_{a2} et K_{a3} sont bloqués (Figure II.6), on a la tension de sortie est :

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

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

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

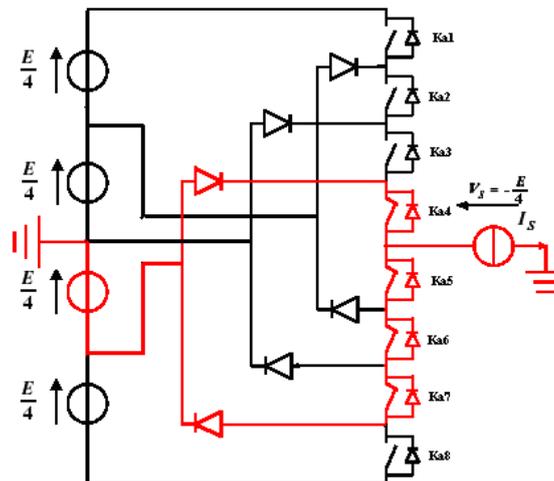


Figure II.6 4^{ème} séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux [17]

- Séquence 5 :

K_{a5} , K_{a6} , K_{a7} , et K_{a8} sont passants et, K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} et K_{a4} sont bloqués (Figure II.7), on a la tension de sortie est :

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

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

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

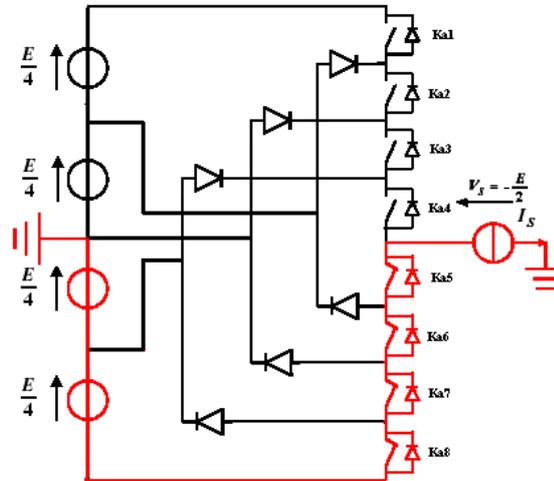


Figure II.7 5^{ème} séquence d'un bras d'onduleur NPC à cinq niveaux [17]

Tableau II.2 États de commutation de l'onduleur NPC à cinq niveaux

Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka5	Ka6	Ka7	Ka8	Va0
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 II.8 représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie V_{ao} .

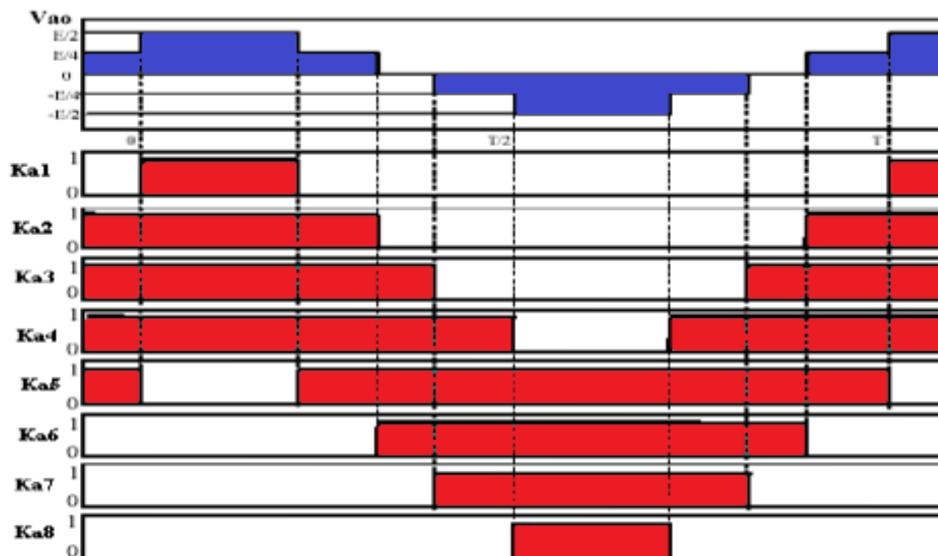


Figure II.8 Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé à cinq niveaux de type NPC

II.2.3. Onduleur NPC à sept 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 :

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

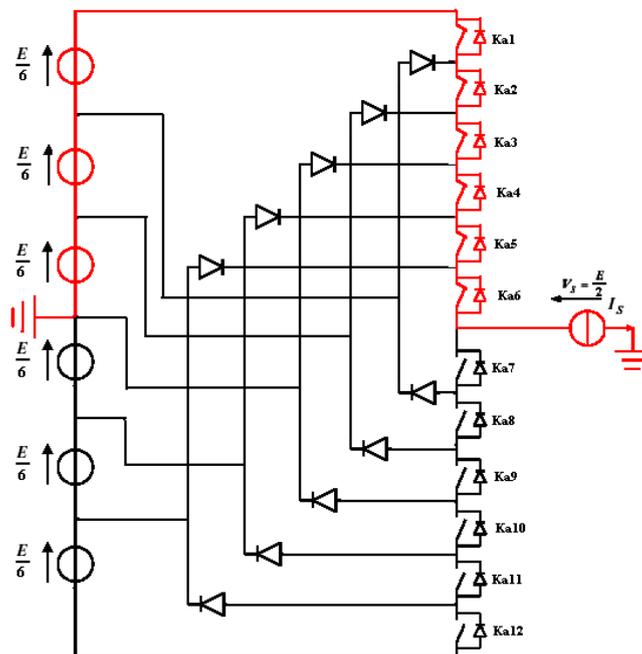


Figure II.9 1 ère séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux [17]

- Séquence 2 :

K_{a2} , K_{a3} , K_{a4} , K_{a5} , K_{a6} et K_{a7} sont passants et K_{a8} , K_{a9} , K_{a10} , K_{a11} , K_{a12} et K_{a1} 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 :

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

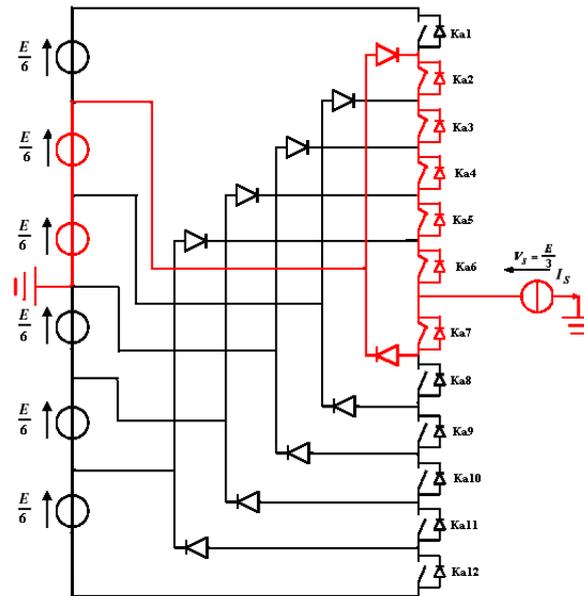


Figure II.10 2^{ème} séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux [17]

• Séquence 3 :

$Ka_3, Ka_4, Ka_5, Ka_6, Ka_7$ et Ka_8 sont passants et $Ka_9, Ka_{10}, Ka_{11}, Ka_{12}, Ka_1$ et Ka_2 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 :

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

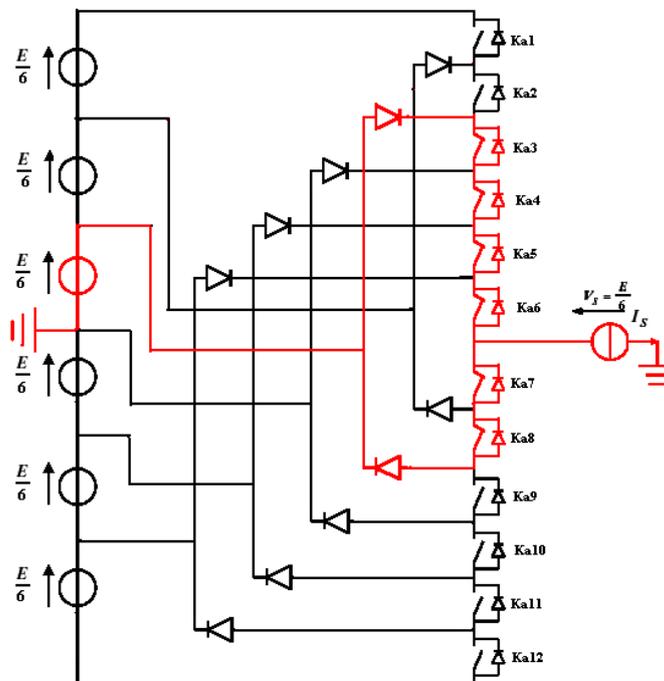


Figure II.11 3^{ème} séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux [17]

- Séquence 4 :

K_{a4} , K_{a5} , K_{a6} , K_{a7} , K_{a8} et K_{a9} sont passants et K_{a10} , K_{a11} , K_{a12} , K_{a1} , K_{a2} et K_{a3} 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 :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka4} = V_{Ka11} = V_{Ka12} = +E/6$$

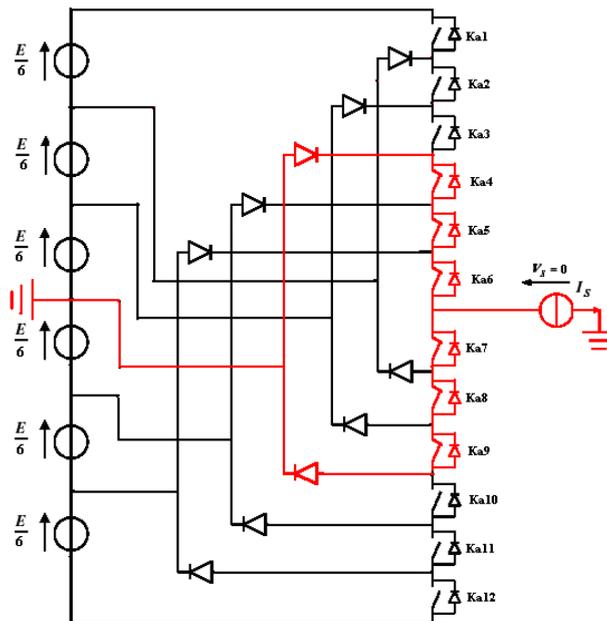


Figure II.12 4^{ème} séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux [17]

- Séquence 5 :

K_{a5} , K_{a6} , K_{a7} , K_{a8} , K_{a9} et K_{a10} sont passants et K_{a11} , K_{a12} , K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} et K_{a4} 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 :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka4} = V_{Ka11} = V_{Ka12} = +E/6$$

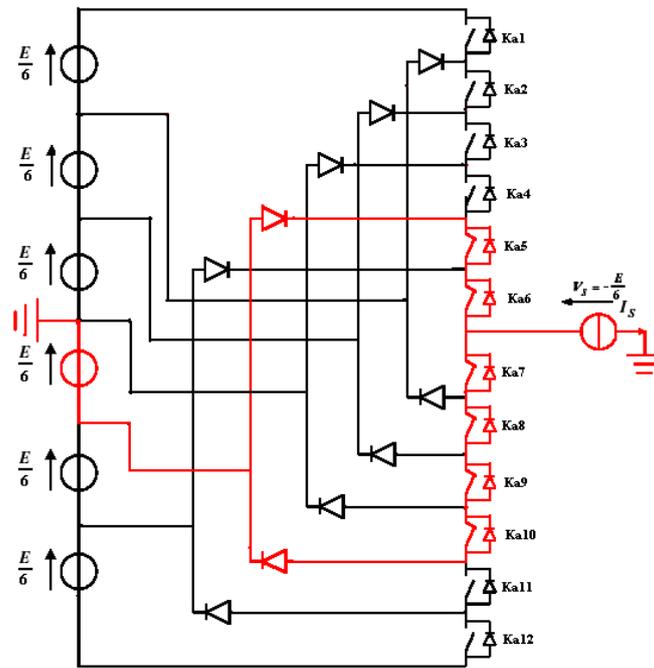


Figure I1.13 5^{ème} séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux [17]

- Séquence 6 :

$Ka7$, $Ka8$, $Ka9$, $Ka10$, $Ka11$ 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 :

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

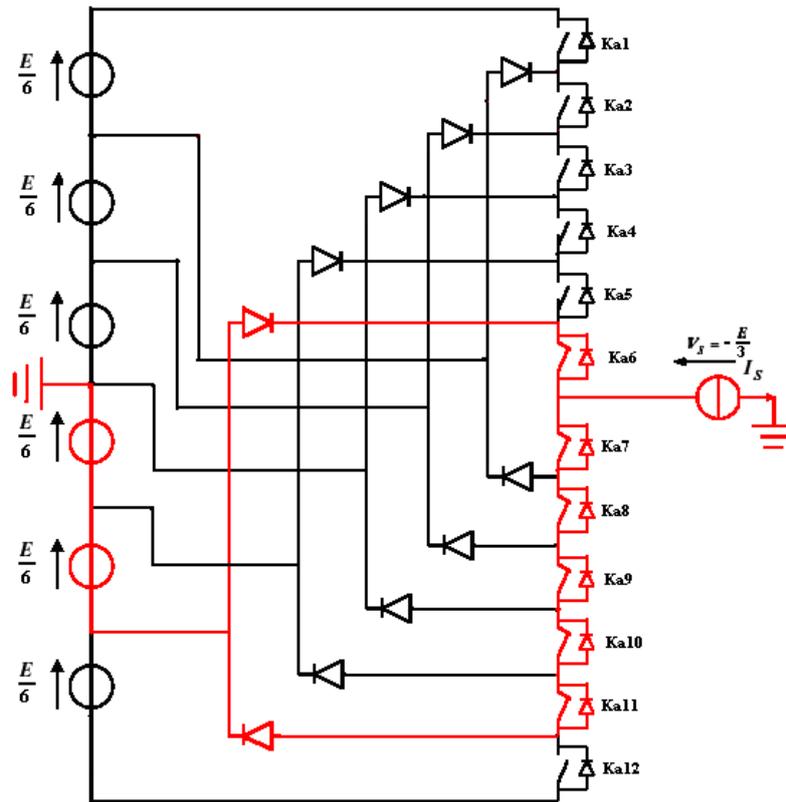


Figure II.14 6^{ème} séquence d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux [17]

- Séquence 7 :

K_{a7} , K_{a8} , K_{a9} , K_{a10} , K_{a11} et K_{a12} sont passants et K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} , K_{a4} , K_{a5} et K_{a6} 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 :

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

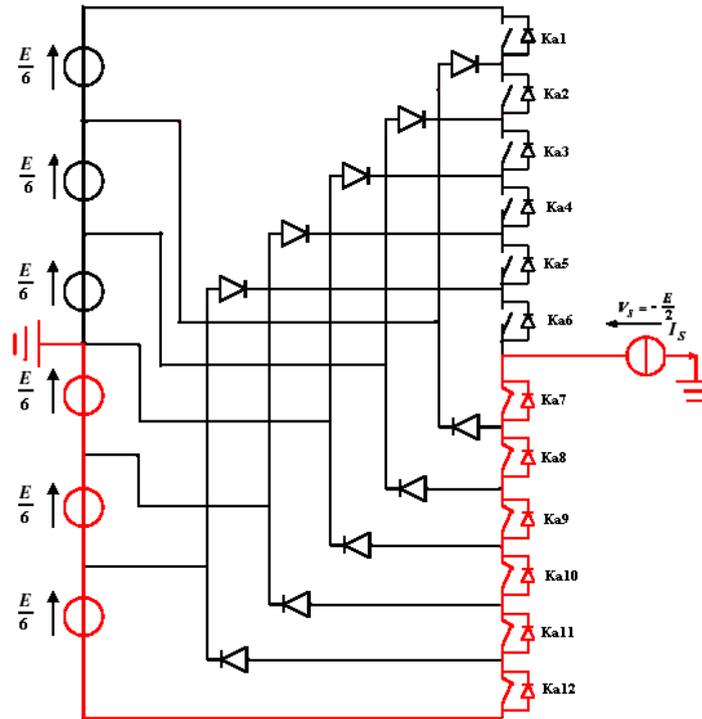


Figure II.15 7^{ème} séquencé d'un bras d'onduleur NPC à sept niveaux [17]

Pour un onduleur NPC à N-niveaux de tensions, nous avons N séquences de fonctionnement possibles permettant de générer les N niveaux de tensions.

Tableau II.3 États de commutation de l'onduleur NPC à sept niveaux

Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka5	Ka6	Ka7	Ka8	Ka9	Ka10	Ka11	Ka12	Va0
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

II.3. simulation Onduleur NPC

II.3.1. Onduleur NPC à trois niveaux

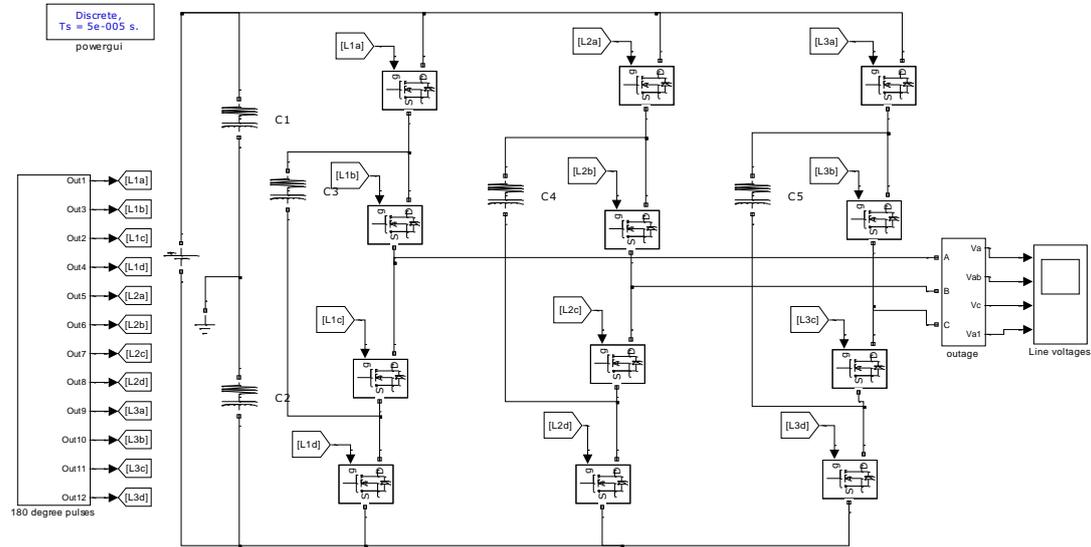


Figure II.16 Structure de puissance de l'onduleur à trois niveaux de type NPC.

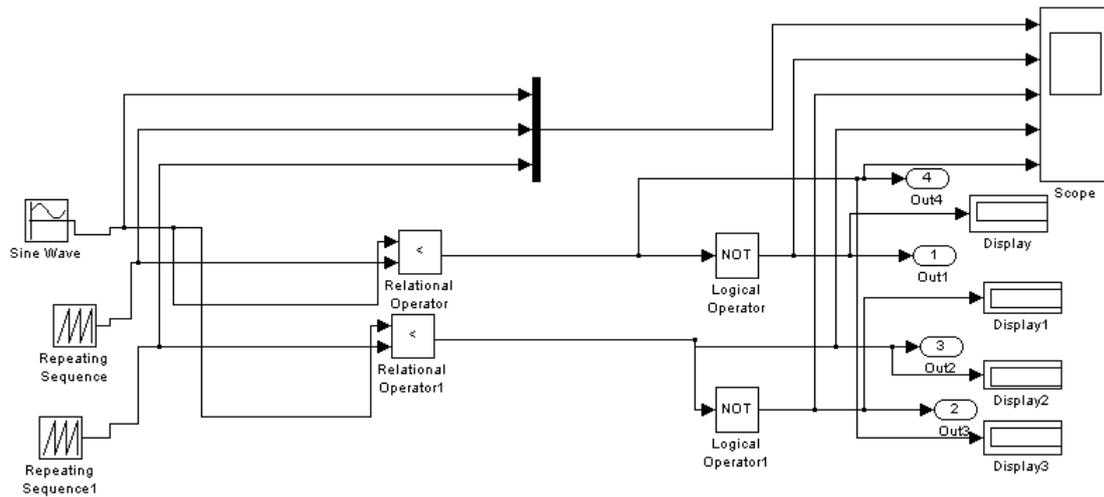


Figure II.17 Commande MLI d'un bras de l'onduleur NPC à 3 niveaux

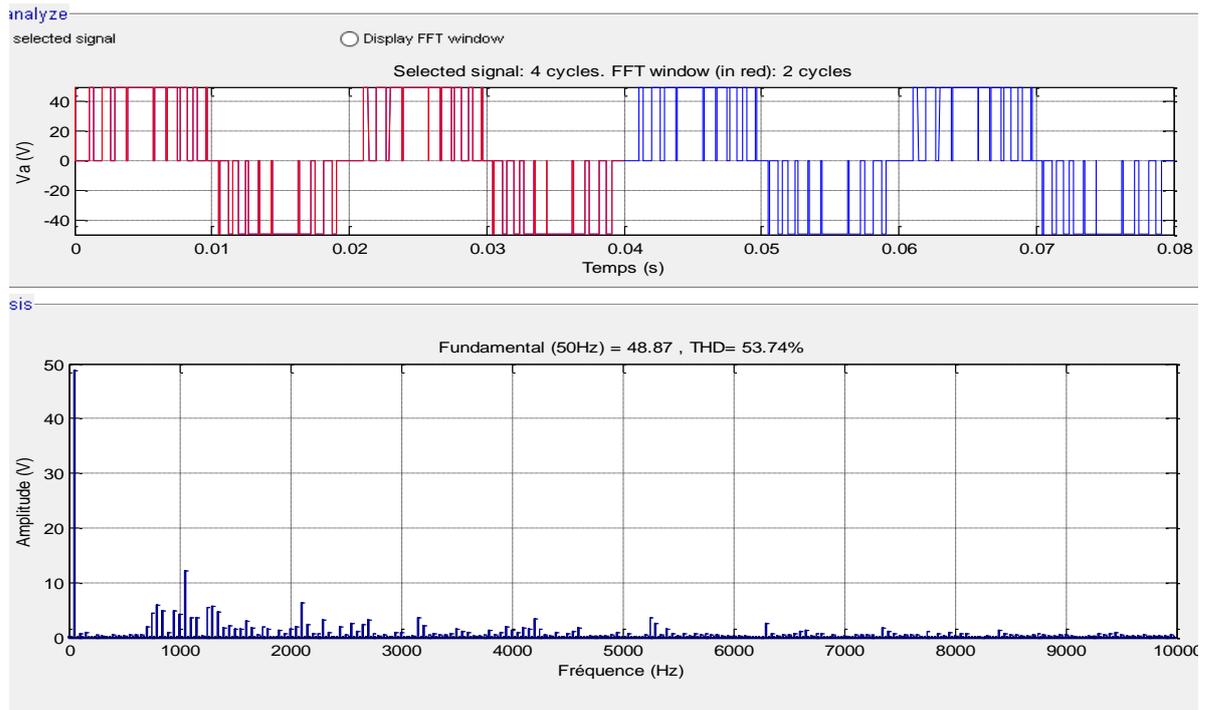


Figure II.18 forme d'onde de la tension simple de l'onduleur NPC 3 niveaux et spectre harmonique

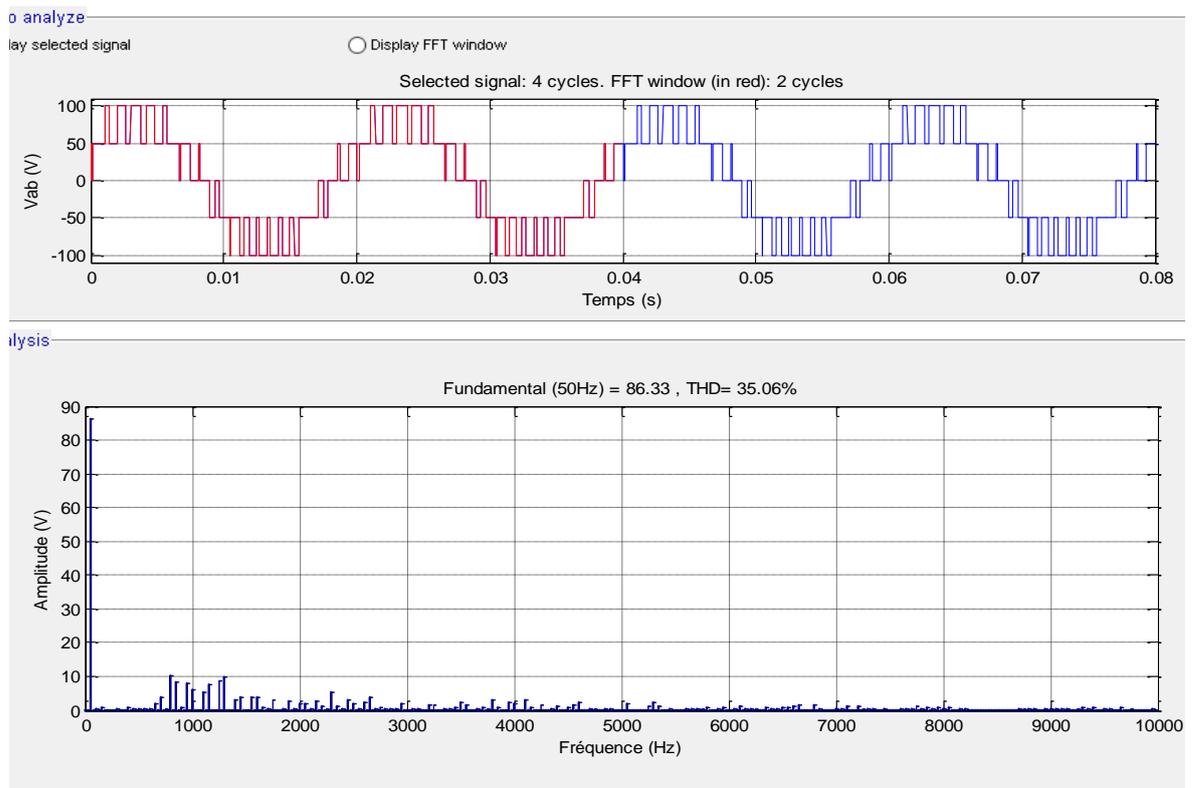


Figure II.19 forme d'onde de la tension composée de l'onduleur NPC 3 niveaux et spectre harmonique

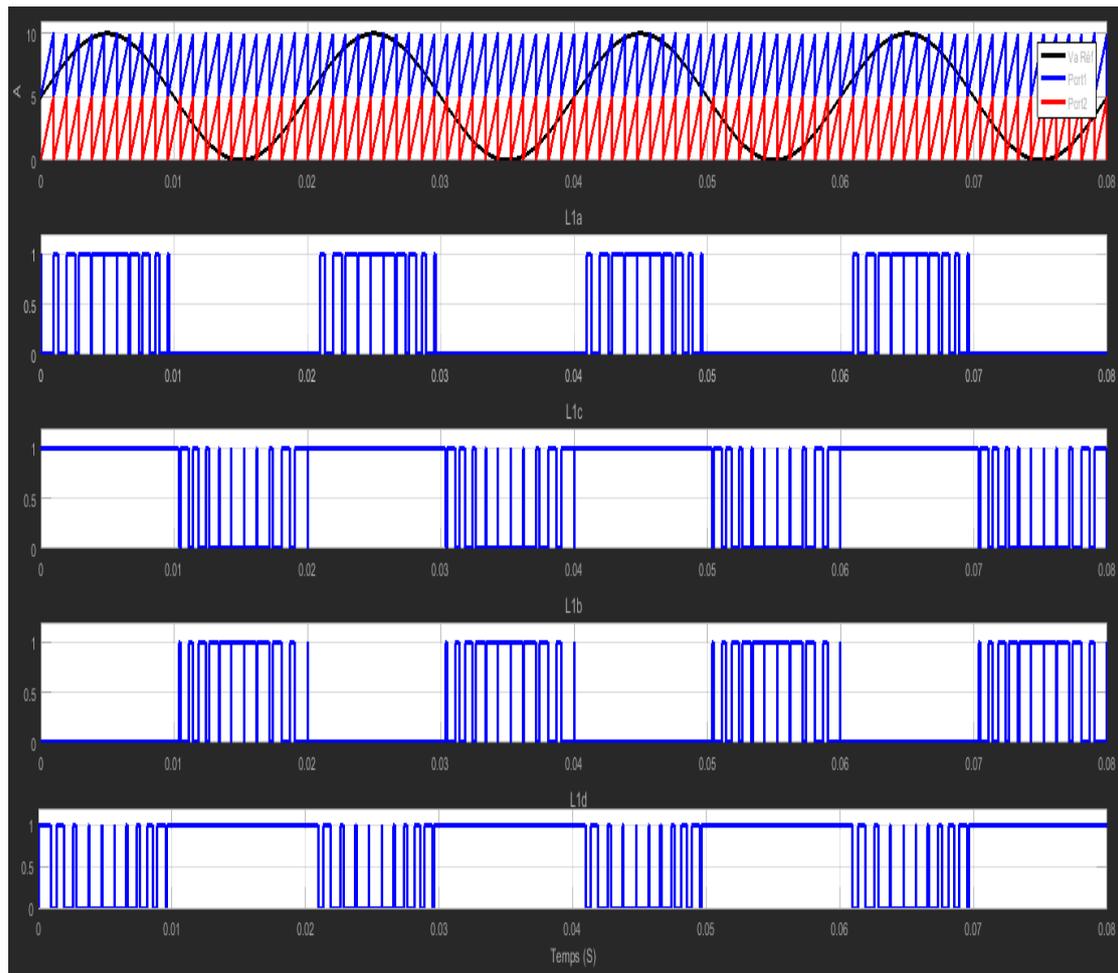


Figure II.20 MLI Onduleur NPC à trois niveaux

II.3.2. Onduleur NPC à cinq niveaux

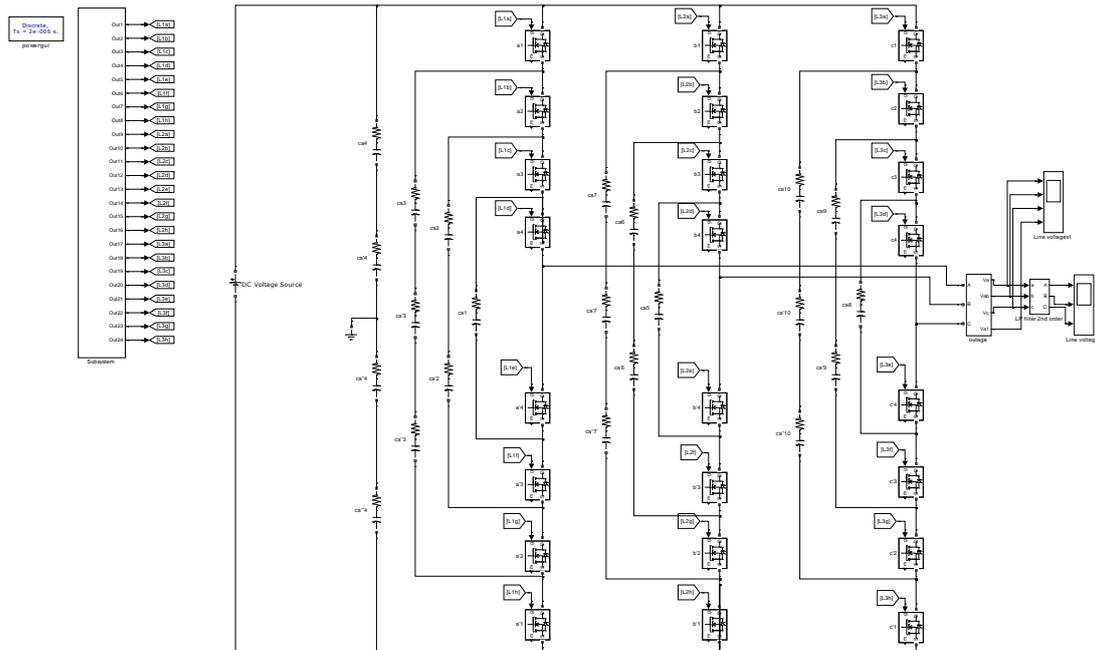


Figure II.21 Structure de puissance de l'onduleur à cinq niveaux de type NPC.

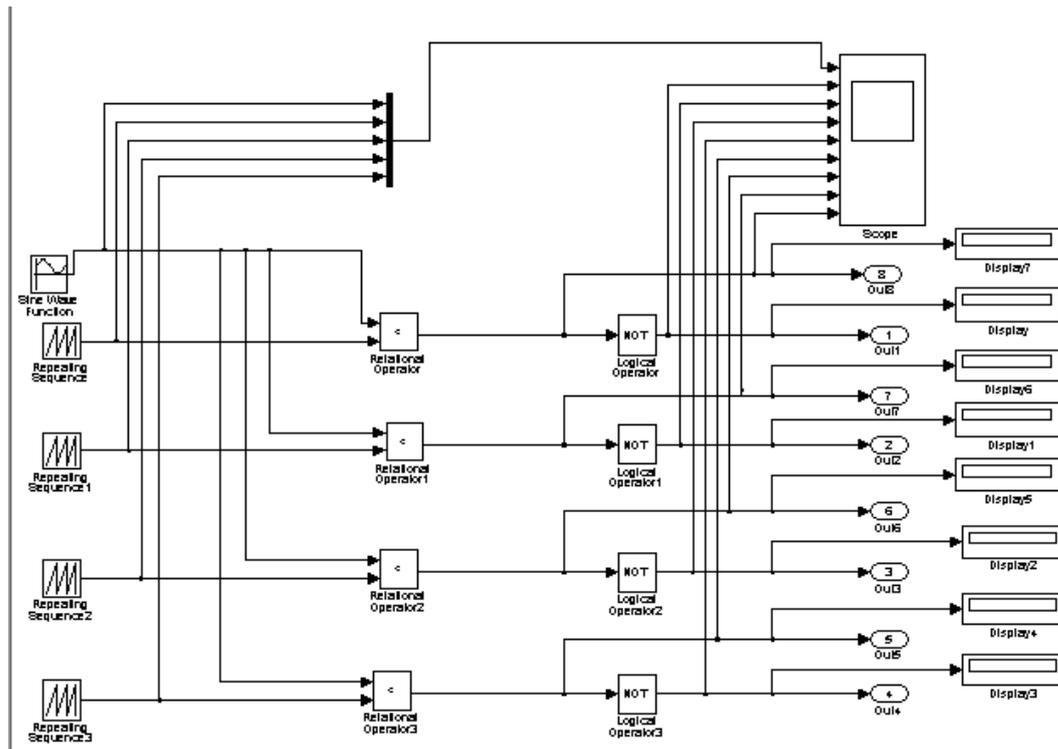


Figure II.22 Commande MLI de trois bras de l'onduleur NPC à 5 niveaux

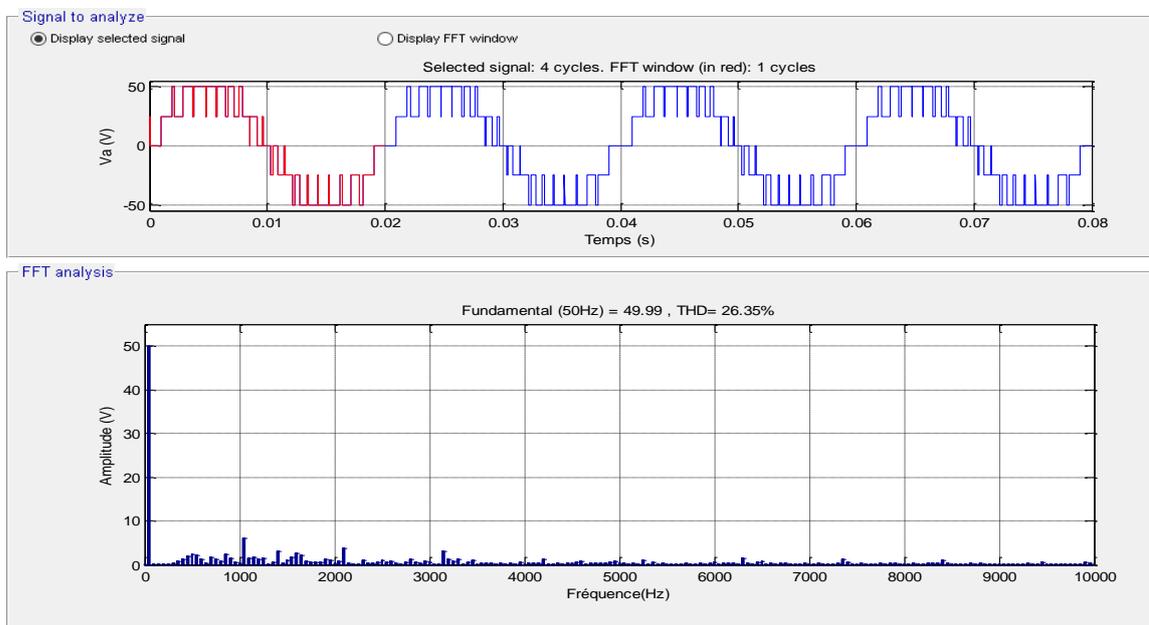


Figure II.23 forme d'onde de la tension simple de l'onduleur NPC 5 niveaux et spectre harmonique

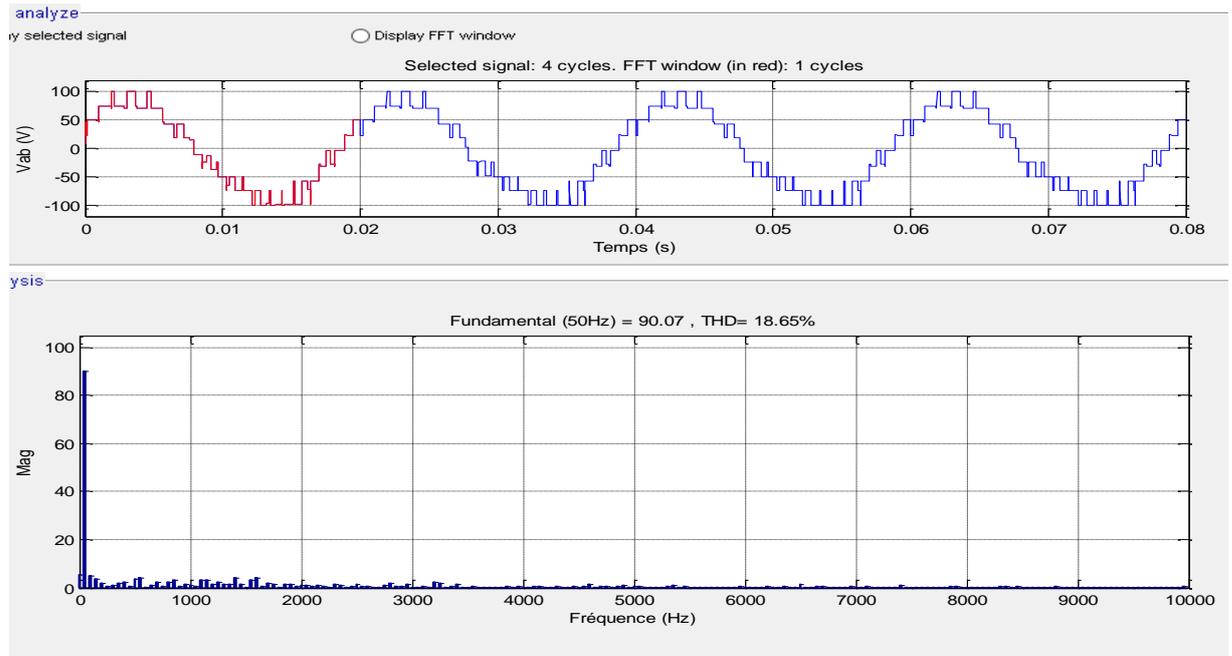


Figure II.24 forme d'onde de la tension composée de l'onduleur NPC 5 niveaux et spectre harmonique

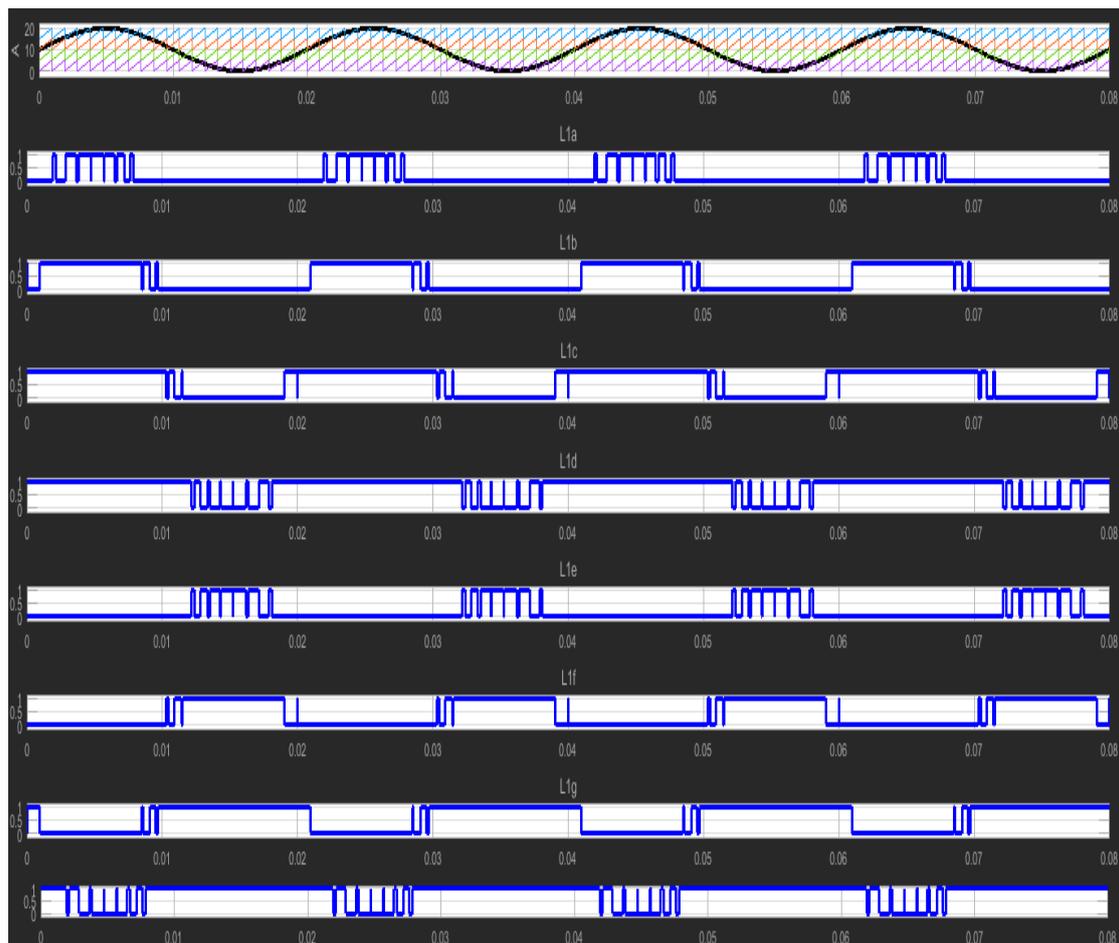


Figure II.25 MLI Onduleur NPC à cinq niveaux

II.3.3. Onduleur NPC à sept niveaux

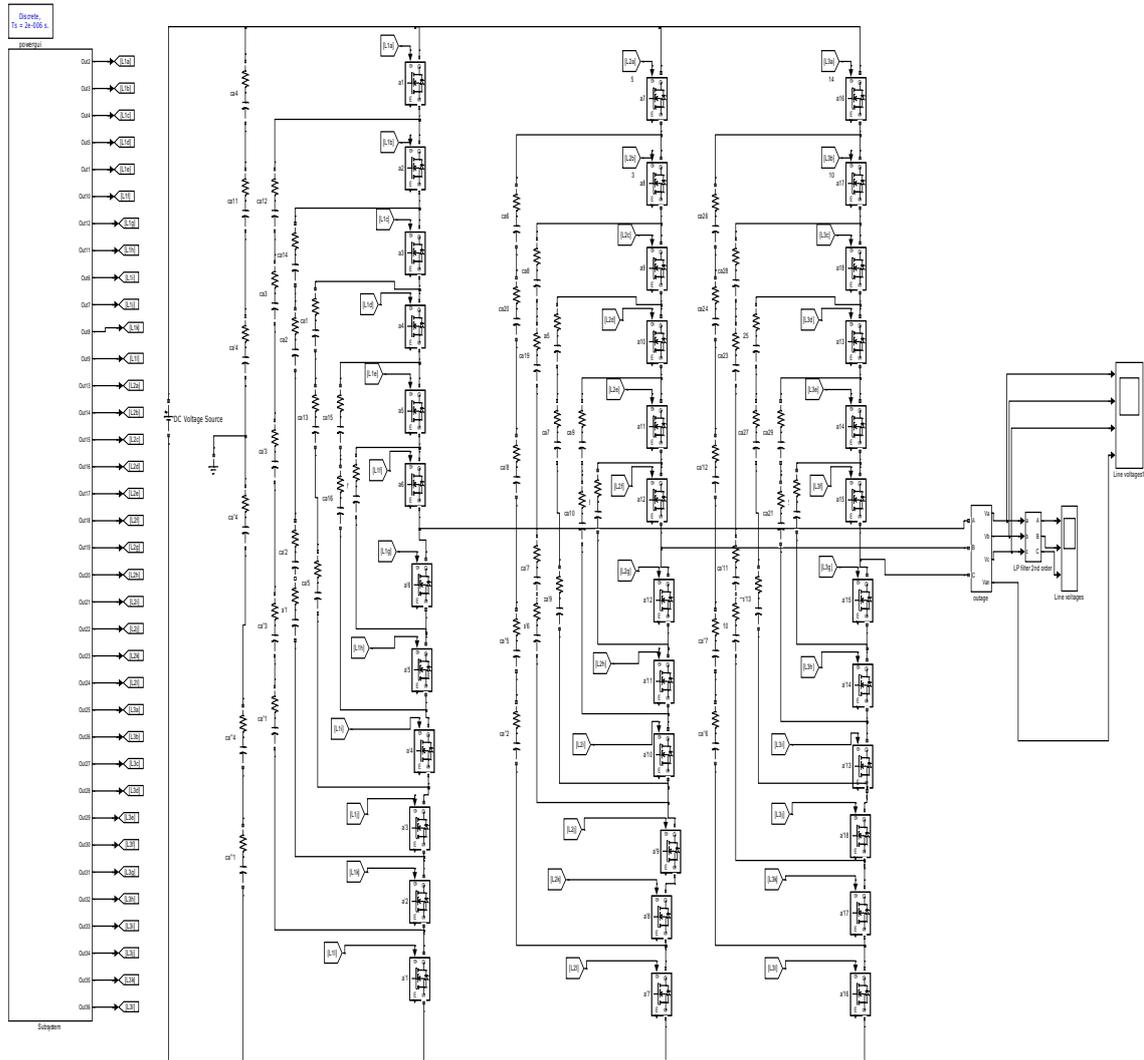


Figure II.26 Structure de puissance de l'onduleur à sept niveaux de type NPC

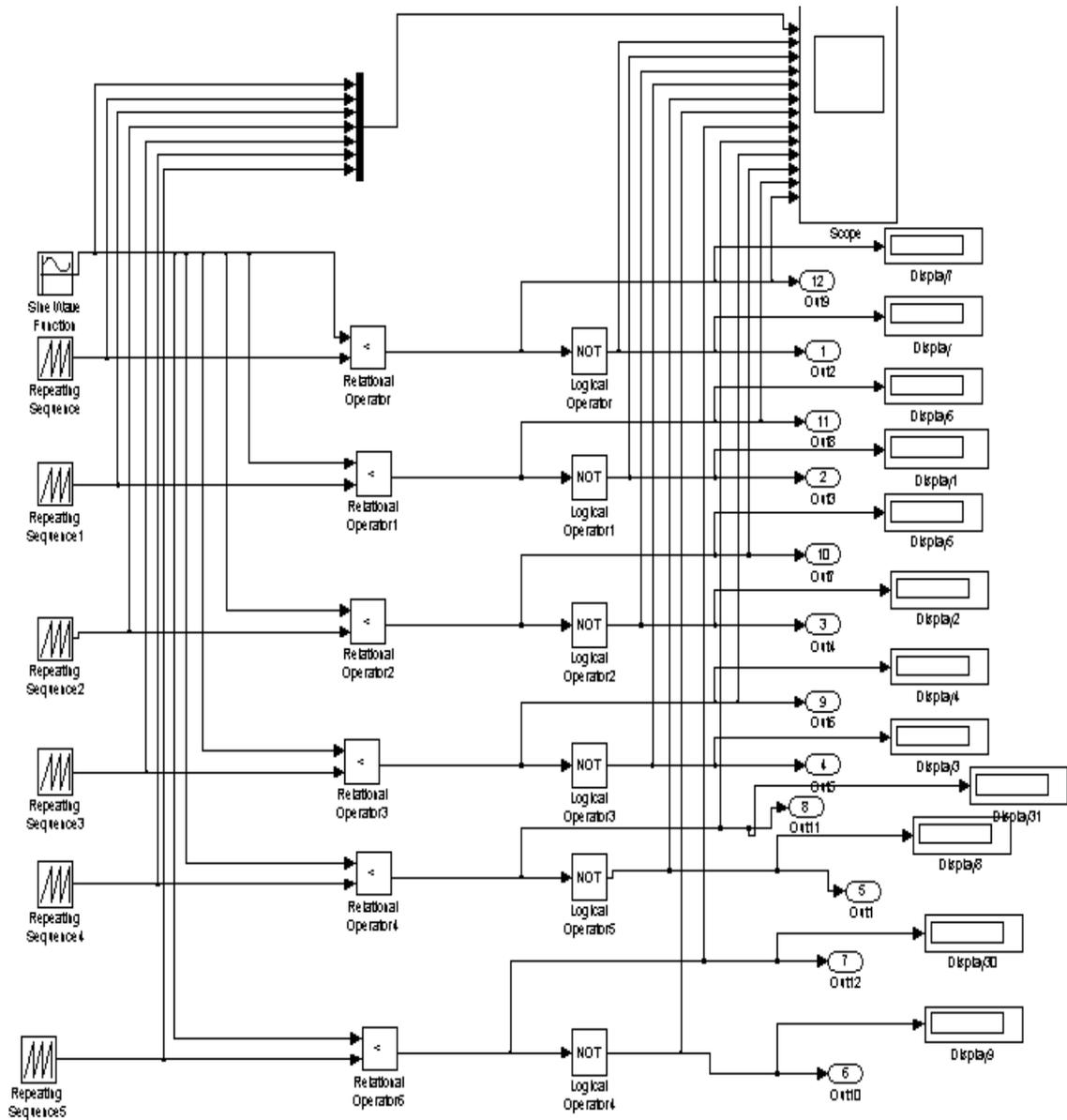


Figure II.27 Commande MLI de trois bras de l'onduleur NPC à 7 niveaux

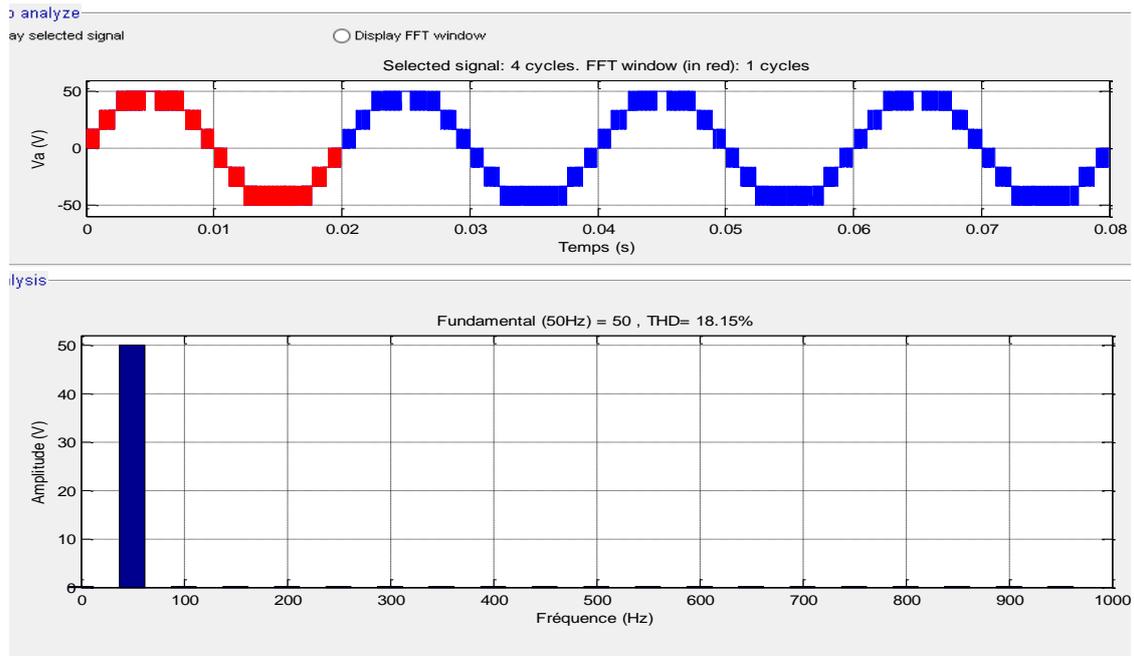


Figure II.28 forme d'onde de la tension simple de l'onduleur NPC 7 niveaux et spectre harmonique

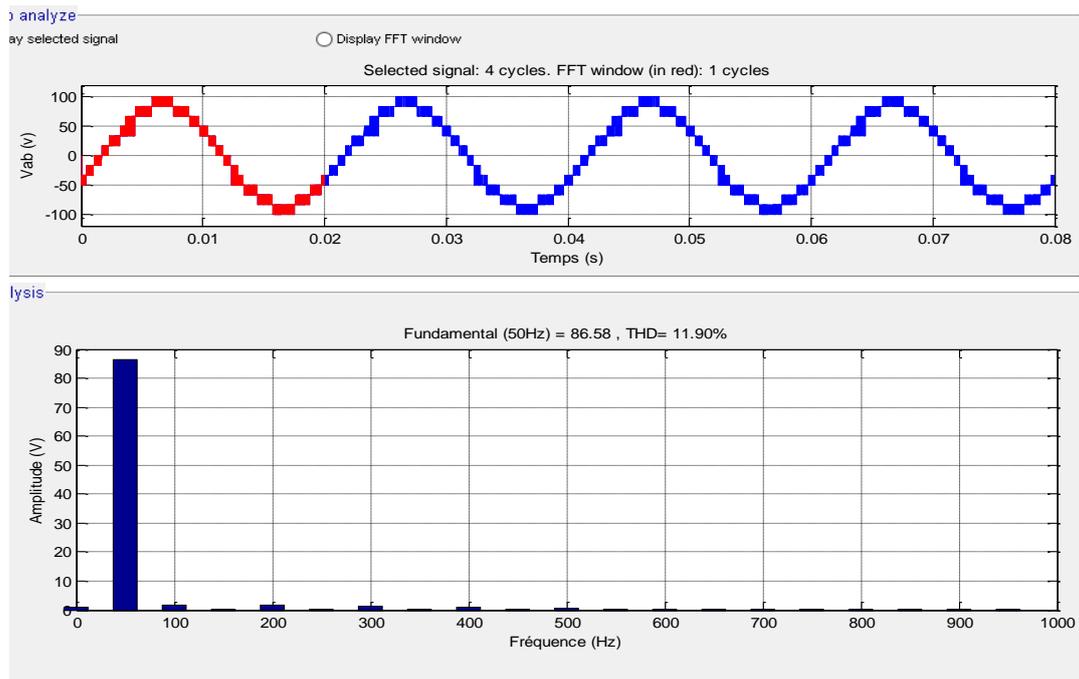


Figure II.29 forme d'onde de la tension composée de l'onduleur NPC 7 niveaux et spectre harmonique

II.3.3. Onduleur NPC à neuf niveaux

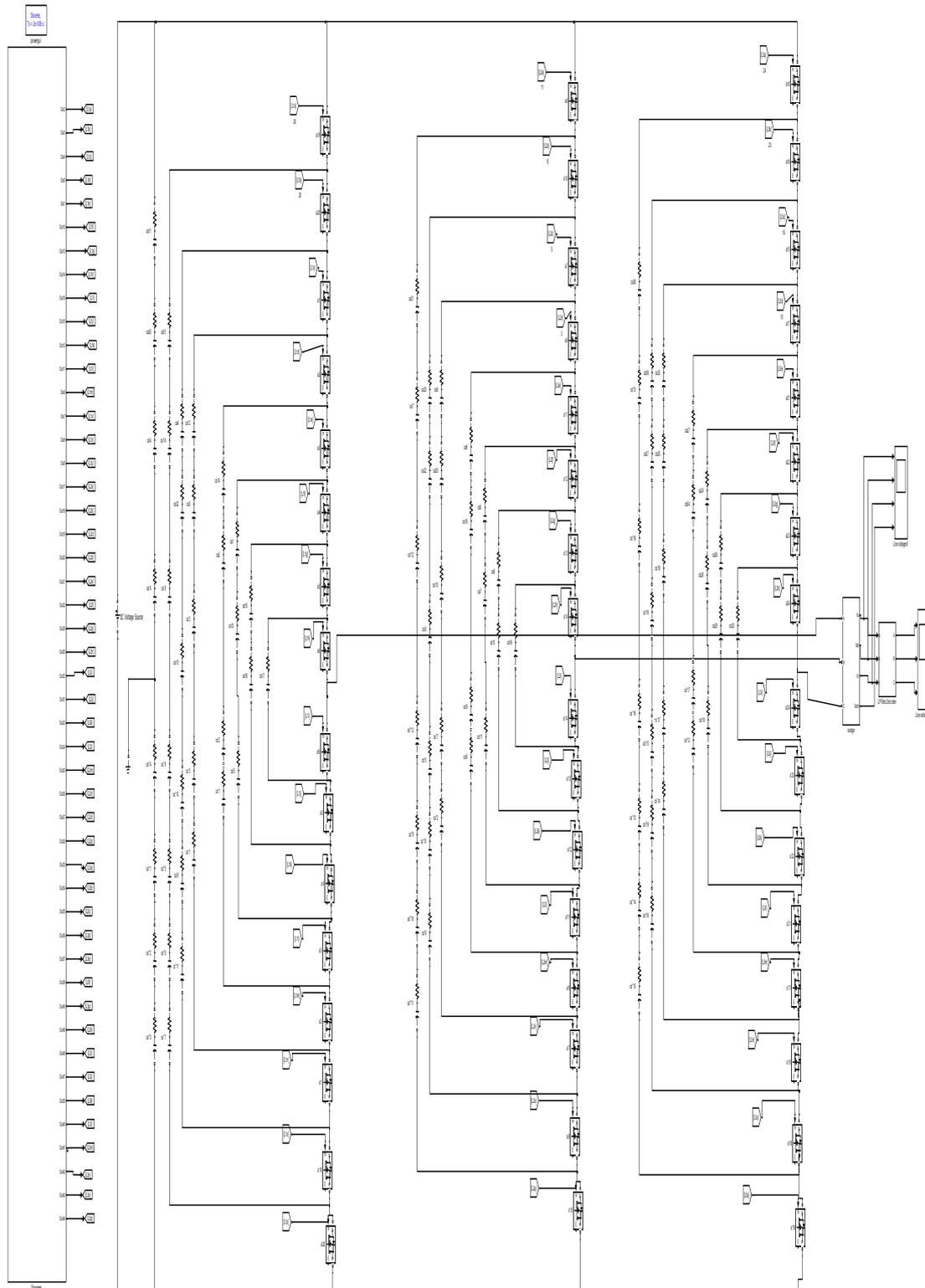


Figure II.30 Structure de puissance de l'onduleur à neuf niveaux de type NPC

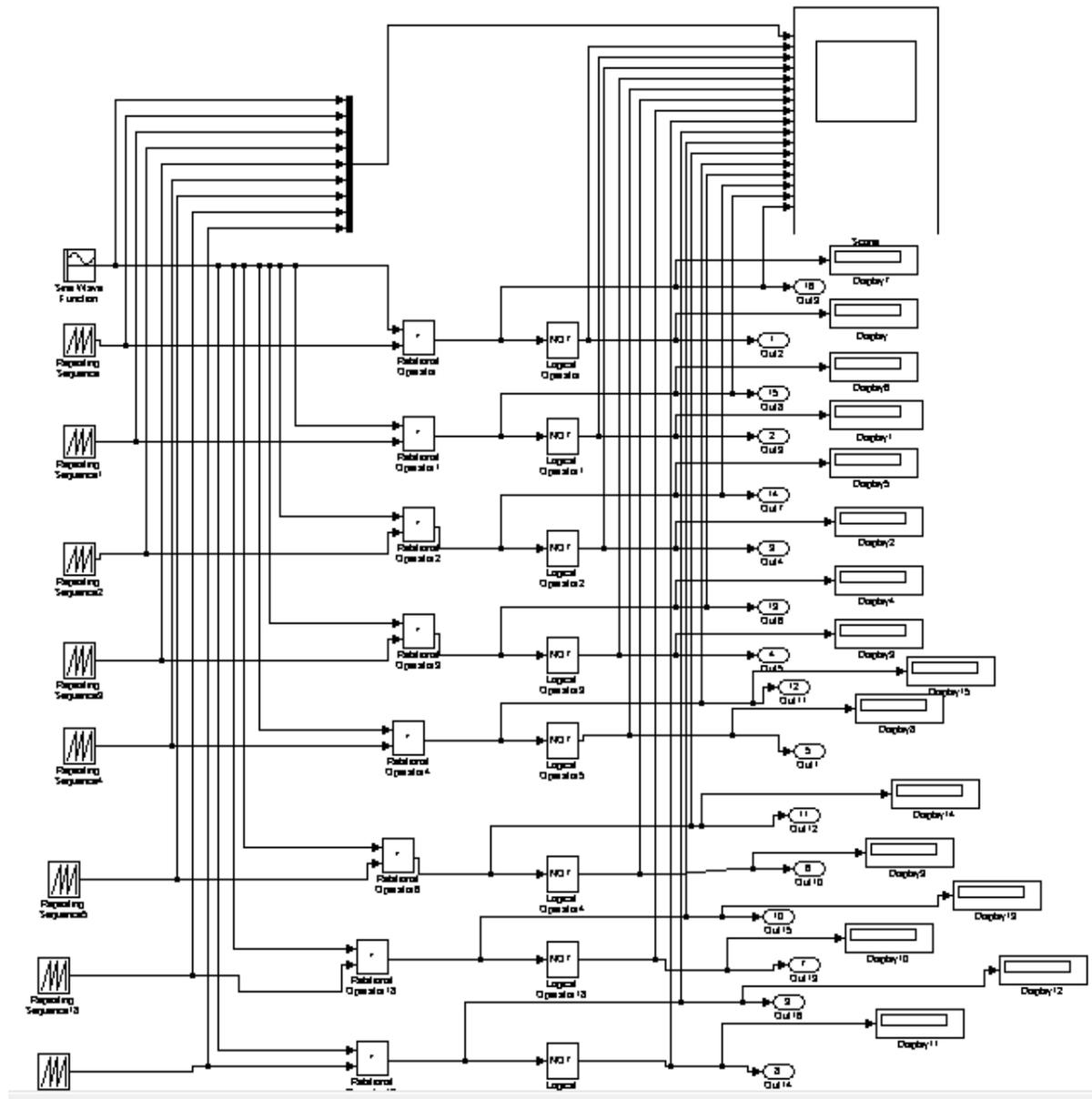


Figure II.31 Commande MLI de trois bras de l'onduleur NPC à 9 niveaux

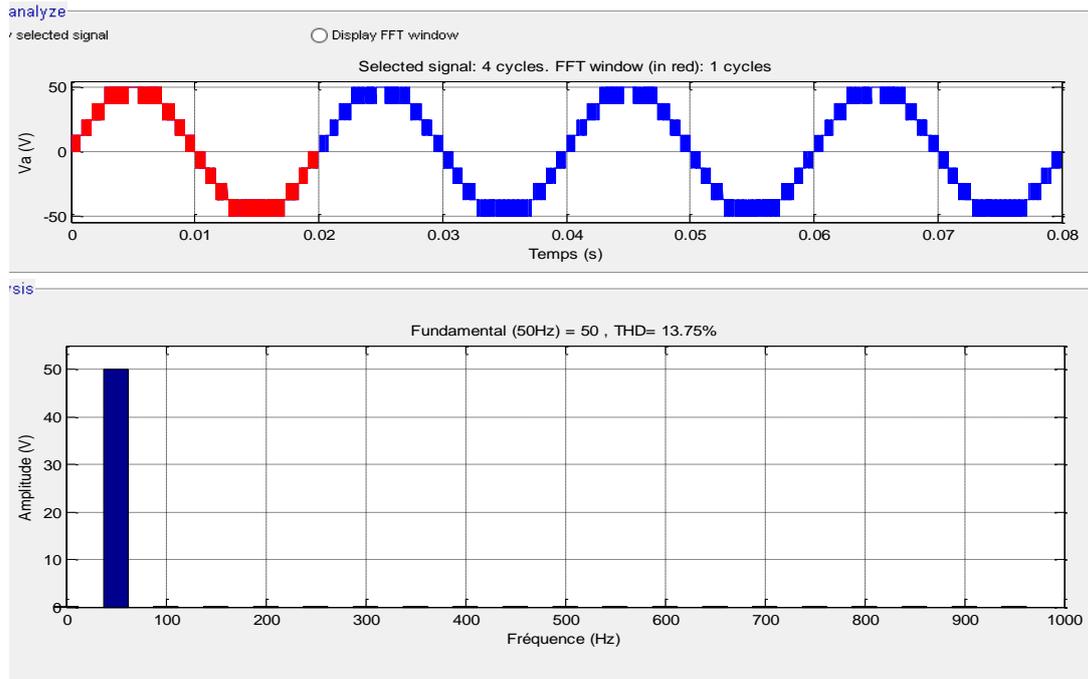


Figure II.32 forme d'onde de la tension simple de l'onduleur NPC 9 niveaux et spectre harmonique

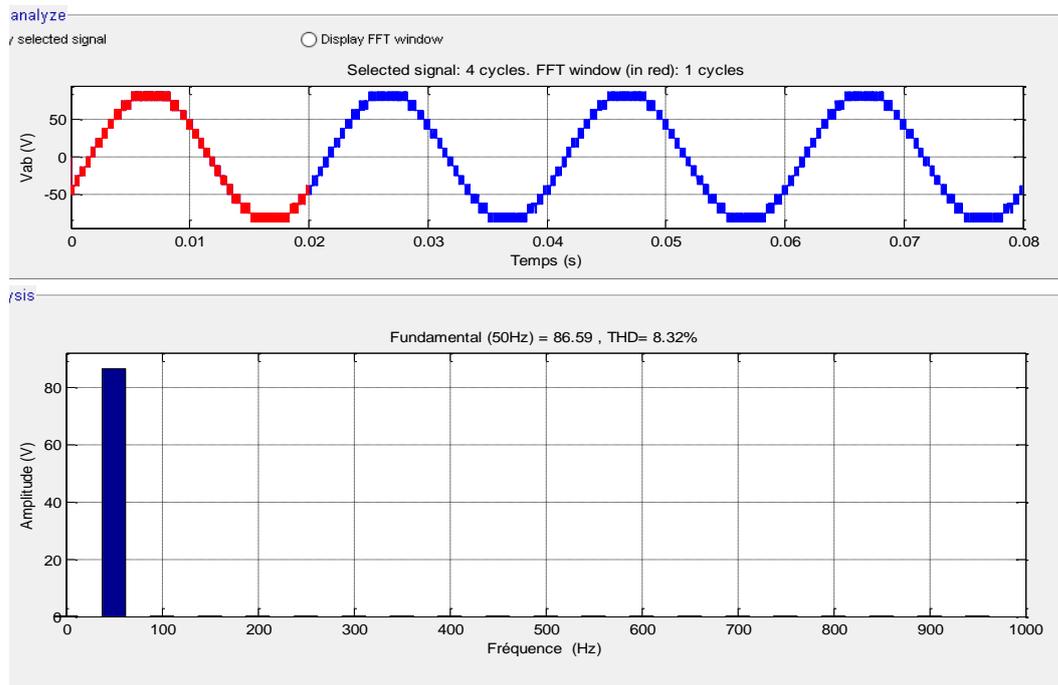


Figure II.33 forme d'onde de la tension composée de l'onduleur NPC 9 niveaux et spectre harmonique

Tableau II.4 Comparaison des résultats obtenus de l'onduleur NPC

Type	NPC			
	3	5	7	9
Niveaux				
THD Va(%)	53.74	26.35	18.15	13.75
THD V ab (%)	35.06	18.65	11.90	8.32
U _{1effs} Va (V)	48.87	49.99	50	50
U _{1effs} Vab(V)	86.35	90.07	86.58	86.59

II.4. Interprétations des Résultats

Les figures II.20 et II.25 montrent les signaux de nécessaires pour la génération d'une tension ayant trois (N=3) et cinq niveaux (N=5) d'un onduleur NPC, avec $m=21$ ($F_p = 1050$ Hz) et $r=1$.

Les figures II.18, II.23, II.28 et II.32 présentent les résultats de simulation des tensions simples de la phase A à la sorties de chaque onduleur et leurs spectre (3, 5,7 et 9 niveaux NPC)

Les figures II.19, II.24, II.29 et II.33 présentent les résultats de simulation des tensions composées de la phase A à la sorties de chaque onduleur et leurs spectre (3, 5,7 et 9 niveaux NPC)

De l'analyse des figures ainsi que du tableau II.4, il ressort que pour la stratégie NPC de l'onduleur multiniveaux :

- Nous avons obtenus un **THD = 53,74%** pour Va et **THD = 35,06%** pour Vab d'un onduleur NPC à trois niveaux on remarque que le taux d'harmonique est assez élevés.
- Nous avons obtenus un **THD = 26,35%** pour Va et **THD = 18,65%** pour Vab d'un onduleur NPC à cinq niveaux on remarque que le taux d'harmonique est inférieur à celui de l'onduleur 3 niveaux.
- Nous avons obtenus un **THD = 18,15%** pour Va et **THD = 11,90%** pour Vab d'un onduleur NPC à sept niveaux on remarque que le taux d'harmonique est inférieur à celui de l'onduleur 5 niveaux.
- Nous avons obtenus un **THD = 13,75%** pour Va et **THD = 8,32%** pour Vab d'un onduleur NPC à neuf niveaux on remarque que le taux d'harmonique est inférieur à celui de l'onduleur 7niveaux.

- Les composantes fondamentales des tensions de sortie sont identiques égale à **50V** pour V_a et **86V** pour V_{ab} .

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre on présentera la structure de l'onduleur 3, 5, 7 et neuf niveaux NPC et on élaborera du modèle on basant sur les fonctions de connexion.

Les interrupteurs de l'onduleur seront pilotés par la stratégie triangulo-sinusoidal (MLI) à multi porteuses.

On présentera aussi l'algorithme de cette stratégie de commande et on clôturera le chapitre par les résultats de simulation qui montrent les différentes formes de signaux

- Les séquences de commutations
- La commande d'un bras.
- Les tensions simples et leur spectre
- Les tensions composées et leur spectre

On a fait une étude comparative entres la qualité d'onde d'onduleur à 3, 5,7 et 9 niveaux de type NPC. L'étude spectrale a montré la supériorité de l'onduleur à 9 niveaux.

CHAPITRE III

ONDULEUR MULTINIVEAU CASCADE

III.1 introduction

Dans ce chapitre, nous allons effectuer des simulations sous (MATLAB/Simulink) de l'onduleur multiniveaux de type cascade (3, 5, 7 et 9 niveaux).

Ces simulations, nous permettent d'établir des comparaisons, surtout du point de vue THD des tensions simples et composées de la sortie de l'onduleur.

III.2. Onduleur cascade (H-Bridge)

III.2.1. Onduleur cascade à trois niveaux

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

- Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, les interrupteurs K_{11a} et $K_{12'a}$ sont bloqués et $K_{11'a}$, K_{12a} sont passants comme le montre

La figure III.1(b). La tension de sortie V_{a0} est: $V_{a0} = +E$. La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_{11a} , $K_{12'a}$ vaut $+E$

- Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Dans ce cas, les interrupteurs K_{11a} , K_{12a} sont bloqués et $K_{11'a}$, $K_{12'a}$ sont passants comme le montre la figure III.1(c). La tension de sortie V_{a0} est: $V_{a0} = 0$. La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_{11a} , K_{12a} vaut $+E$.

- Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K_{11a} , $K_{12'a}$ sont passants et $K_{11'a}$, K_{12a} sont bloqués comme le montre la figure III.1(a). La tension de sortie V_s est: $V_s = -E$. La tension inverse appliquée aux interrupteurs $K_{11'a}$, K_{12a} vaut $+E$

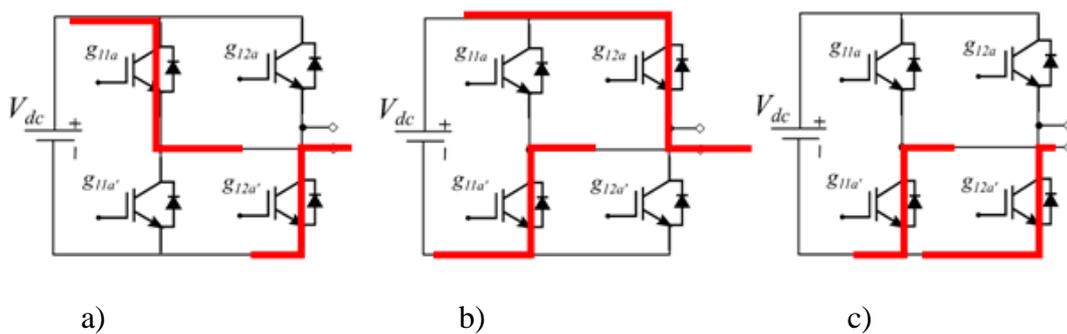


Figure III.1 Séquences de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux en Cascade

Les trois états de commutation possibles sont résumés au tableau III.1

Tableau III.1 États possibles de l'onduleur cascade à trois niveaux

Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Vs
1	0	0	1	E
0	0	1	1	0
0	1	1	0	-E

III.2.2. Onduleur cascade à cinq niveaux

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

- **Séquence 1:** K1, K4, K5, et K8 sont passants, et K2, K3, K6, et K7 sont bloqués. 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:** K1, K4, K6, et K8 sont passants et K2, K3, K5, et K7 sont bloqués, 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 :** K2, K4, K6, et K8 sont passants et K5, K7, K1, et K3, 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:** K2, K3, K6, et K8 sont passants et K1, K4, K5, et K7 sont bloqués, Dans ce cas, la tension de sortie est : $V_{ao} = -E$.
- **Séquence 5:** K2, K3, K6, et K7 sont passants et K1, K4, K5, et K8, sont bloqués, On a alors la tension de sortie $V_{ao} = -E - E = -2E$.

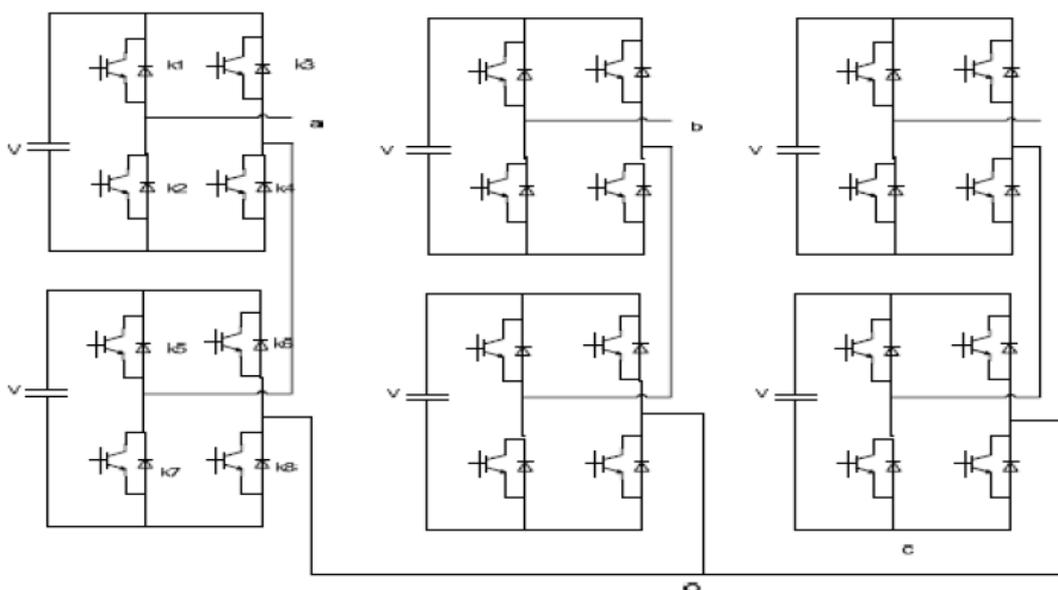


Figure III.2 Schéma d'un onduleur cascade en pont en H à cinq niveaux [18]

Tableau III.2 États possibles de l'onduleur cascade à trois niveaux

Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka5	Ka6	Ka7	Ka8	Va0
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

III.2.3. Onduleur cascade à N niveaux (cas générale)

La structure triphasée d'un convertisseur de type cascadié à N niveaux de tension est présentée à la figure III.3 Chaque phase du convertisseur est constituée de (N-1)/2 étages de ponts monophasés classiques, ces ponts sont montés en cascade de telle sorte que la tension de sortie de notre onduleur en cascade est la somme des tensions de sorties de chaque pont monophasé. Aussi, par phase nous avons 2(N - 1) interrupteurs commandés (N - 1)/2. Et sources continues.

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 $V_{ao} = (N - 1/2)E$ et le dernier niveau sera $V_{ao} = -(N - 1/2)E$

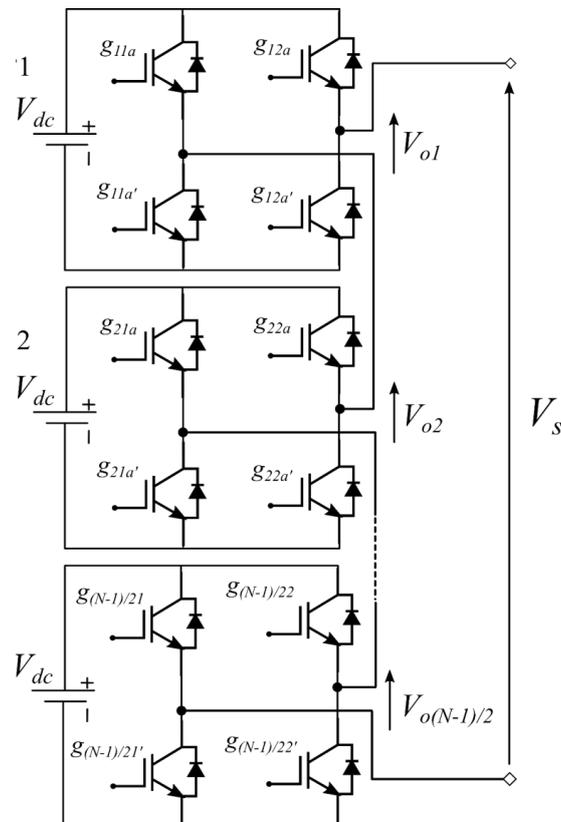


Figure III.3 Schéma d'un onduleur cascade à N niveaux

III.3. simulation Onduleur cascade (H-Bridge)

III.3.1. simulation Onduleur cascade à trois niveaux

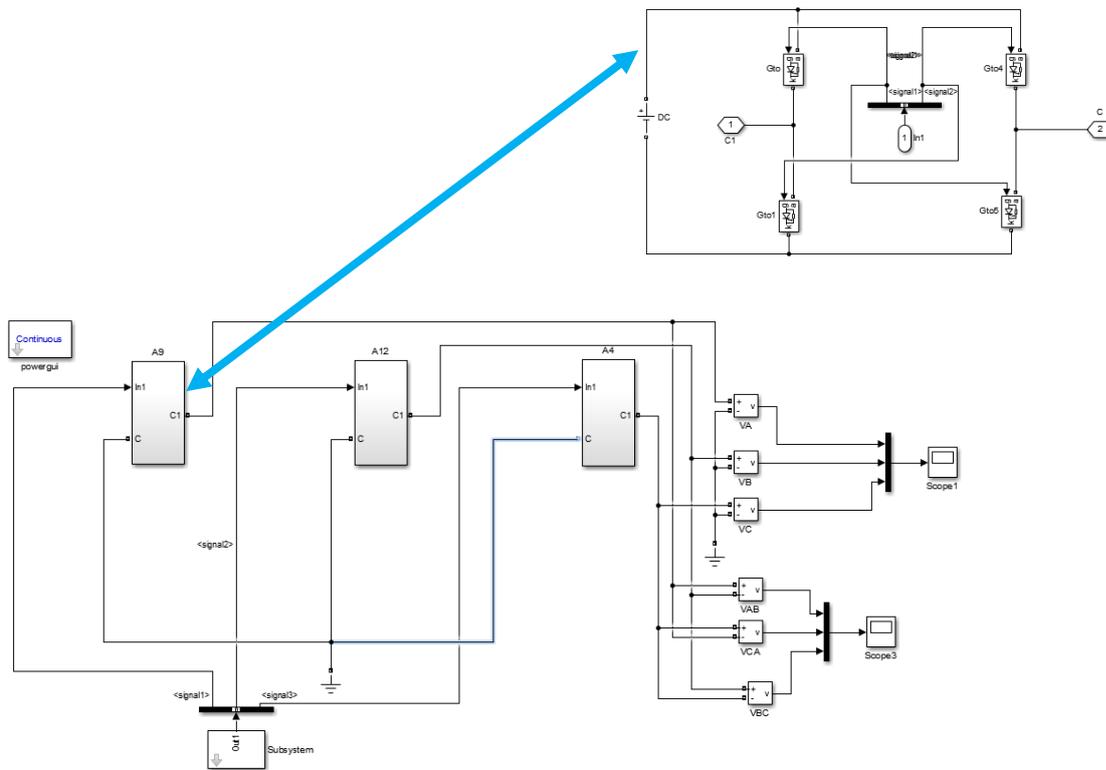


Figure III.4 Structure de puissance de l'onduleur à trois niveaux de type cascade

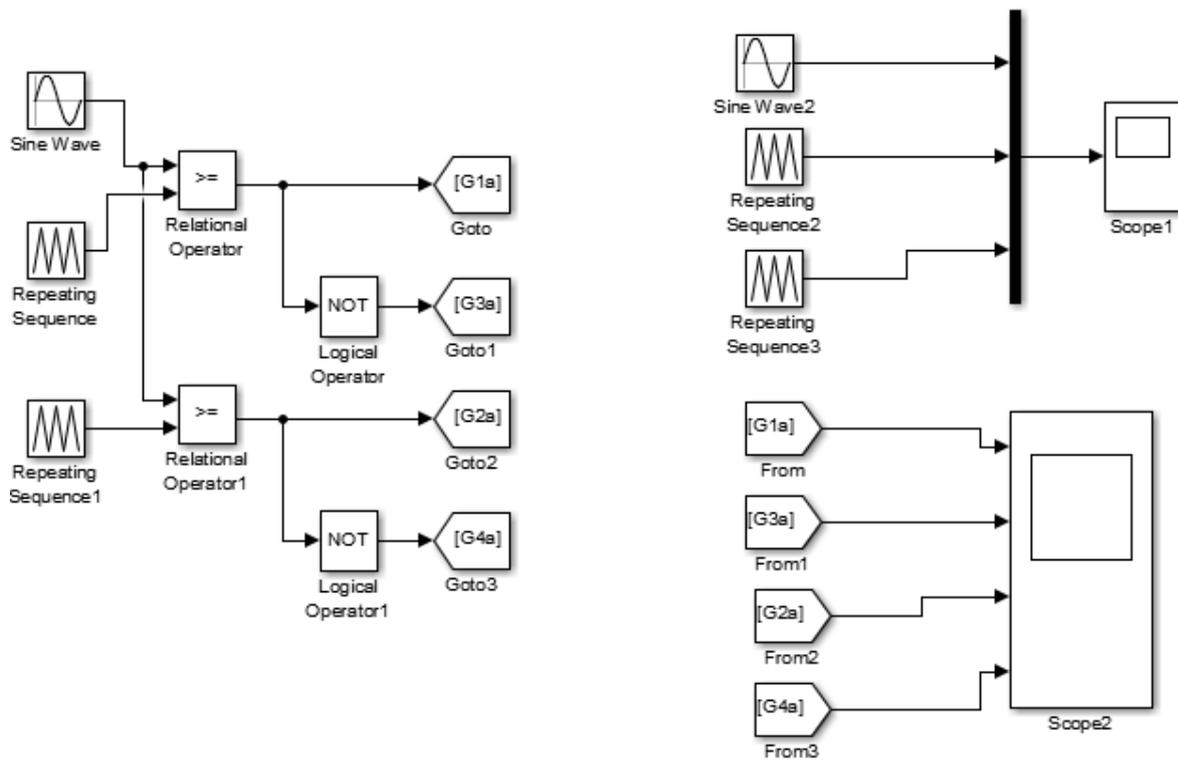


Figure III.5 Commande MLI d'un pont H de l'onduleur cascade à trois niveaux

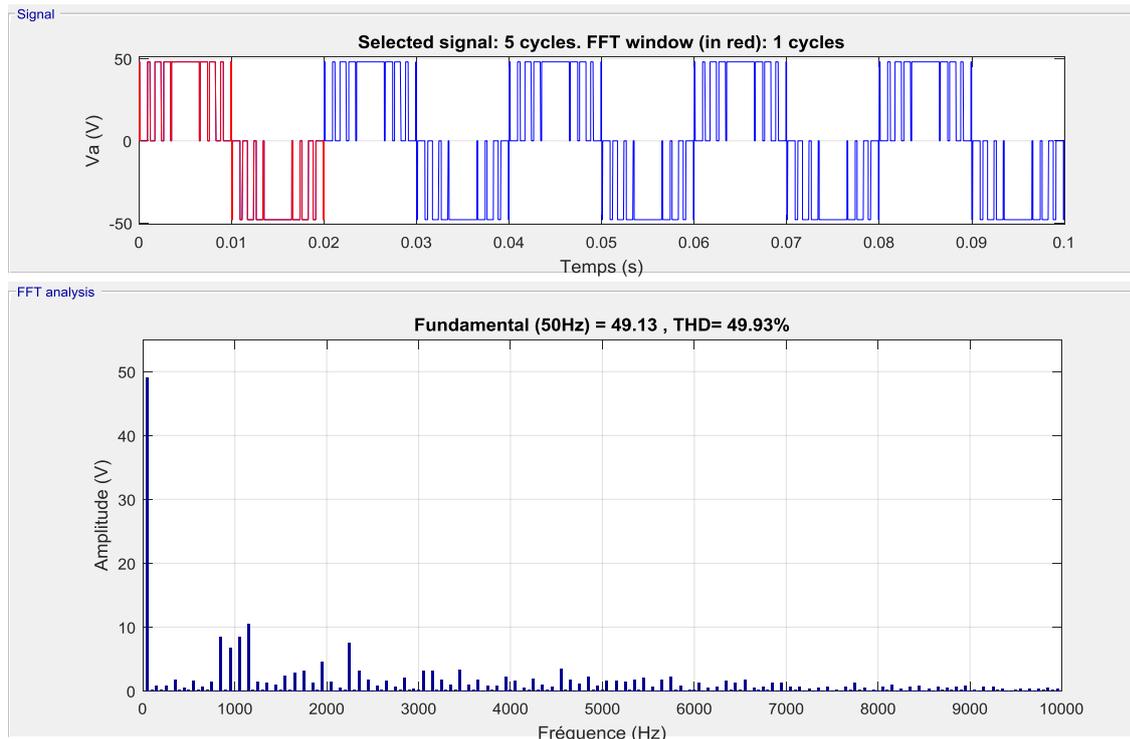


Figure III.6 forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade à trois niveaux et spectre harmonique

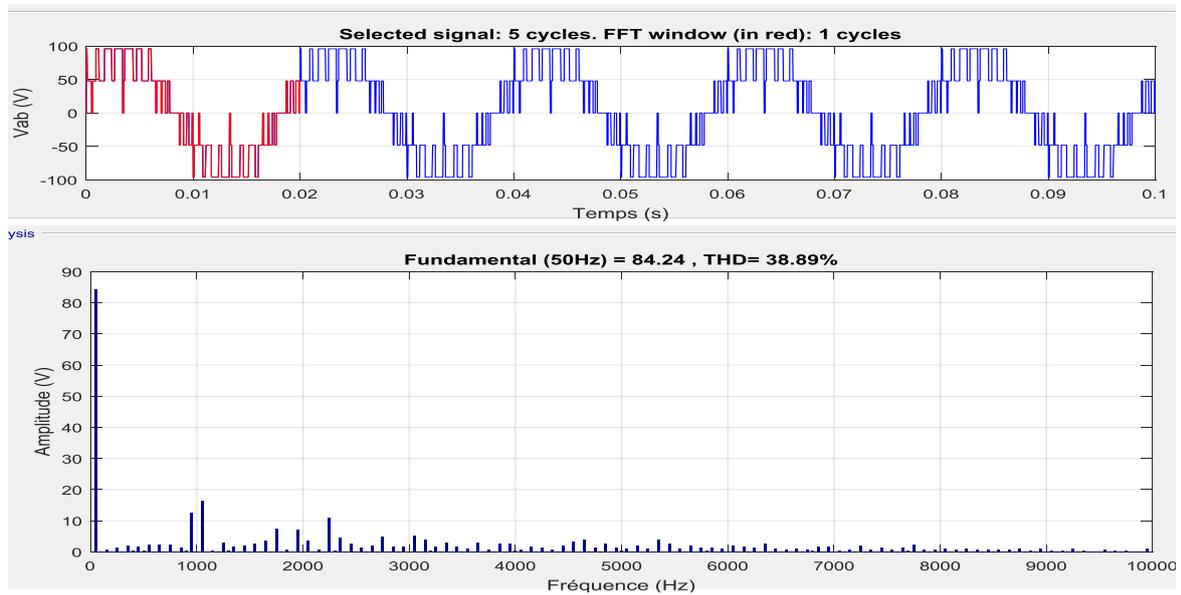


Figure III.7 forme d'onde de la tension composée de l'onduleur cascade à trois niveaux et spectre harmonique

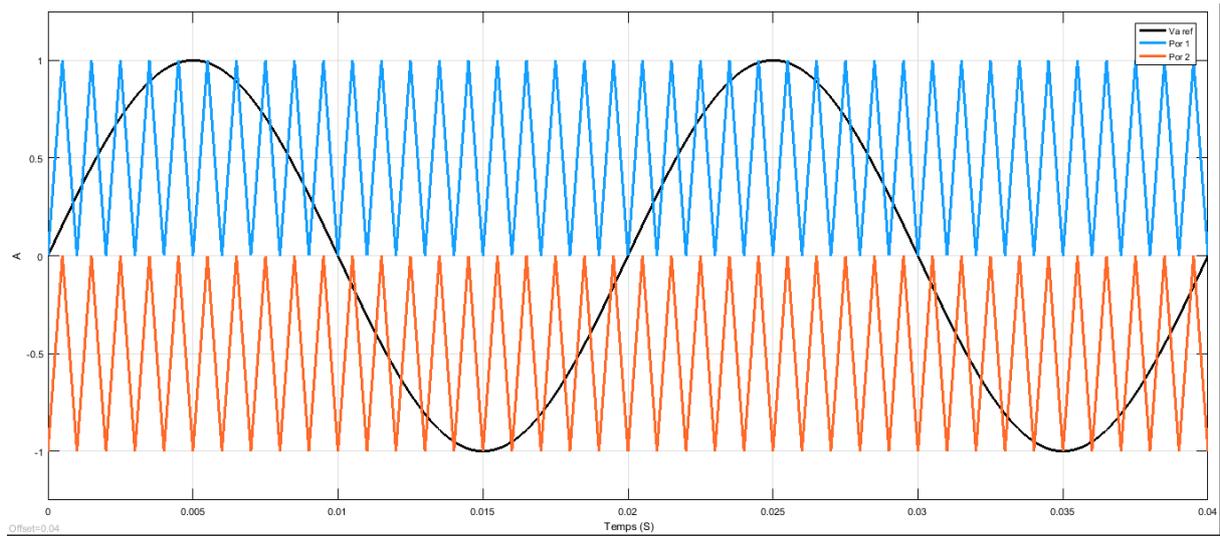


Figure III.8 MLI Onduleur cascade à trois niveaux

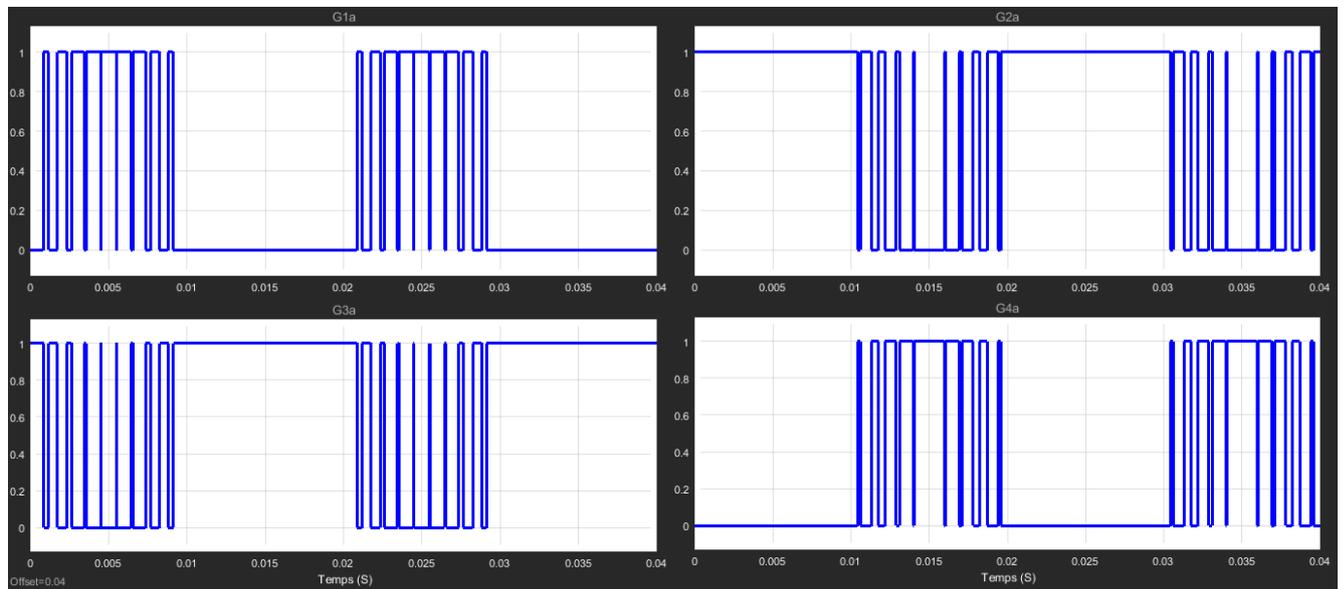


Figure III.9 Commandes des interrupteurs d'un onduleur cascade à trois niveaux

III.3.2. simulation Onduleur cascade à cinq niveaux

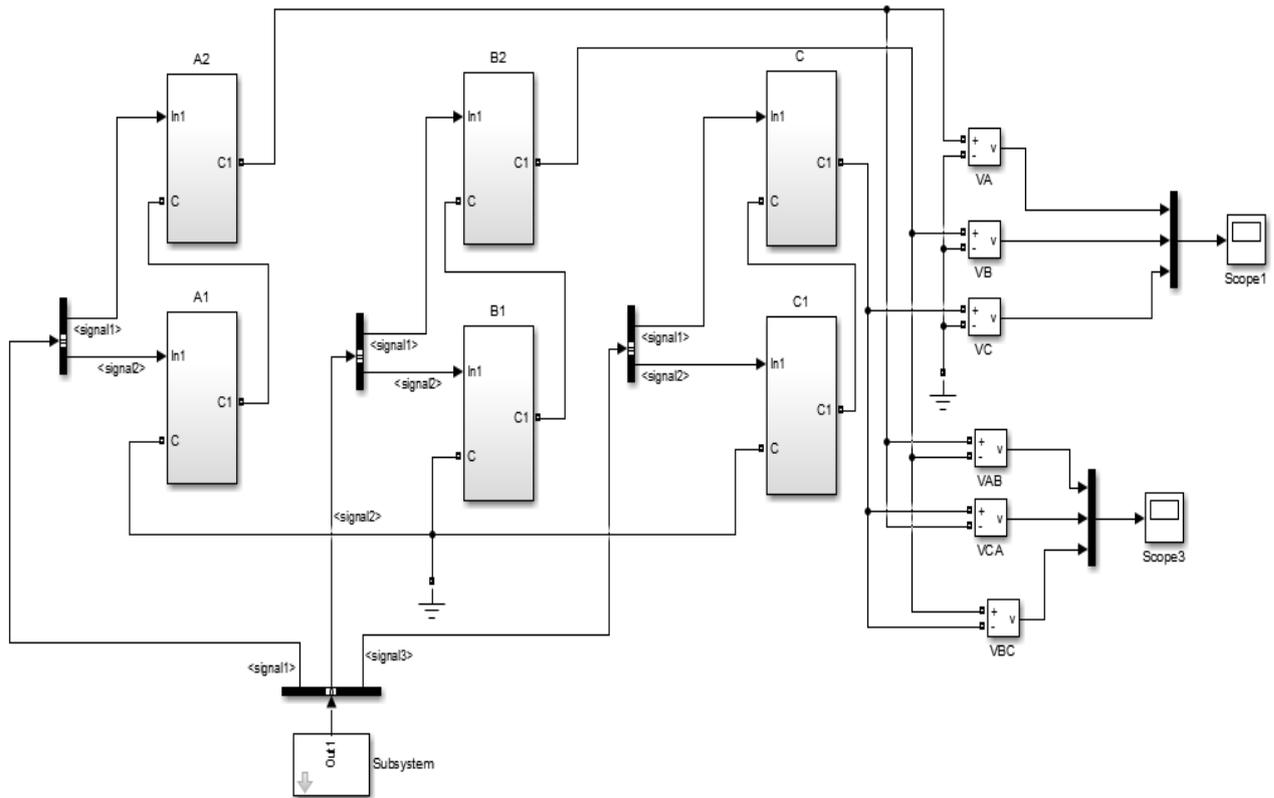


Figure III.10 Structure de puissance de l'onduleur à cinq niveaux de type cascade

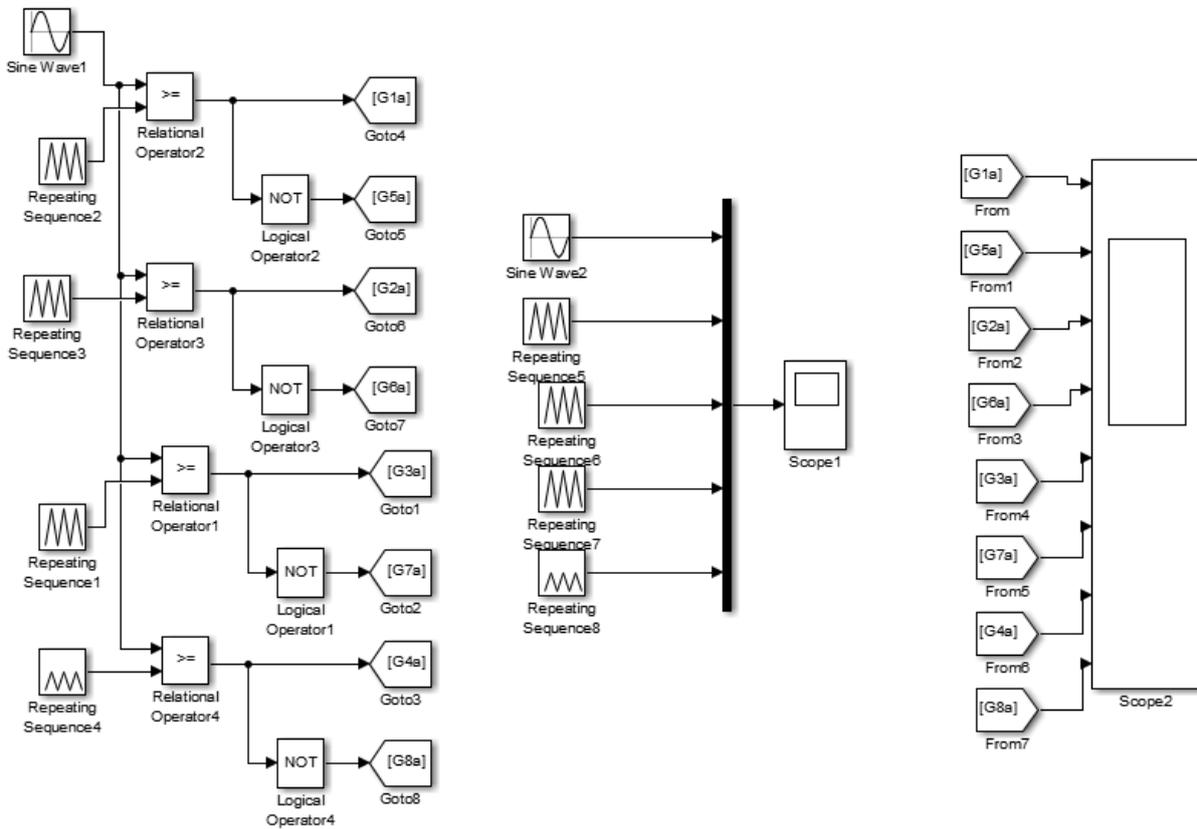


Figure III.11 Commande MLI d'un pont H de l'onduleur cascade à cinq niveaux

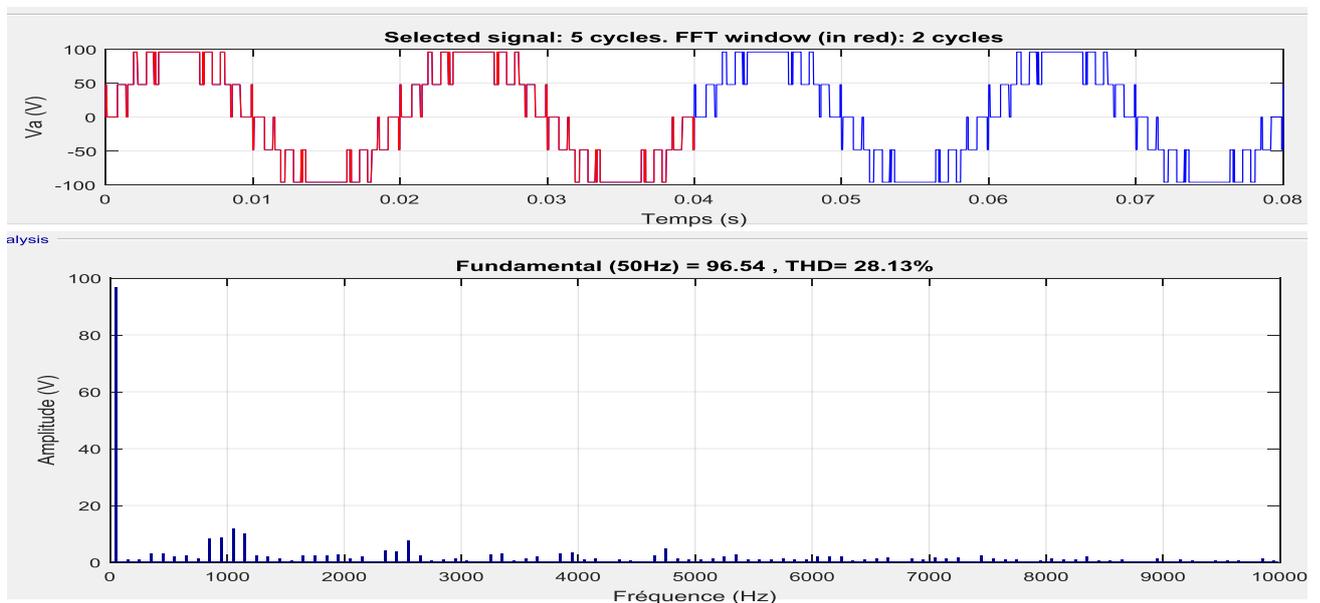


Figure III.12 forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade à cinq niveaux et spectre harmonique

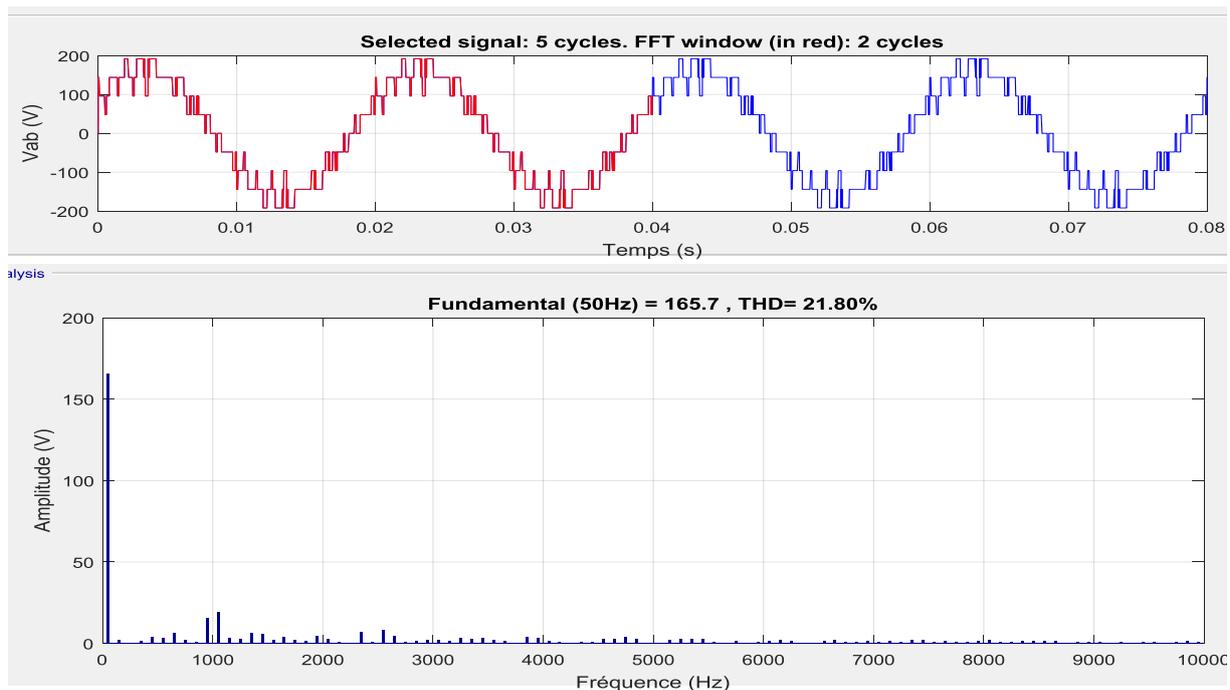


Figure III.13 forme d'onde de la tension composée de l'onduleur cascade à cinq niveaux et spectre harmonique

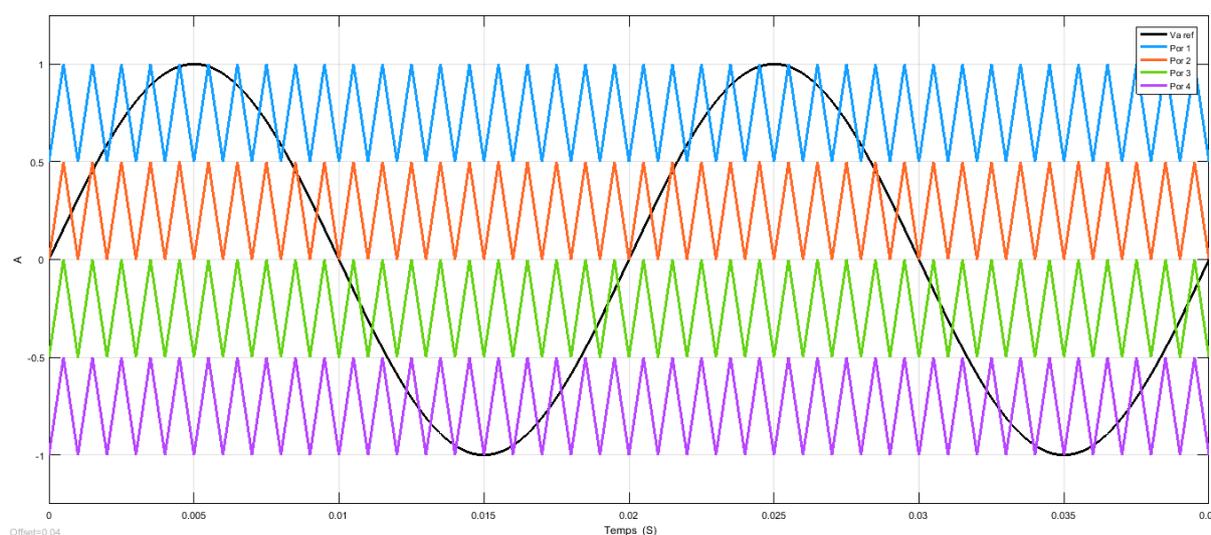


Figure III.14 MLI Onduleur cascade à cinq niveaux

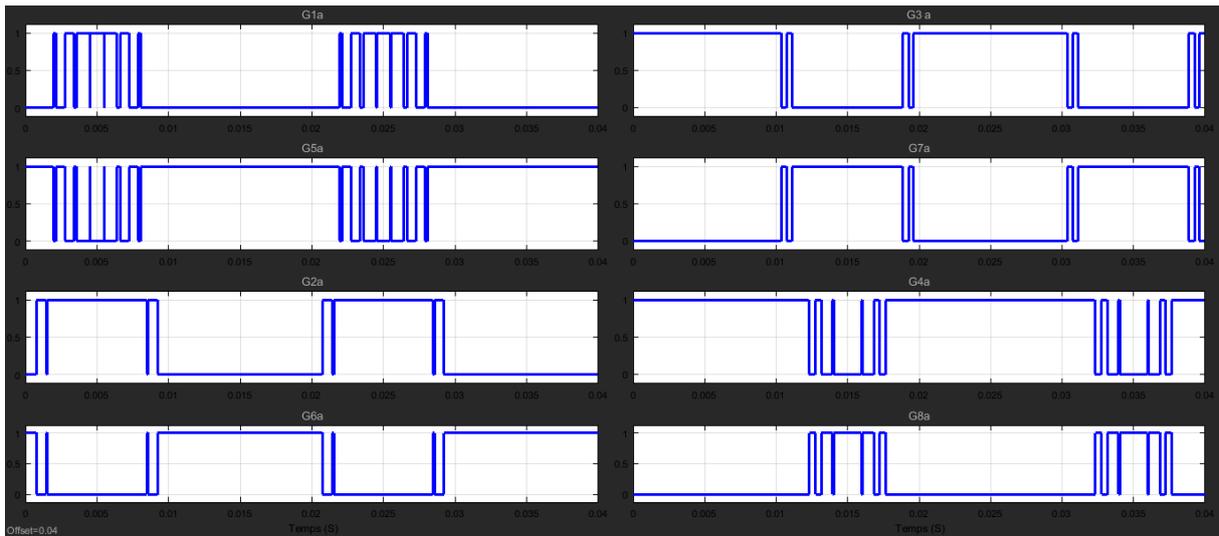


Figure III.15 Commandes des interrupteurs d'un onduleur cascade à 5 niveaux

III.3.3. simulation Onduleur cascade à sept niveaux

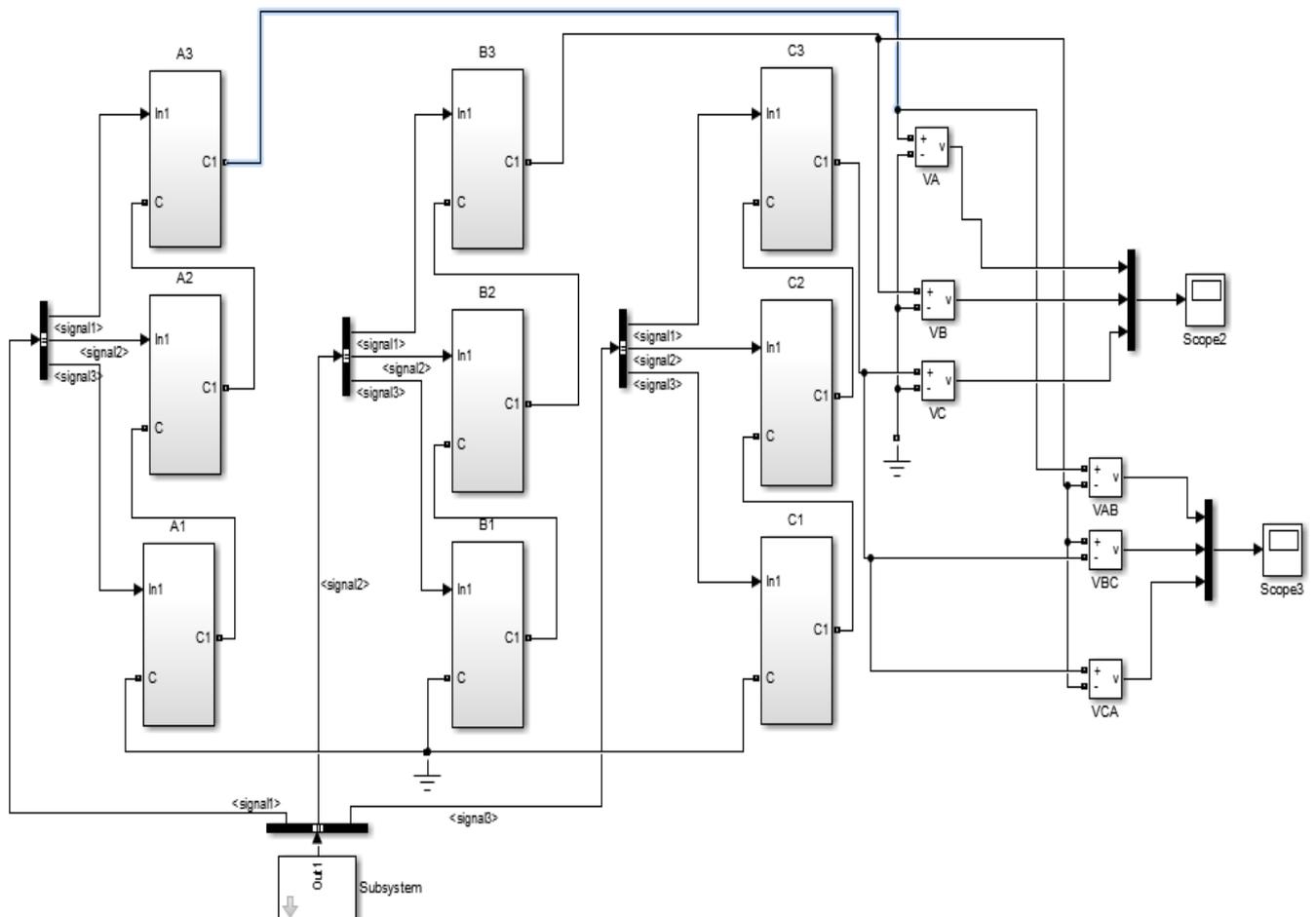


Figure III.16 Structure de puissance de l'onduleur à sept niveaux de type cascade

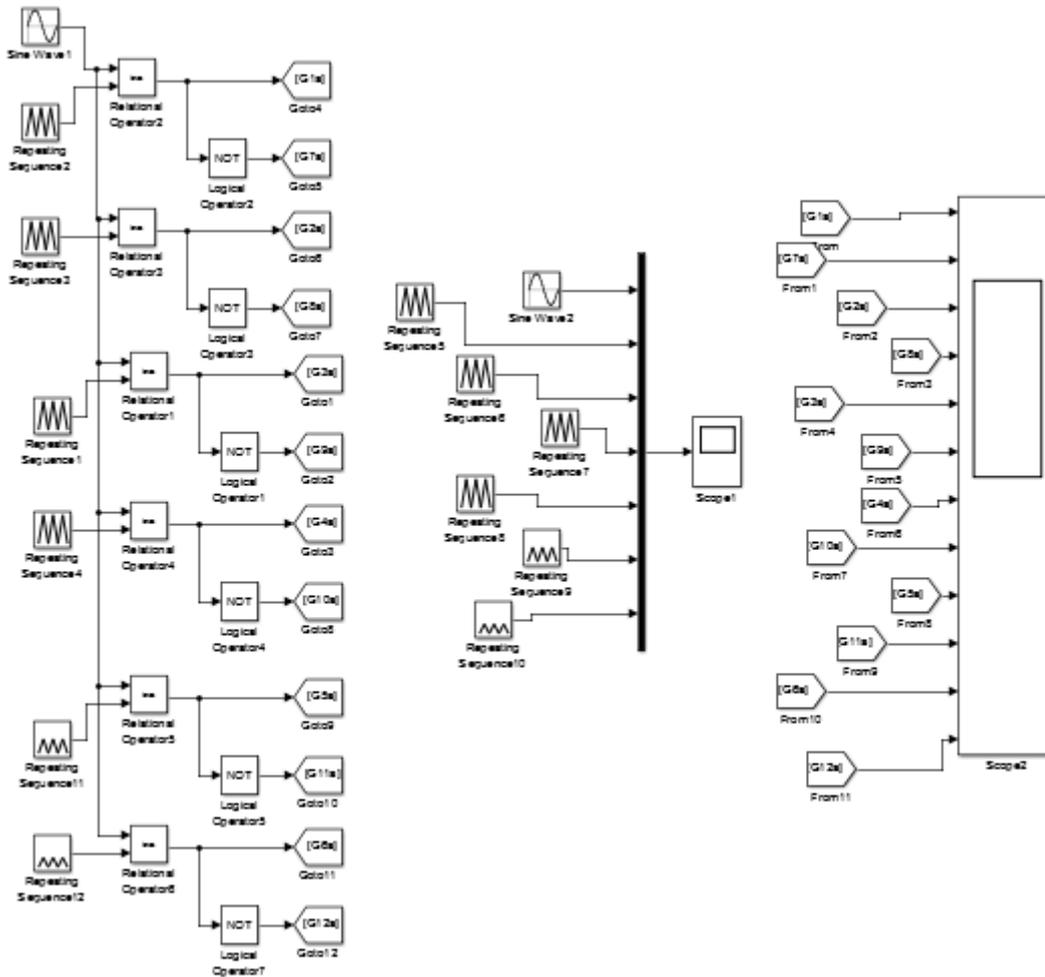


Figure III.17 Commande MLI d'un pont H de l'onduleur cascade à 7 niveaux

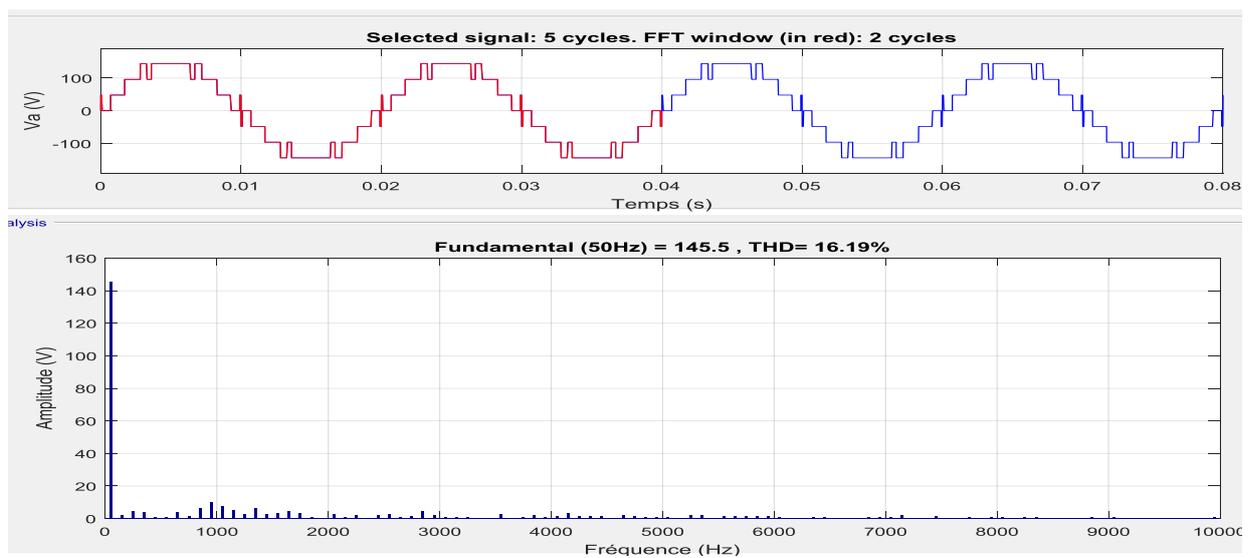


Figure III.18 forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade sept niveaux et spectre harmonique

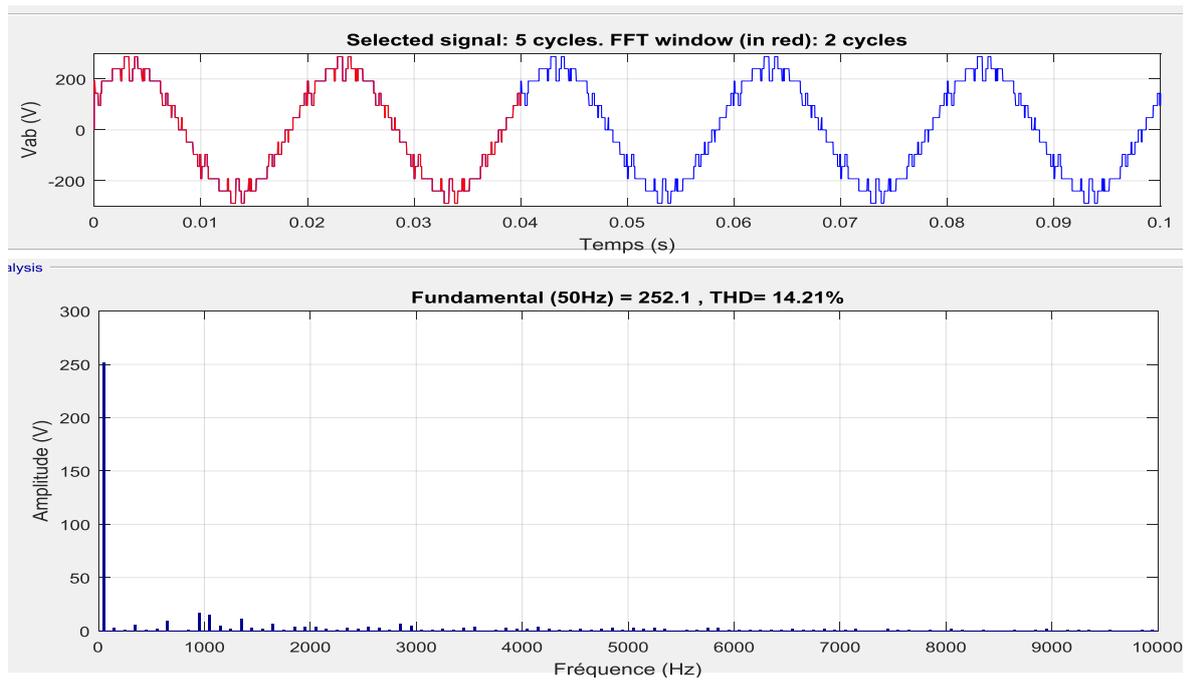


Figure III.19 forme d'onde de la tension composée de l'onduleur cascade à sept niveaux et spectre harmonique

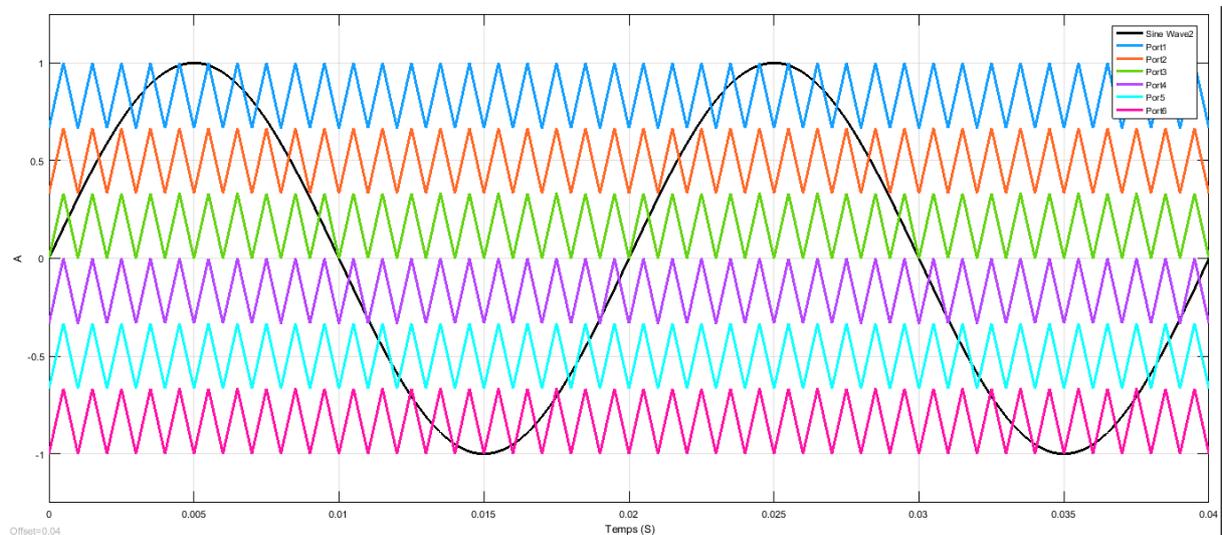


Figure III.20 MLI Onduleur cascade à sept niveaux

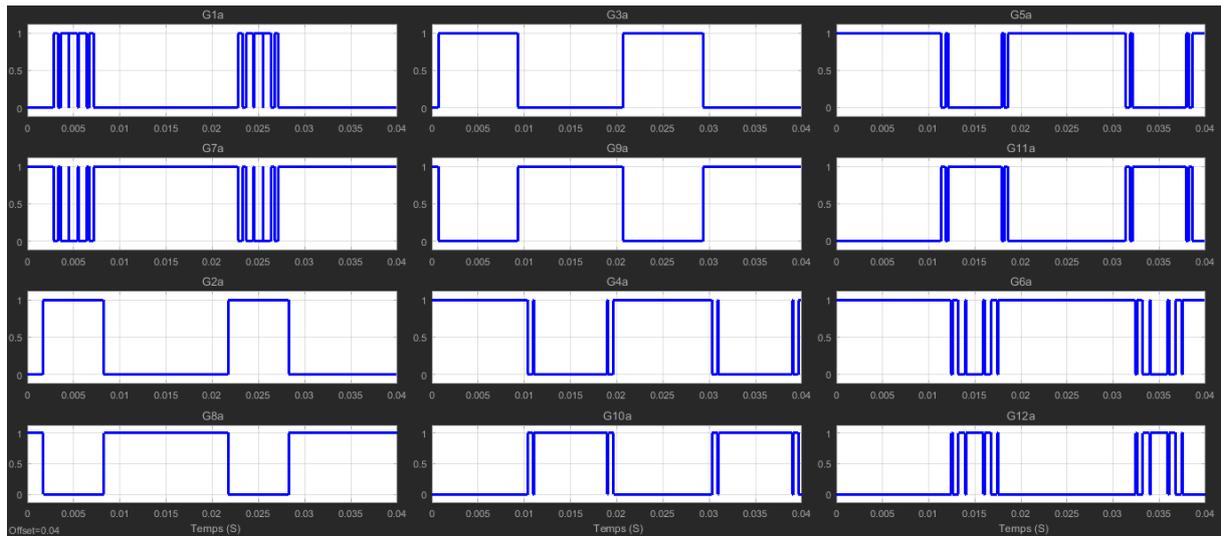


Figure III.21 Commandes des interrupteurs d'un onduleur cascade à sept niveaux

III.3.4. simulation Onduleur cascade à neuf niveaux

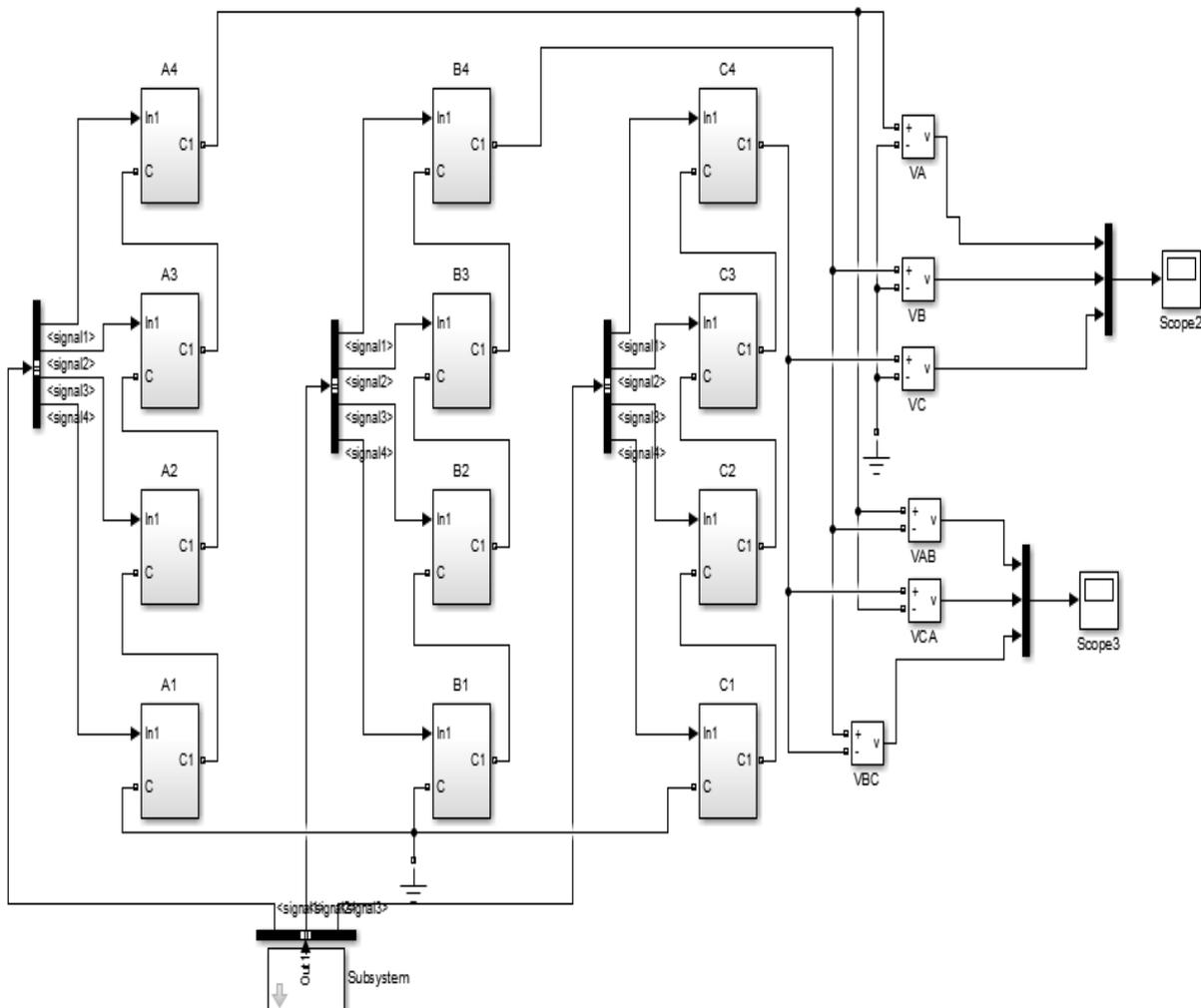


Figure III.22 Structure de puissance de l'onduleur à neuf niveaux de type cascade

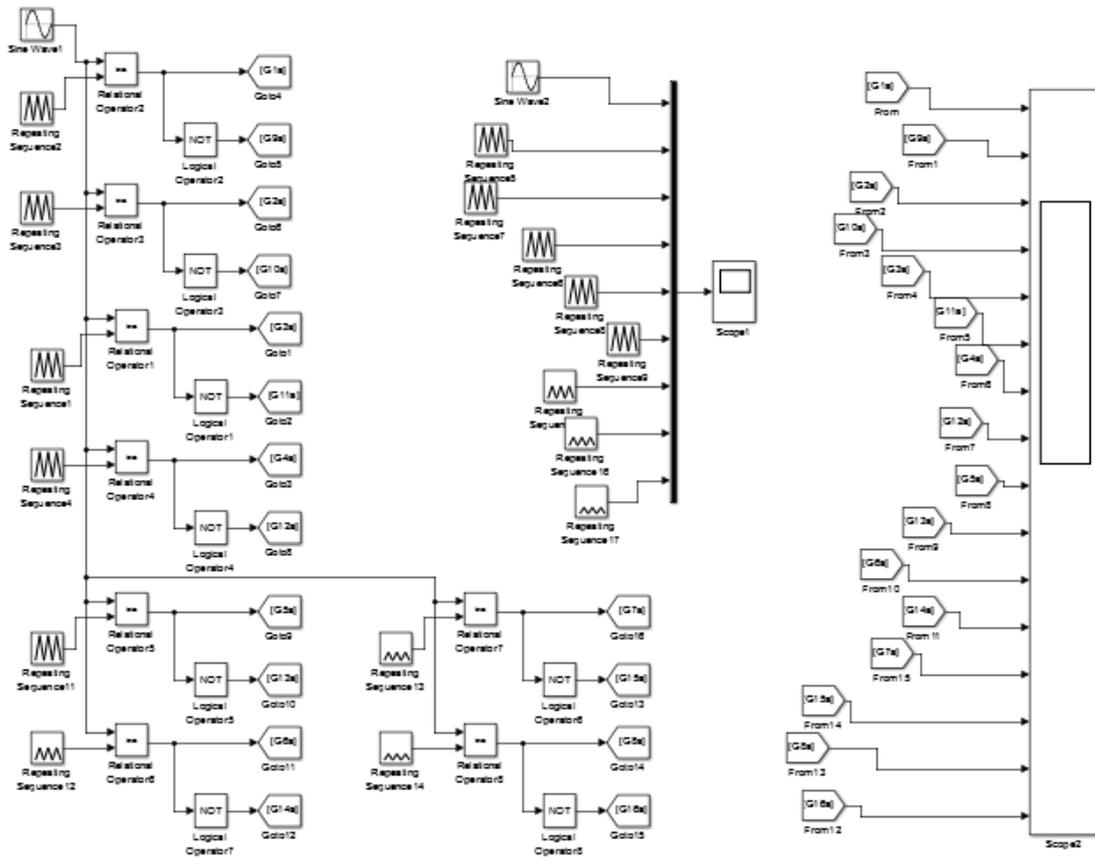


Figure III.23 Commande MLI d'un pont H de l'onduleur cascade à 9 niveaux

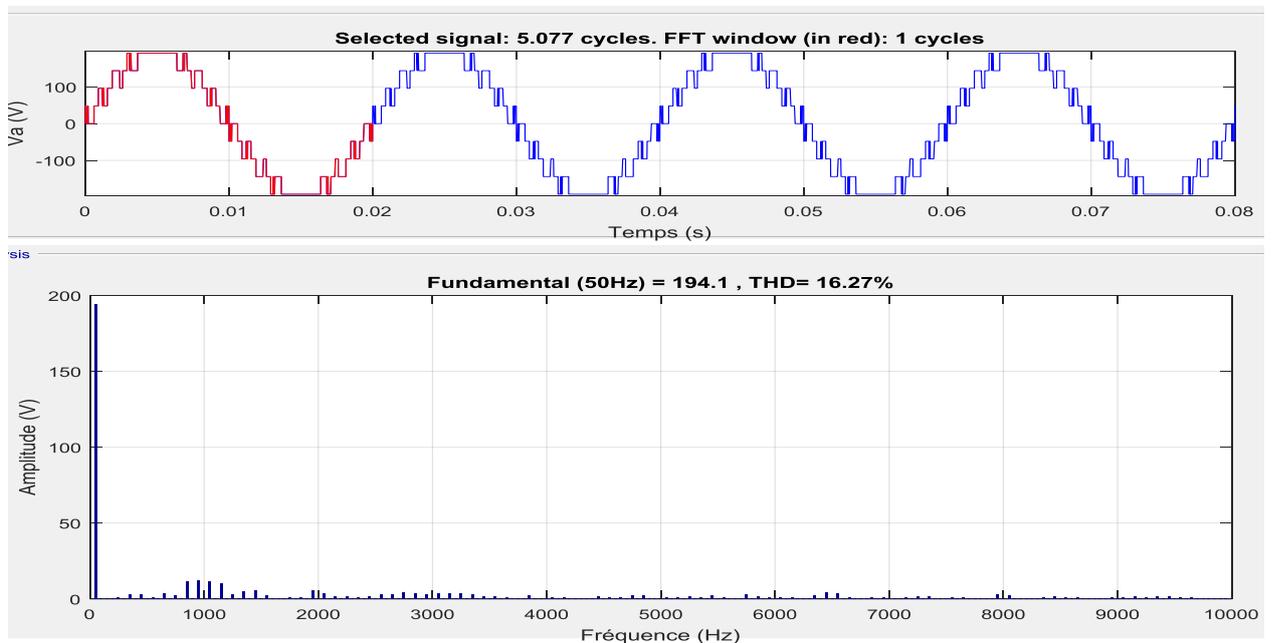


Figure III.24 forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade à 9 niveaux et spectre harmonique

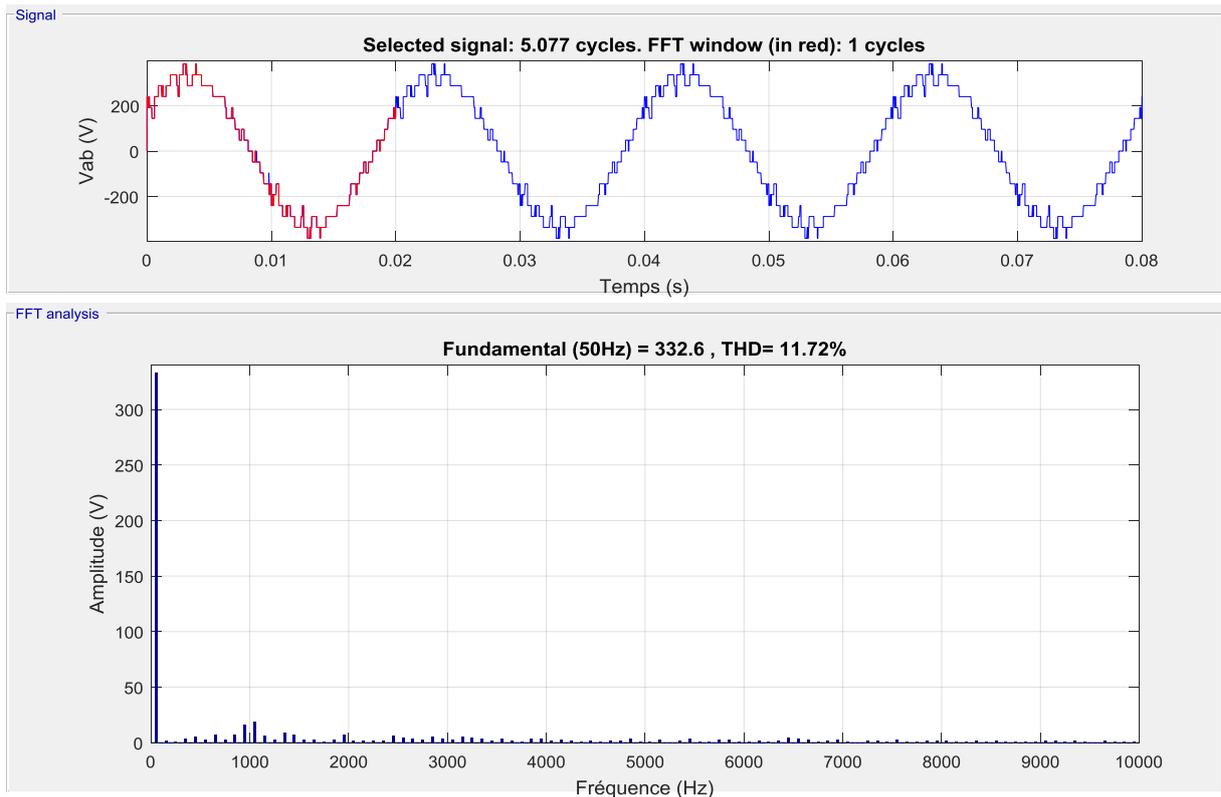


Figure III.25 forme d'onde de la tension composée de l'onduleur cascade 9 niveaux et spectre harmonique

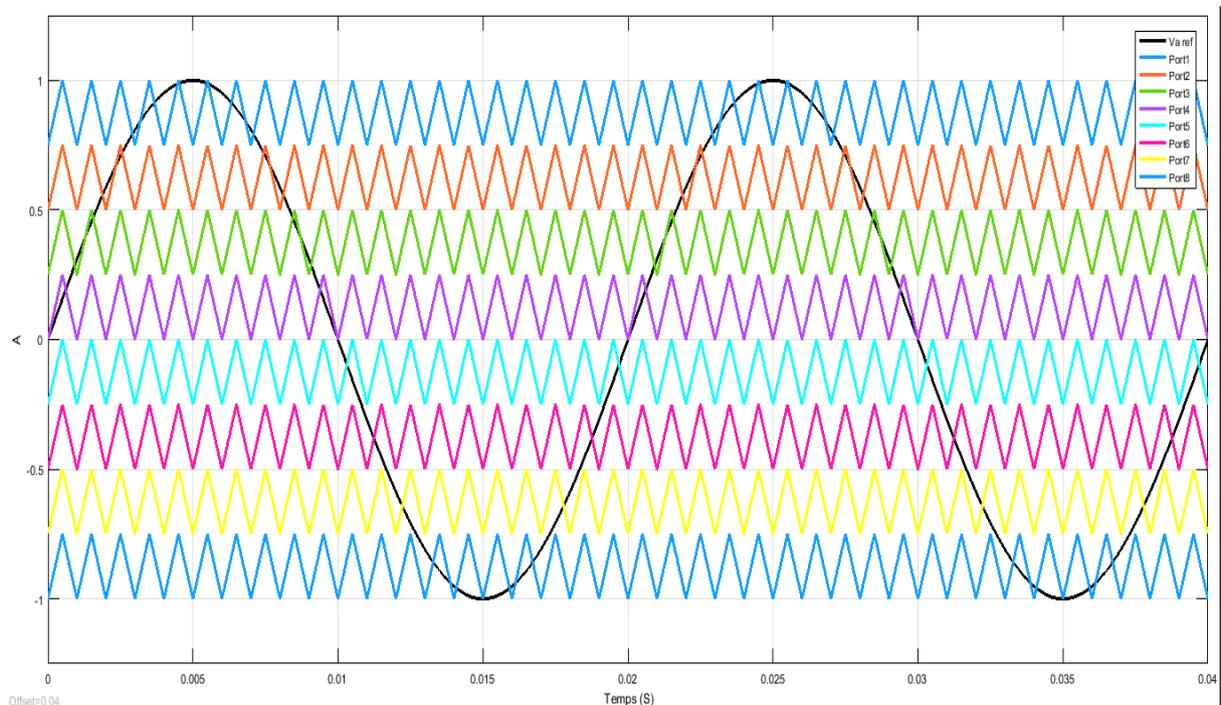


Figure III.26 MLI Onduleur cascade à neuf niveaux

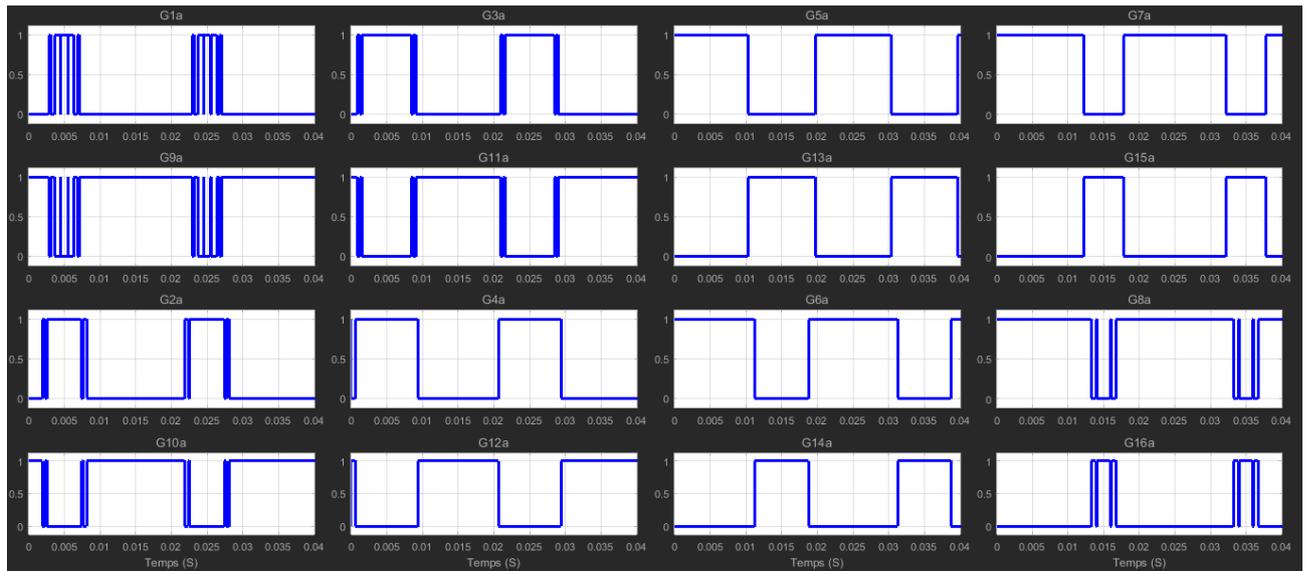


Figure III.27 Commandes des interrupteurs d'un onduleur cascade à 9 niveaux

Tableau III.3 comparaison des résultats obtenus de l'onduleur cascade

Type	Cascade			
	3	5	7	9
Niveaux				
THD V_a (%)	49.93	28.13	16.19	16.27
THD V_{ab} (%)	38.89	21.80	14.21	11.72
$U_{1effs} V_a$ (V)	49.13	96.54	145.5	194.1
$U_{1effs} V_{ab}$ (V)	84.24	165.7	252.1	332.6

III.4. Interprétations des Résultats

Les figures III.8, III.14, III.20 et III.26 montrent les signaux de nécessaires pour la génération d'une tension ayant (N=3, N=5, N=7 et N=9 niveaux) d'un onduleur en cascade, avec $m=21$ ($F_p = 1050$ Hz) et $r=1$.

Les figures III.6, III.12, III.18 et III.24 présentent les résultats de simulation des tensions simples de la phase A à la sorties de chaque onduleur et leurs spectre (3, 5,7 et 9 niveaux Cascade).

Les figures III.7, III.13, III.19 et III.25 présentent les résultats de simulation des tensions composées de la phase A à la sorties de chaque onduleur et leurs spectre (3, 5,7 et 9 niveaux Cascade).

De l'analyse des figures ainsi que du tableau III.3, il ressort que pour la stratégie NPC de l'onduleur multiniveaux :

- Nous avons obtenus un **THD = 49,93%** pour V_a et **THD = 38,89%** pour V_{ab} d'un onduleur Cascade à trois niveaux on remarque que le taux d'harmonique est assez élevés.
- Nous avons obtenus un **THD = 28,13%** pour V_a et **THD = 21,80%** pour V_{ab} d'un onduleur Cascade à cinq niveaux on remarque que le taux d'harmonique est inférieur à celui de l'onduleur 3 niveaux.
- Nous avons obtenus un **THD = 16,19%** pour V_a et **THD = 14,21%** pour V_{ab} d'un onduleur Cascade à sept niveaux on remarque que le taux d'harmonique est inférieur à celui de l'onduleur 5 niveaux.
- Nous avons obtenus un **THD = 16,27%** pour V_a et **THD = 11,72%** pour V_{ab} d'un onduleur Cascade à neuf niveaux on remarque que le taux d'harmonique est inférieur à celui de l'onduleur 7niveaux.
- La structure cascade 9 niveaux fournit un signal plus proche de la forme sinusoïdale que l'onduleur 3, 5 et 7.
- Les structures cascades 3, 5, 7 et 9 niveaux génèrent des tensions de valeur fondamentale **49,13 V, 96,54 V, 145,5 V et 194,1 V** pour V_a .
- Les structures cascades 3, 5, 7 et 9 niveaux génèrent des tensions de valeur fondamentale **84,24V, 165,7V, 252,1V et 332,6V V** pour V_{ab} .

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on présentera la structure de l'onduleur 3, 5, 7 et neuf niveaux Cascade et appliquer la stratégie de commande MLI. On présentera aussi l'algorithme de cette stratégie de commande et on clôturera le chapitre par les résultats de simulation qui montrent les différentes formes de signaux

- La structure de l'onduleur 3, 5, 7 et neuf niveaux.
- La commande d'un bras.
- Les tensions simples et leur spectre.
- Les tensions composées et leur spectre.

On a fait une étude comparative entres la qualité d'onde d'onduleur à 3, 5,7 et 9 niveaux de type Cascade. L'étude spectrale a montré la supériorité de l'onduleur à 9 niveaux.

CHAPITRE IV
SIMULATION DU SYSTÈME PV-ONDULEUR
MULTINIVEAU

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation d'un module PV et la simulation de l'onduleur multiniveaux intégré dans un système photovoltaïque. Les résultats de simulation sont présentés ainsi que l'analyse spectrale pour topologie cascade. L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink.

IV.2. modalisation d'un module photovoltaïque

IV.2.1. Modèle d'une cellule solaire idéal

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction p-n) [19].

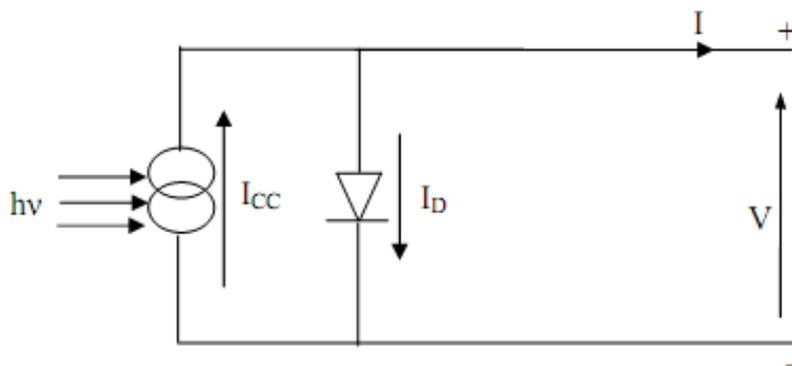


Figure IV.1 schéma d'une cellule solaire idéal [20]

I, V : Courant et tension fournis par la cellule

ID : Le courant traversant la diode

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \quad \text{IV.1}$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q.v}{a.K.T}} - 1 \right) \quad \text{IV.2}$$

IV.2.2. modèle d'une cellule solaire réel :

La figure suivante (Figure IV.2) représente le modèle électrique d'une cellule solaire qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une ou deux diodes en parallèle et une résistance série R_s . la première diode D1 décrit les propriétés de semi conducteur de la cellule et la seconde D2 modélise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge. Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante) [20].

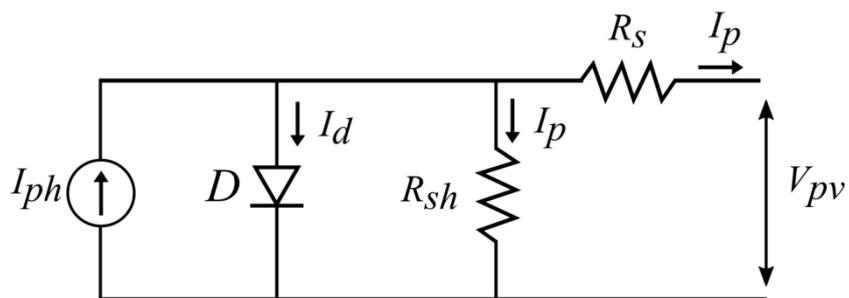


Figure IV.2 Schéma électrique équivalent d'une cellule PV

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_P \quad \text{IV.3}$$

Avec:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{q.v}{a.K.T}} - 1 \right) \quad \text{IV.4}$$

$$I_p = \frac{v + IR_S}{R_p} \quad \text{IV.5}$$

$$I_0 = I_{CC} / \left(e^{\frac{V_{Co}}{a.VT}} - 1 \right) \quad \text{IV.6}$$

$$I_{CC} = I_{CCR} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad \text{IV.7}$$

$$V_T = \frac{K_T}{q} \quad \text{IV.8}$$

Donc Le courant fourni par la cellule est donné par la relation :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V_{pv} + R_S \cdot I_{pv})}{a.K.T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_S \cdot I_{pv}}{R_{Sh}} \quad \text{IV.9}$$

a : le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < a < 3$).

I_{ph} : photo-courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I_0 : courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction p - n de la cellule.

R_{sh} : résistances shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

R_s : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi conducteur, ainsi les résistances ohmique et de contact au niveau des connections des cellules.

q : la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

K : constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

T_c : température de jonction (K)

La photopile réelle à une résistance série R_s dont l'influence est plus forte lorsque l'appareil fonctionne dans la région de source de tension, et une résistance parallèle R_p ayant une influence plus grande dans la région de fonctionnement en source de courant.

Dans les modèles photovoltaïques, on suppose généralement que $I_{ph} = I_{cc}$ parce que dans la photopile réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée [22].

IV.3. Paramètres du module

Tableau IV.1 Caractéristiques du module 1Soltech 1STH-215-PBP.

Grandeurs	Valeur
Puissance Max	213.15 w
Tension de circuit ouvert (V_{co})	36.3 V
Tension au MPP (V_{mp})	29 V
Courant au MPP (I_{mp})	7.35 A
Courant de court-circuit (I_{sc})	7.84 A
Coefficient de sensibilité de la tension à la temperature	-0.36009 (%/deg.C)
Coefficient de sensibilité de l'intensité à la temperature	0.102 (%/deg.C)
Nombre de cellules en série (N_s)	60

IV.4. Caractéristiques I-V et P-V

- **Caractéristiques I-V et P-V d'un module PV :**

La figure suivante présente les caractéristiques I-V et P-V d'un module PV pour différentes valeurs d'éclairement.

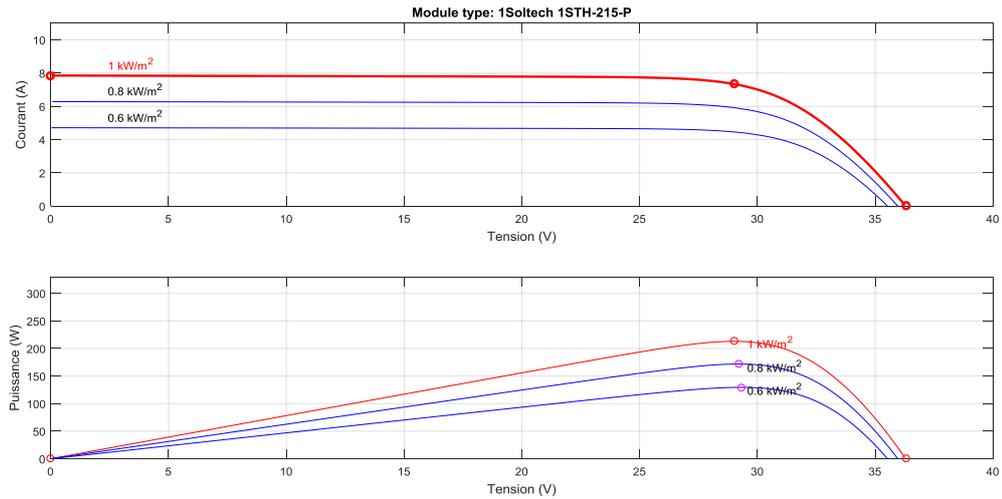


Figure IV.3 Caractéristique I-V et P-V d'un module PV

La figure suivante présente les caractéristiques I-V et P-V d'un module PV pour différentes valeurs de température.

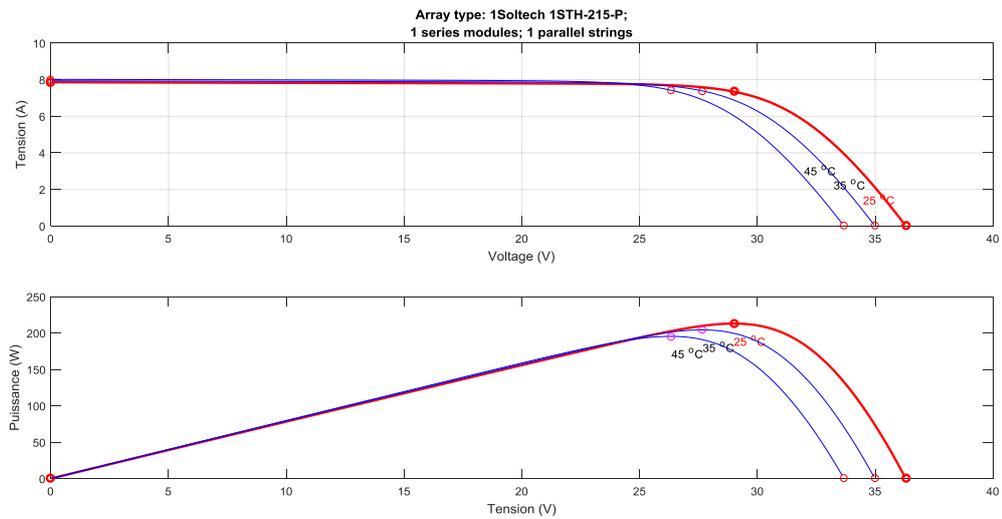


Figure IV.4 Caractéristique I-V et P-V d'un module PV

- **Caractéristiques I-V et P-V d'un générateurs PV (3 modules en séries) :**

La figure suivante présente les caractéristiques I-V et P-V d'un générateurs PV pour différentes valeurs d'éclairement.

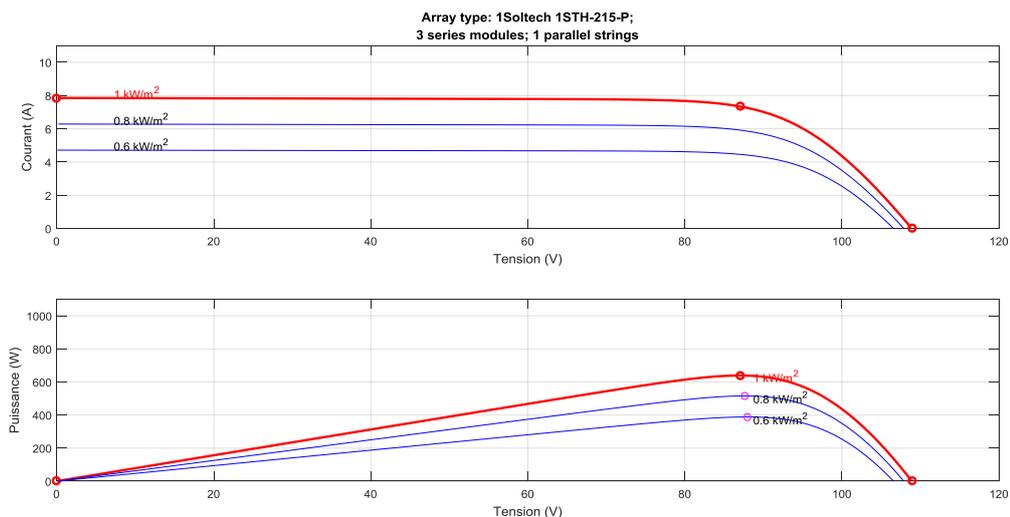


Figure IV.5 caractéristiques I-V et P-V d'un générateurs PV

La figure suivante présente les caractéristiques I-V et P-V d'un générateurs PV pour différentes valeurs de température.

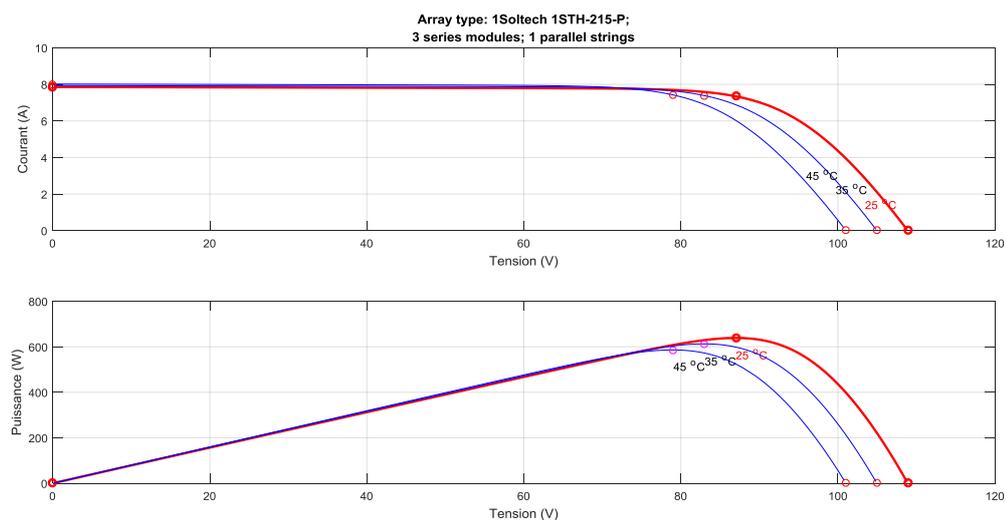


Figure IV.6 caractéristiques I-V et P-V d'un générateurs PV

IV.5. Adaptation d'un capteur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est une source continue d'électricité. L'énergie fournie par cette source varie en fonction de la température et de l'ensoleillement. Il est donc nécessaire d'utiliser des convertisseurs statiques pour adapter cette énergie à l'exploitation. Selon le type d'exploitation, ce convertisseur peut être sous forme de hacheur ou d'onduleur [24].

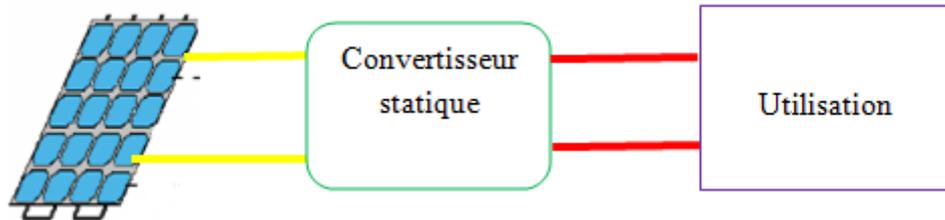


Figure IV.7 Adaptation l'énergie par convertisseur statique

IV.6. Simulation du système PV- Onduleur multiniveaux type Cascade à cinq niveaux :

IV.6.1. Modèle de simulation

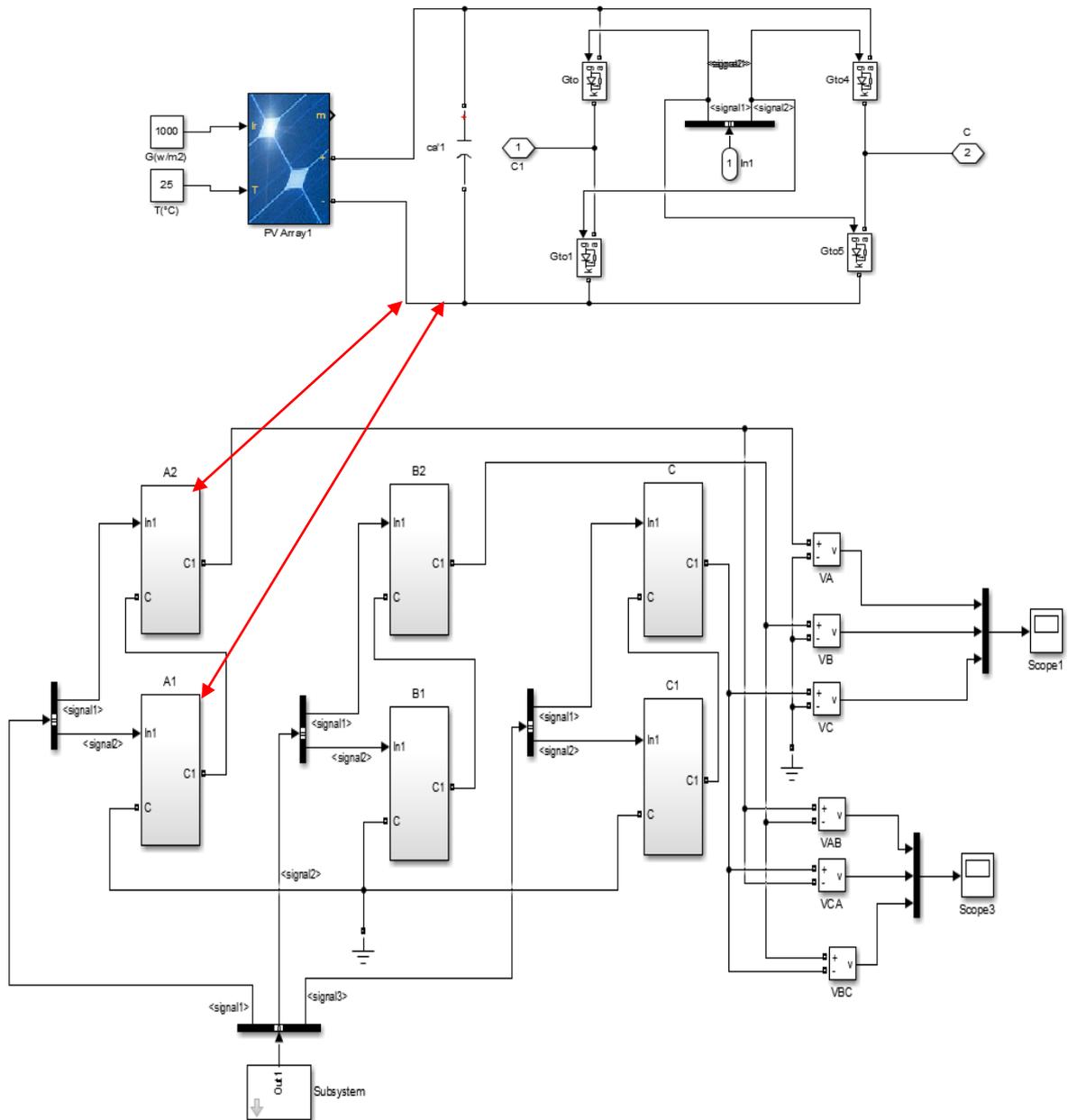


Figure IV.8 Structure de puissance de l'onduleur à cinq niveaux de type cascade alimenté par un générateur PV

IV.6.2 Résultats de simulation

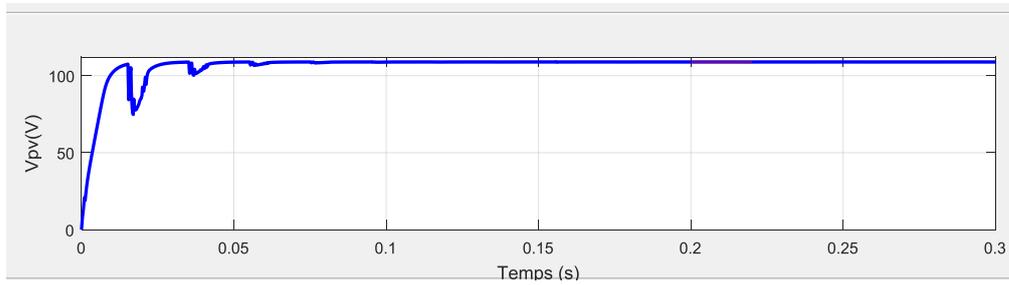


Figure IV.9 la tension de sortie du générateur PV

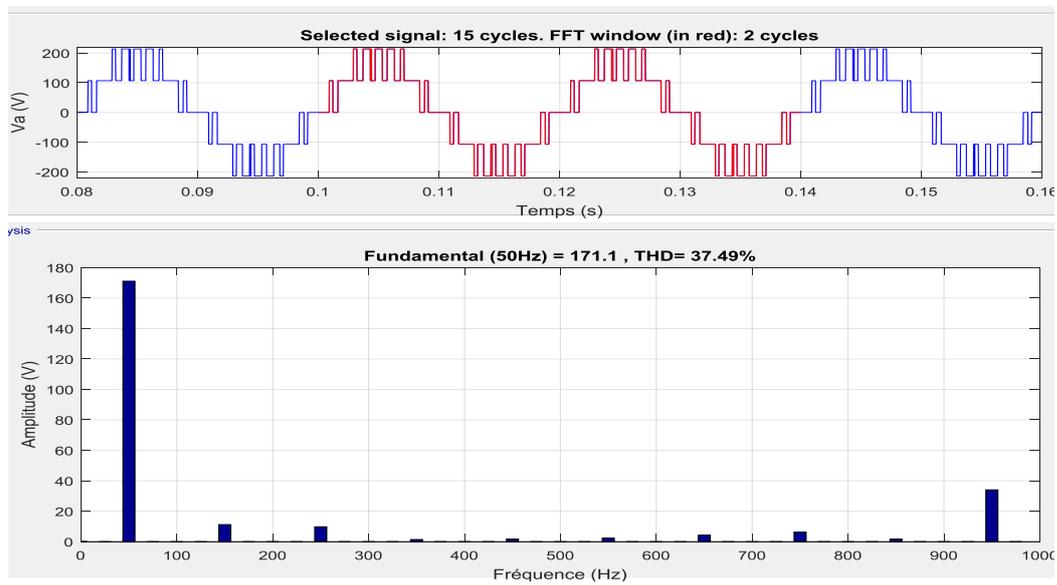


Figure IV.10 Forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade à cinq niveaux et spectre harmonique

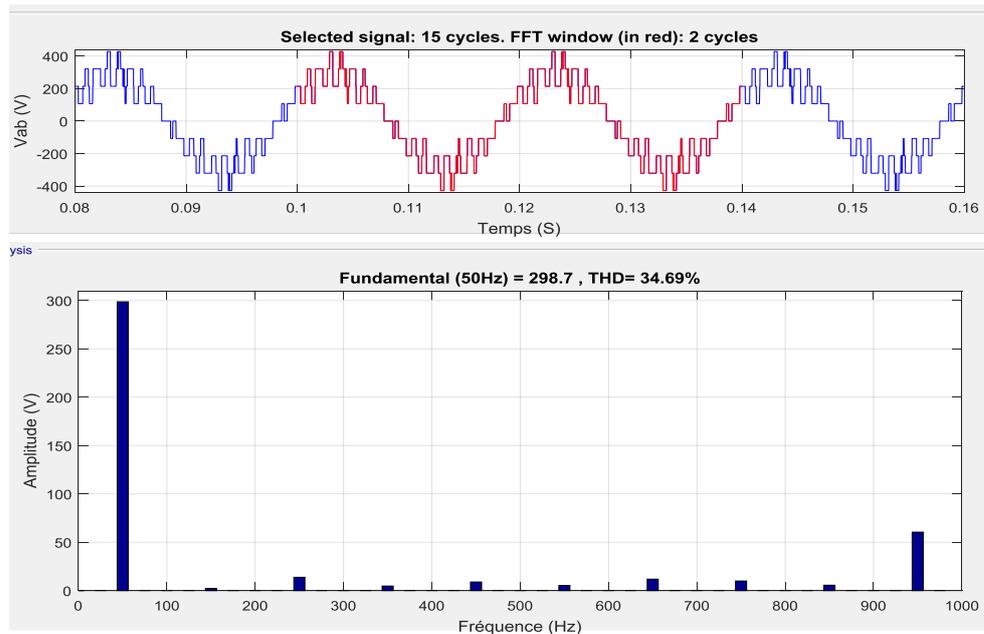


Figure IV.11 Forme d’onde de la tension composée de l’onduleur cascade à cinq niveaux et spectre harmonique

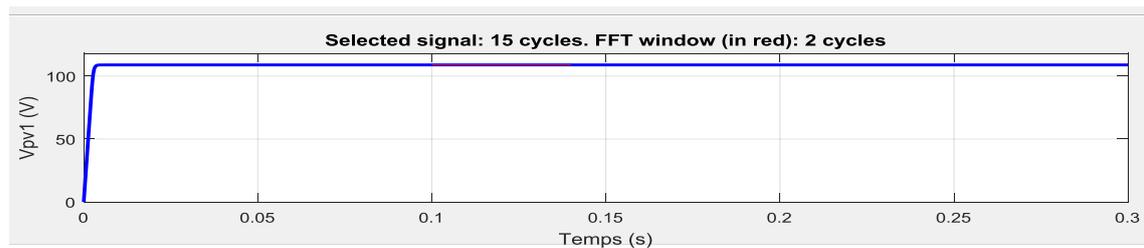


Figure IV.12 la tension de sortie du générateur PV(V_{pv1})

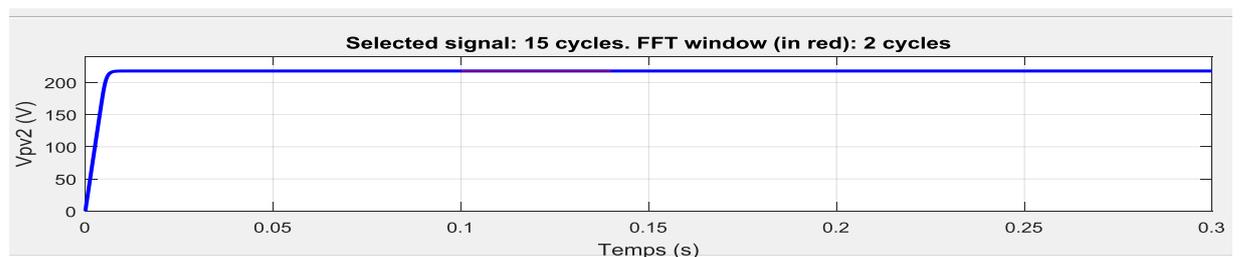


Figure IV.13 la tension de sortie du générateur PV(V_{pv2})

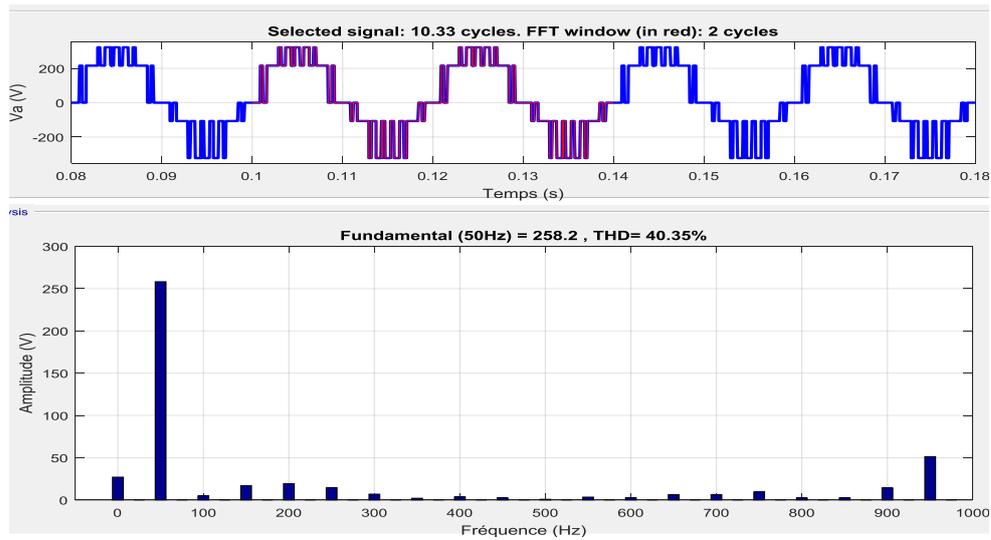


Figure IV.14 Forme d'onde de la tension simple de l'onduleur cascade à cinq niveaux et spectre harmonique (Variation de la tension du générateur PV)

IV.7 Simulation du système PV- Onduleur multiniveaux type Cascade à sept niveaux

IV.7.1 Modèle de simulation

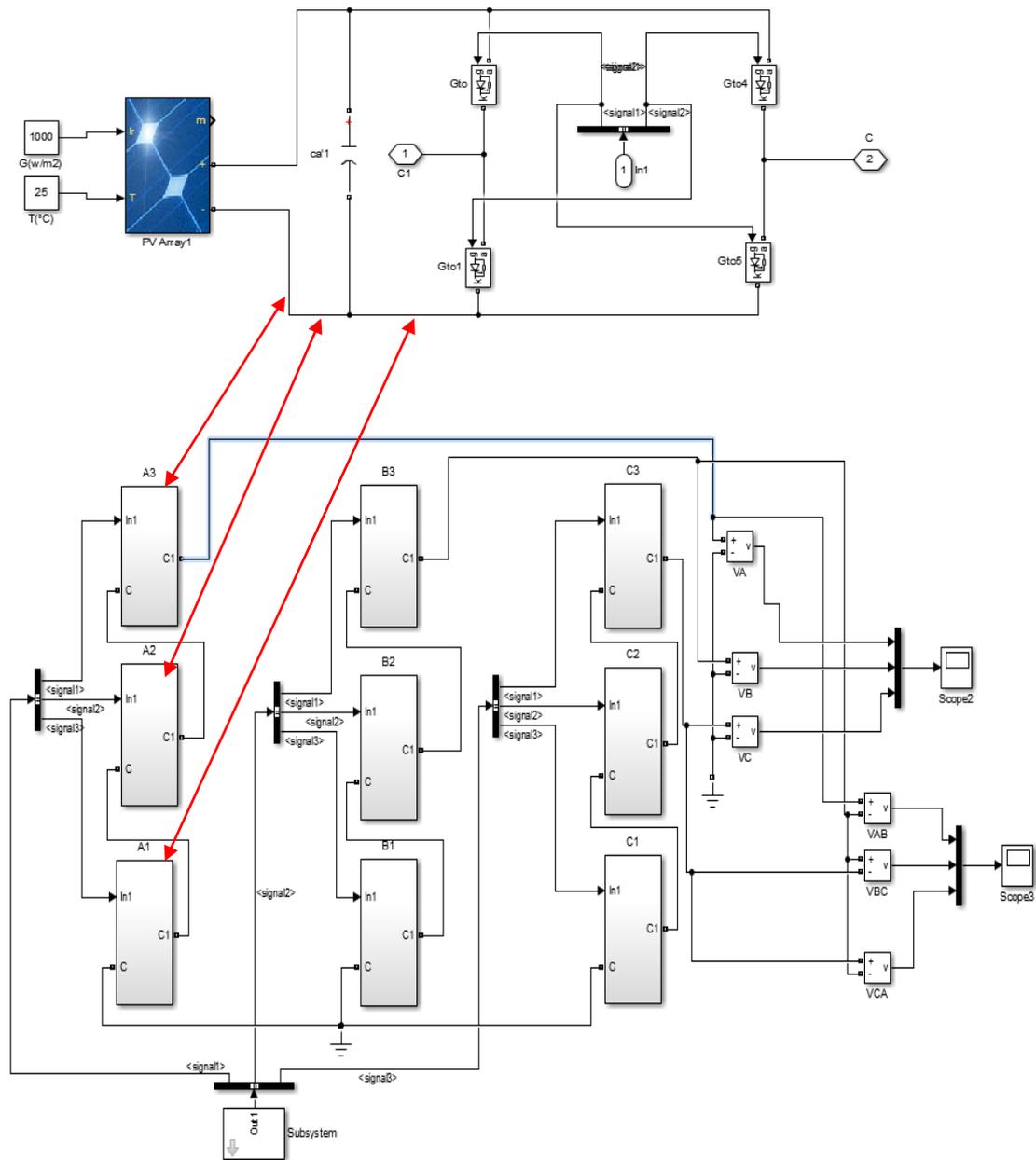


Figure IV.15 Structure de puissance de l'onduleur à sept niveaux de type cascade alimenté par un générateur PV

IV.7.2 Résultats de simulation

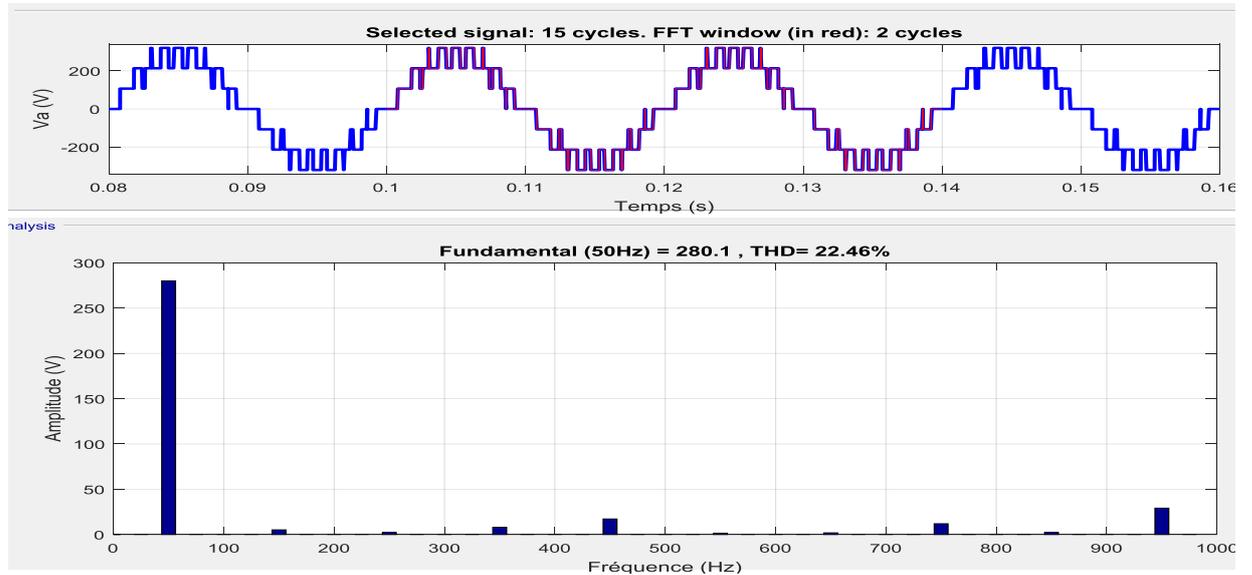


Figure IV.16 Forme d’onde de la tension simple de l’onduleur cascade à sept niveaux et spectre harmonique

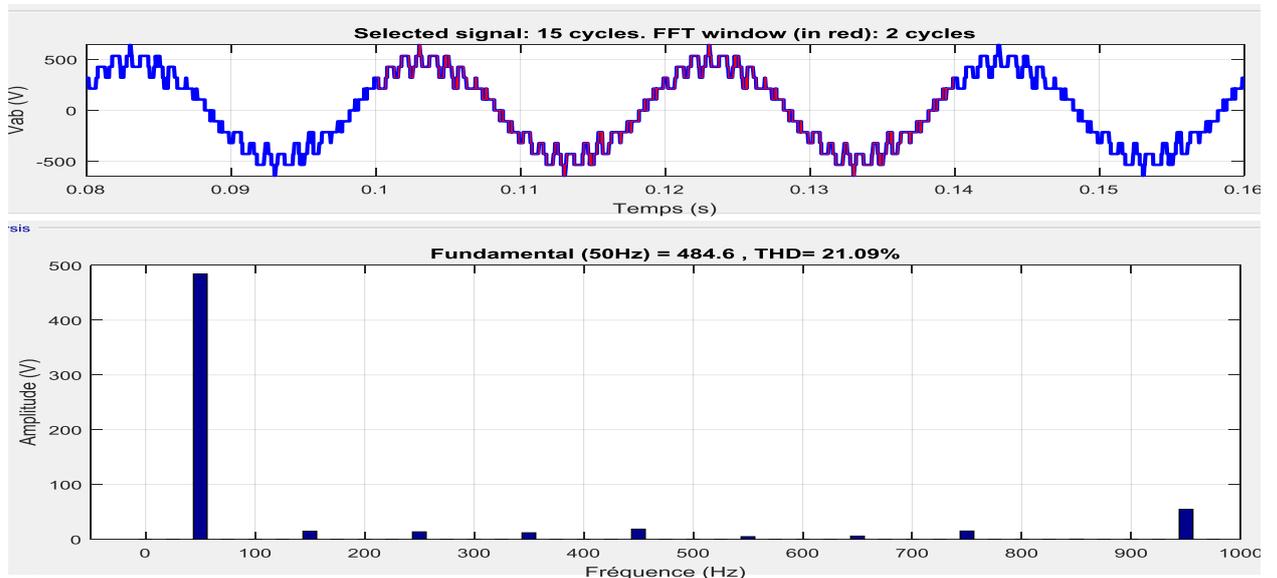


Figure IV.17 Forme d’onde de la tension composée de l’onduleur cascade à sept niveaux et spectre harmonique

Tableau IV.2 Comparaison des résultats obtenus de l'onduleur cascade 5 et 7 niveaux avec Générateur PV

Type	Cascade – PV	
	5	7
Niveaux		
THD V_a (%)	37,49	22,46
THD V_{ab} (%)	34,69	21,09
$U_{1effs} V_a$ (V)	171,1	280,1
$U_{1effs} V_{ab}$ (V)	298,7	484,6

IV.8. Interprétation des résultats

Les figures (Figure IV.10, Figure IV.11, Figure IV.16 et Figure IV.17) présentent une comparaison du THD des onduleurs multiniveaux de type Cascade 5 et à 7 niveaux connecté à un générateur photovoltaïque avec une tension d'entrée de l'étage continu de 108,9 V, nous constatons que :

- Nous avons obtenus un **THD = 37,49%** pour **V_a** et **THD = 34,69%** pour **V_a** d'un onduleur Cascade à cinq niveaux.
- Nous avons obtenus un **THD = 22,46%** pour **V_a** et **THD = 21,09%** pour **V_{ab}** d'un onduleur Cascade à sept niveaux.
- La différence de **THD** entre l'onduleur Cascade sept niveaux et l'onduleur Cascade 5 niveaux est environ de **15,03%** pour **V_a** ;
- La différence de **THD** entre l'onduleur Cascade sept niveaux et l'onduleur Cascade 5 niveaux est environ de **13,6%** pour **V_{ab}** .

IV.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation et la simulation d'un onduleur multiniveaux de type cascade connecté à un générateur photovoltaïque, on a commencé en premier temps par la modélisation d'un système PV. Puis, on a présenté les caractéristique I-V et P-V pour différente valeurs de température et éclairement,

La dernière étape a été consacrée à la simulation d'un modèle d'onduleur 5 et 7 niveaux de type Cascade alimenté par un générateur photovoltaïque.

On constate que par rapport à la structure à 5 niveaux (THD $V_a=37,49\%$), le taux de distorsion harmonique en tension est effectivement améliorée puisqu'il est de 22,46% pour la structure 7 niveaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale :

Les onduleurs triphasés de tension multiniveaux sont très utilisés dans l'industrie et touchent des domaines d'applications les plus variés.

Le travail effectué dans ce mémoire avait comme objectif de faire une analyse comparative des structures d'onduleurs multiniveaux pour les systèmes photovoltaïques. En première partie, on a donné des généralités sur les onduleurs multiniveaux NPC et Cascade ainsi que le système PV et leur principe, la cellule PV ainsi que le générateur photovoltaïque.

Dans la deuxième partie, on a étudié la topologie d'onduleurs multiniveaux de type NPC (3, 5, 7 et 9 niveaux), on a présenté les résultats de simulation des tensions de sortie et leurs spectres.

Dans la troisième partie, on a étudié la topologie d'onduleurs multiniveaux de type Cascade (3, 5, 7 et 9 niveaux), on a présenté les résultats de simulation des tensions de sortie et leurs spectres.

Dans la dernière partie, on a effectué une simulation sous l'environnement Matlab/Simulink d'un système (PV- Onduleur multiniveaux). Notre travail de l'étude du système PV avec onduleur multiniveaux se résume comme suit :

Un générateur PV de 640 W, les onduleurs multiniveaux.

On a fait une étude comparative entre la qualité d'onde issue des deux types d'onduleur à 3, 5, 7 et 9 niveaux. L'étude spectrale a montré la supériorité de l'onduleur à 9 niveaux. Bien sûr, le compromis doit être joué entre la complexité de la configuration du convertisseur de puissance et la commande qui lui est associée.

- La tension composée (ligne - ligne) peut avoir plus de niveaux par rapport à la tension simple (phase - phase), donc sa forme d'onde ressemble ainsi à une sinusoïdale plus souhaitable. Lorsque le nombre de niveaux augmente, le TDH est diminué.
- Quant à la qualité des signaux obtenus, nous avons obtenus les mêmes formes d'onde pour les trois onduleurs étudiés, le THD de la tension est meilleur pour le cas NPC, mais par contre du point de vue composants utilisés, l'onduleur cascade en pont H est plus intéressant. À cause de la complexité et le déséquilibre.

Références bibliographiques

- [1] B. REBAOUI, Etude du déséquilibre de l'alimentation d'un onduleur multiniveaux, Thèse de doctorat, Université Mohamed boudiaf, Oran, 2014.
- [2] A.Ammiche, Commande des onduleurs multiniveaux de tension à diode flottante, Mémoire de Master, Université de M'sila, 2013.
- [3] A.BENDAIKHA, Commande par MLI vectorielle d'un Onduleur multi niveaux, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2018.
- [4] 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.
- [5] K.Bouchareb, Etude de différentes topologies des onduleurs multi niveaux (Cascade et NPC), Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2020.
- [6] DEKKICHE, Mohamed Lotfi. Etude d'un onduleur multiniveaux en cascade de type 3/2, Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, 2018.
- [7] BOUCHERITTE.W, Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau, Mémoire de Magistère, Université de Biskra, 2013.
- [8] ABDALLAH, MANSOURI, Commande des Onduleurs Multiniveaux, Thèse de doctorat. Université de Mohamed Boudiaf Faculté de Technologie, M'SILA, 2016.
- [9] GHEDAMSI. K, YAHIAOUI, Abdelhalim, Etude et réalisation d'un onduleur a structure npc, Thèse de doctorat. Université de Bejaïa, 2014.
- [10] RICAUD, Alain. Photovoltaic Systems, 2011.
- [11] AIS Belkacem, Topologie des onduleurs solaire Etude et synthèse, Mémoire de Magister, 2012.
- [12] PANKOW, Yann. Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque. National School Superior of Art and Trades, Lille, 2004.
- [13] SINGO, Akassewa Tchapo, Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome, Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2010.
- [4] Salim ARAB, Dalila TOUDERT, Etude d'un Système Photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, TIZI-OUZOU, 2017.
- [15] BELHADJ, Mohammed, Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome, mémoire de magistère, Bechar, 2008.

- [16] HELALI, Kamelia, Modélisation d'une cellule photovoltaïque: étude comparative, Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri, TIZI-OUZOU, 2012.
- [17] BRIGHEN, H. et HALAIMIA, S, Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi niveaux par MLI sinusoïdale, Mémoire de Master, Université Larbi Tebssi, Tebessa, 2016.
- [18] SAIFI imane, Alimentation d'onduleurs multiniveaux : analyse des possibilités de réalisation et méthodes de répartition de la puissance, Mémoire Master Académique Université Kasdi Merbah, OUARGLA, 2016.
- [19] BOUKHERS.Djamil, Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque : Application au pompage. thèse de magister Université Mentouri, Constantine, 2007.
- [20] BENDJAMAA, Ibrahim, Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque. Thèse de doctorat, Université Aboubaker Belkaid, TLEMCEM, 2012.
- [21] MOTAHHIR, Saad, GHZIZAL, Abdelaziz, et DEROUICH, Aziz, Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM. In : Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes, 2015.
- [22] CHEBANA, Abdelkrim, contrôle d un système photovoltaïque connecte au réseau, Université Mohamed Khider Biskra, mémoire de master, 2014.
- [23] SLAMA, Fateh, Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, SETIF, 2018.
- [24] MAHER, C. H, Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque, Mémoire Master Université Sfax, 2007, vol. 2008, p. 14
- [25] YAHYA, A. Ould Mohamed, MAHMOUD, A. Ould, et YOUM, I, Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque, Revue des Energies Renouvelables, 11, no 3, p. 473-483, vol 2008.
- [26] YANNICK, BEMANA NGUEOUELE, DAKYO, Brayima, et BAGRE, M. Ahmed O, 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.
- [27] SUN, Dongsen, GE, Baoming, PENG, Fang Zheng, et al. A new grid-connected PV system based on cascaded H-bridge quasi-Z source inverter. In : IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, p. 951-956, 2012.