

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électrotechnique  
Spécialité : Énergie et environnement

Présenté par : BEKKAL BRIKCI Nihel et BOUALLOU Mohammed Mehdi

Thème

**Étude comparative entre trois stratégies  
de modulation d'onduleurs à treize  
niveaux.**

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2024 , devant le jury composé de :

M. S.Belaroussi	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
M. A.F. Kerboua	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. S.M. Abdi	MCB	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Mme. I.S.Bousmaha	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M. A.E.K Ghezouani	Docteur	ESSA. Tlemcen	Examineur 2
M. Gh. Dinar	Doctorant	Université de MASCARA	Invité 1

Année universitaire : 2023 / 2024

# Dédicaces

## *À mes très chers parents,*

C'est en quête de fierté que je vous dédie ce travail. Vous m'avez permis de me nourrir, de m'abriter, d'évoluer... de vivre ! vos conseils avisés durant chaque étape parcourue dans ma vie m'ont aidé à forger une grande partie de ma personnalité et de devenir l'homme que je suis. MERCI !

## *À mon acolyte de toujours, Nihel*

Durant cinq longues années ou s'est tissé une amitié indéfectible, nous étions sans doutes les meilleurs à chaque travail, projet et exploit que nous avons réalisé tous les deux. Nous avons commencé ensemble, la fin sera de même.

## *À ma famille et à tous mes proches,*

Qui m'ont toujours encouragé à donner le meilleur de Moi-même, vos constantes demandes de mes nouvelles et votre intérêt envers mon état d'avancement sur ce travail m'ont permis, à chaque fois de recharger le plein de confiance.

## *À mes chers amis et futurs collègues ingénieurs*

Avec lesquelles j'ai passé des années inoubliables. Les études supérieures sont une étape importante dans une vie, vous m'avez permis de la passer de la plus belle des manières.

## *À tous les enseignants,*

Qui m'ont nourri de savoir et m'ont transmis l'amour de la science et de la découverte.

Avec une reconnaissance particulière à M.Kerboua, M. Abdellaoui, M. Ghezouani,

M.Mebrouki, et Mme Bousmaha

Mehdi BOUALLOU

***À mes très chers parents***

Vous êtes les piliers de ma vie. Votre amour inconditionnel et votre soutien constant sont mes sources d'inspiration quotidienne. Votre présence aimante et vos conseils avisés ont illuminé mon chemin depuis le premier jour. Je vous aime au-delà des mots. Merci d'être toujours à mes côtés dans le meilleur comme dans le pire, je suis fière d'être votre fille.

MERCI !

***À mon complice de toujours, Mehdi,***

Dans le ballet de la vie estudiantine, tu es mon partenaire parfait, toujours en phase avec mes mouvements, toujours là pour me soutenir lorsque je trébuche et pour célébrer avec moi lorsque je danse vers de nouveaux sommets. Notre collaboration est un harmonieux mélange de compétence, de confiance et de camaraderie. L'aventure que nous avons commencé ensemble il y a 5 ans va bientôt terminée et je ne regrette d'aucun moment.

Nous avons commencé ensemble, la fin sera de même.

***À mon âme sœur, ma chérie ma sœur, Sara,***

Dans le livre de ma vie, tu es le chapitre le plus précieux, celui qui illumine chaque page de mon existence. Depuis notre enfance jusqu'à nos jours présents, tu as été bien plus qu'une sœur pour moi ; tu as été ma confidente, ma complice et mon plus grand soutien. Chaque moment partagé avec toi est une source de bonheur et de réconfort. Ta présence apporte de la chaleur à mon cœur et de la lumière à mes jours les plus sombres. À travers les hauts et les bas, tu as toujours été là, prête à m'écouter, à me comprendre et à me soutenir sans faille. Aujourd'hui, je veux te dire combien je suis reconnaissante d'avoir une sœur aussi merveilleuse que toi dans ma vie. Ta gentillesse, ta générosité et ton amour inconditionnel sont des trésors que je chérirai toujours. Que notre lien continue à se renforcer et à s'épanouir avec le temps, car tu es bien plus qu'une sœur pour moi, tu es mon amie la plus chère. À toi, ma chère sœur, je dédie cette pensée avec tout mon amour et toute ma gratitude.

***À mon bras droit de toujours, mon petit frère, Abdesslem,***

Chaque moment passé avec toi est empreint de rires, de sourires et de souvenirs que je chérirai pour toujours. Ta curiosité infinie, ton innocence charmante et ton esprit vif apportent une fraîcheur à ma vie qui n'a pas de prix. À travers les défis et les victoires, je suis fière de t'avoir à mes côtés, et je suis reconnaissante pour les liens indissolubles que nous partageons. Aujourd'hui, je veux te dire combien je suis reconnaissante d'avoir un

petit frère aussi merveilleux que toi dans ma vie. Ta présence rayonne de joie et d'amour, et je sais que les années à venir seront remplies de moments précieux et de souvenirs inoubliables avec toi.

***À tous mes amis et proches***

Je dédie ce travail à tous mes proches et plus particulièrement, Yasmine, Manel, Asma, Linda, Mehdi et Rifel, durant ces 5 années, j'ai passé avec vous les meilleurs moments de ma vie, merci d'être toujours là, merci d'être ma deuxième famille.

***À tous les enseignants,***

Qui m'ont nourri du savoir et m'ont transmis l'amour de la science et de la découverte. Avec une reconnaissance particulière à M.Kerboua, M. Abdellaoui, M. Ghezouani, Mme Kherbouche et Mme Bousmaha.

Nihel BEKKAL BRIKCI

# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, **M. KERBOUA Abdelfettah**, ainsi qu'à notre co-encadrant, **M. ABDI Sidi-Mohammed** d'avoir accepté de nous diriger dans notre travail de recherche; leurs efforts incessants ainsi que leurs précieux conseils nous ont permis de mener à bien la réussite de ce projet.

Nous remercions vivement les membres du jury qui ont eu l'amabilité de porter une appréciation sur ce travail et de participer au jury de soutenance.

Un hommage éternel à tous les enseignants qui nous ont encadré depuis nos premières années d'études jusqu'à aujourd'hui: M.Ladjroud, M.Benallal, M.Mebrouki, M.Abdellaoui, M.Ghezouani, M.Khefif, M.kerboua, Mme.Bousmaha, Mme.Kherbouch Merci.

Nous tenons finalement à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, en apportant leur aide, leurs conseils ou leur expertise.

# Table des matières

<b>Liste des figures</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xi</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Cadre général de l'étude</b>	<b>3</b>
1 Introduction . . . . .	3
1.1 Contexte et Motivation . . . . .	3
1.2 Problématique . . . . .	4
1.3 Objectifs . . . . .	4
1.3.1 Objectif Général . . . . .	4
1.3.2 Objectifs Spécifiques . . . . .	4
1.4 Définition et principe de fonctionnement . . . . .	5
1.5 Histoire et évolution des onduleurs multiniveaux . . . . .	5
1.6 Avantages des onduleurs multiniveaux . . . . .	5
1.7 Inconvénients et défis des onduleurs multiniveaux . . . . .	6
1.8 Applications des onduleurs multiniveaux . . . . .	6
1.9 Types de topologies des onduleurs multiniveaux . . . . .	7
2 Stratégies de modulation pour les onduleurs multiniveaux - État de l'art . . . . .	8
2.1 Introduction . . . . .	8
2.2 Historique des stratégies de modulation . . . . .	8
2.3 Classification des stratégies de modulation . . . . .	9
2.3.1 Modulation par Élimination Sélective des Harmoniques (SHE) . . . . .	9
2.3.2 Modulation par Largeur d'Impulsion (PWM) . . . . .	10
2.3.3 Contrôle au Niveau le Plus Proche (NLC) . . . . .	11

	2.3.4	Algorithmes basés sur l'Espace Vectoriel . . . . .	11
	2.3.5	Modulation Hybride . . . . .	11
	Conclusion	. . . . .	12
<b>2</b>	<b>Aspects théoriques</b>		<b>14</b>
1	Nearest Level Control (NLC)	. . . . .	14
1.1	Principe de fonctionnement de la NLC	. . . . .	14
1.2	Méthode de détermination du niveau pour la NLC	. . . . .	16
1.2.1	Tension de Référence	. . . . .	16
1.2.2	Niveaux de Tension Disponibles	. . . . .	17
1.2.3	Algorithme de Sélection	. . . . .	17
1.2.4	Commutation des Interrupteurs	. . . . .	17
1.3	Avantages de la Stratégie NLC	. . . . .	17
1.4	Inconvénients de la Stratégie NLC	. . . . .	18
2	Selective Harmonic Elimination (SHE)	. . . . .	19
2.1	Principe de fonctionnement	. . . . .	19
2.2	Méthodes de calcul des angles de commutation pour la SHE	. . .	19
2.2.1	Définition du problème et objectif de la SHE	. . . . .	19
2.2.2	Formulation des équations non linéaires de la SHE	. . .	20
2.2.3	Application d'une méthode d'optimisation pour la SHE		22
2.3	Avantages de la modulation SHE	. . . . .	22
2.3.1	Élimination précises des harmoniques spécifiques	. . .	22
2.3.2	Compatibilité avec les onduleurs multiniveaux	. . . . .	22
2.3.3	Réduction des Interférences Électromagnétiques (EMI)		22
2.4	Inconvénients de la modulation SHE	. . . . .	23
2.4.1	Augmentation des Harmoniques d'ordre Supérieur	. . .	23
2.4.2	Nécessité d'une Précision Élevée des Commutations	. .	23
2.4.3	Dépendance aux Paramètres de Modulation	. . . . .	23
3	Pulse Width Modulation (PWM)	. . . . .	23
3.1	Principe de fonctionnement de la PWM	. . . . .	23
3.2	Équations pour la PWM dans un Onduleur à Treize Niveaux	. . .	25
3.2.1	Nombre de Porteuses et Nombre de Niveaux	. . . . .	25
3.2.2	Indice de Modulation (Modulation Index)	. . . . .	26

3.2.3	Fréquence des Porteuses . . . . .	26
3.2.4	Tension de Sortie et Élimination des Harmoniques . . . . .	26
3.3	Commutations rapides de la PWM : avantages et inconvénients . . . . .	27
	Conclusion . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Méthodologie et Outils</b>	<b>30</b>
1	L'onduleur AMI (Arranged Multicellular Inverter) . . . . .	30
1.1	Origine et Évolution de la Topologie Arranged Multicellular Inverter (AMI) . . . . .	30
1.1.1	Brève introduction aux topologies FLC et CHB . . . . .	31
1.1.2	Transition vers la Topologie AMI . . . . .	31
1.2	Structure Dérivée et Avantages . . . . .	32
1.2.1	Organisation des Composants . . . . .	32
1.2.2	Asymétrie des Sources de Tension . . . . .	33
1.2.3	Disposition des Interrupteurs . . . . .	33
1.2.4	Réduction des Pertes par Commutation . . . . .	34
1.3	Structure AMI à 13 niveaux . . . . .	34
1.3.1	Description de la structure AMI 13 niveaux . . . . .	34
1.3.2	Mode de fonctionnement de l'onduleur AMI 13 niveaux . . . . .	35
1.3.3	Structure triphasée de l'AMI 13 niveaux . . . . .	36
2	Modélisation du circuit électrique de l'onduleur AMI à 13 niveaux . . . . .	37
3	Modélisation de l'intégration de l'onduleur AMI dans un système de pompage photovoltaïque . . . . .	39
3.1	Modèle généralisé du système de pompage photovoltaïque . . . . .	39
3.2	Modélisation des modules PV . . . . .	40
3.2.1	Maximum power point tracker . . . . .	41
3.3	Modélisation d'une MAS alimentant une pompe . . . . .	41
4	Modélisation des trois stratégies de modulation . . . . .	43
4.1	Modélisation de la stratégie Nearest Level Control (NLC) . . . . .	43
4.2	Modélisation de la stratégie Selective Harmonic Elimination (SHE) . . . . .	46
4.3	Modélisation de la stratégie Pulse Width Modulation (PWM) . . . . .	49
	Conclusion . . . . .	51



<b>4 Résultats et Interprétations</b>	<b>53</b>
1 Visualisations, interprétations et comparaisons des résultats des simulations pour les trois stratégies . . . . .	53
1.1 Tensions simples et composées des trois stratégies . . . . .	54
1.1.1 Tensions Simples Triphasées . . . . .	54
1.1.2 Tensions Composées Triphasées . . . . .	56
1.1.3 Analyse du THD des Tensions Simples . . . . .	59
1.1.4 Analyse du THD des Tensions Composées . . . . .	61
1.1.5 Interprétation et Comparaison . . . . .	63
1.2 Courants de sorties pour les trois stratégies . . . . .	64
1.3 Analyse des Résultats de la Vitesse de la MAS et du Débit de la Pompe . . . . .	69
Conclusion . . . . .	71
<b>Conclusion Générale</b>	<b>73</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>76</b>

# Liste des figures

1.1	Classification des onduleurs multiniveaux [1] . . . . .	7
1.2	Classification des stratégies de modulation pour les onduleurs multiniveaux [2]. . . . .	12
2.1	Onde de référence et angle de commutations de la stratégie de modulation NLC . . . . .	16
2.2	Disposition des angles de commutations de la SHE [?] . . . . .	20
2.3	Visualisation des ondes de référence et de porteuse pour la PWM . . . . .	24
2.4	Signal de sortie d'une comparaison des signaux: référence/porteuse) . . . . .	27
3.1	Topologies multiniveaux CHB et AMI [1] . . . . .	33
3.2	Structure monophasée de l'AMI 13 niveaux . . . . .	35
3.3	Circuit électrique triphasé de la structure AMI à 13 niveaux [1] . . . . .	37
3.4	Schéma de modélisation de l'onduleur AMI à 13 niveaux dans MATLAB Simulink . . . . .	38
3.5	Modèle SIMULINK de l'onduleur multiniveaux intégré au système de pompage photo-voltaïque . . . . .	40
3.6	Modèle Simulink du raccordement du MPPT avec le PV . . . . .	41
3.7	Modèle Simulink de la MAS . . . . .	42
3.8	Modèle Simulink de la pompe . . . . .	42
3.9	Intersections signal de référence et niveau d'amplitude . . . . .	44
3.10	Allure de sortie pour l'application d'un seul angle de commutation-NLC . . . . .	44
3.11	Allure de sortie pour l'application et la somme de tous les angles commutation-NLC . . . . .	45
3.12	Superposition des niveaux résultants et l'onde de référence . . . . .	45
3.13	Modèle SIMULINK de la modulation NLC . . . . .	46
3.14	Allure de sortie pour l'application d'un seul angle de commutation-SHE . . . . .	48

3.15	Allure de sortie pour l'application et la somme de tous les angles commutation-SHE . . . . .	49
3.16	Ondes référence et porteuses de la PSPWM . . . . .	50
3.17	Sortie du comparateur Référence/Porteuse . . . . .	50
3.18	Somme des signaux des comparateurs . . . . .	51
3.19	Modèle Simulink de la PSPWM . . . . .	51
4.1	Tensions Simples - NLC . . . . .	54
4.2	Tensions Simples - SHE . . . . .	55
4.3	Tensions Simples - PWM . . . . .	56
4.4	Tensions Composées - NLC . . . . .	57
4.5	Tensions Composées - SHE . . . . .	58
4.6	Tensions Composées - PWM . . . . .	59
4.7	THD des tensions simples - NLC . . . . .	60
4.8	THD des tensions simples - SHE . . . . .	60
4.9	THD des tensions simples - PWM . . . . .	61
4.10	THD des tensions composées - NLC . . . . .	62
4.11	THD des tensions composées - SHE . . . . .	62
4.12	THD des tensions composées - PWM . . . . .	63
4.13	Allure des courants - NLC . . . . .	65
4.14	THD du courant - NLC . . . . .	65
4.15	Allure des courants - SHE . . . . .	66
4.16	THD du courant - SHE . . . . .	67
4.17	Allure des courants - PWM . . . . .	67
4.18	THD du courant - PWM . . . . .	68
4.19	Vitesse de la Machine Asynchrone pour les Stratégies NLC, SHE et PWM	70
4.20	Débit d'eau de la Pompe pour les Stratégies NLC, SHE et PWM . . . . .	71

# Liste des tableaux

3.1	Table de commutations des interrupteurs pour la structure de l'onduleur AMI à 13 niveaux [1] . . . . .	36
3.2	Paramètres du module PV Sunny International Power SPM-220PB204 . .	40
4.1	Comparaison des THD pour les trois stratégies de modulation . . . . .	69

# Abréviations

<b>Abréviation</b>	<b>Définition</b>
<b>AMI</b>	Arranged Multicellular Inverter (convertisseur multiniveau arrangé)
<b>FLC</b>	Flying Capacitor Inverter (condensateur volant)
<b>CHB</b>	Cascaded H-Bridge (pont en H cascadé)
<b>PUC</b>	Packed U-Cells (cellule en U )
<b>ANPC</b>	Active Neutral Point Clamped (point neutre serré actif)
<b>SMC</b>	Sliding Mode Control
<b>SVM</b>	Space Vector Modulation (modulation à vecteur d'espace )
<b>NPC</b>	neutral point clamped (point neutre serré)
<b>CMC</b>	Capacitor-Clamped Multilevel Converter
<b>HMC</b>	Hybrid Multilevel Converter (convertisseur multiniveau hybride)
<b>MMC</b>	Modular Multilevel Converter
<b>DC</b>	Direct Current (Courant Continu)
<b>IGBT</b>	insulated-gate bipolar transistor (Transistor bipolaire à grille isolée)
<b>THD</b>	Total Harmonic Distortion (Distorsion Harmonique Totale)
<b>SHE</b>	Selective Harmonic Elimination (élimination sélective d'harmonique )
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation (modulation à largeur d'impulsion)
<b>PSPWM</b>	Phase Shifted Pulse Wide Modulation
<b>LSPWM</b>	Level Shifted Pulse Wide Modulation
<b>NLC</b>	Nearest Level Control (contrôle du niveau proche )
<b>PV</b>	Photovoltaic (Photovoltaïque)
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracker ( suivi du point maximal de puissance )
<b>MAS</b>	Machine Asynchrone
<b>NPC</b>	Neutral Point Clamped
<b>Vdc</b>	Voltage Direct Current (Tension Courant Continu)
<b>P&amp;O</b>	Perturb and observ

# Introduction Générale

La transition énergétique mondiale incite à une adoption croissante des sources d'énergie renouvelable, notamment l'énergie solaire, en raison de ses avantages environnementaux et économiques. L'optimisation des systèmes de conversion de l'énergie solaire en électricité est cruciale pour maximiser l'efficacité et la fiabilité de ces systèmes. Dans ce contexte, les onduleurs multiniveaux jouent un rôle essentiel, en permettant une conversion efficace de l'énergie continue produite par les panneaux solaires en énergie alternative utilisable par les réseaux électriques ou les applications spécifiques, comme les systèmes de pompage solaire.

Les onduleurs multiniveaux, grâce à leur capacité à produire des tensions de sortie de meilleure qualité avec des distorsions harmoniques réduites, présentent plusieurs avantages par rapport aux onduleurs conventionnels. Cependant, la performance de ces onduleurs dépend fortement des stratégies de modulation utilisées. Parmi ces stratégies, la modulation par élimination sélective des harmoniques (SHE), la modulation par largeur d'impulsion (PWM) et le contrôle par niveau le plus proche (NLC) sont largement étudiées et appliquées en raison de leurs performances distinctes et de leurs applications spécifiques.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude comparative entre ces trois stratégies de modulation appliquées à un onduleur à 13 niveaux. Le but de cette étude est de déterminer quelle stratégie de modulation offre les meilleures performances dans un contexte pratique de système de pompage solaire. Pour ce faire, une modélisation détaillée de chaque stratégie a été réalisée à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, et les résultats obtenus ont été comparés selon divers critères de performance.

Dans le premier chapitre, nous posons le contexte de l'étude et définissons les objectifs de notre travail. Nous présentons également un état de l'art des stratégies de modulation et des onduleurs multiniveaux. Le deuxième chapitre est consacré aux aspects théoriques des stratégies de modulation NLC, SHE et PWM que nous appliquons. Dans le troisième

chapitre, nous décrivons en détail la topologie de l'onduleur à 13 niveaux utilisé, sa modélisation et son intégration dans un système de pompage solaire. Nous y abordons également la modélisation des trois stratégies de modulation dans MATLAB/Simulink. Enfin, le quatrième chapitre est dédié à l'interprétation et à la comparaison des résultats obtenus pour les quatre topologies étudiées.

# Chapitre 1

## Cadre général de l'étude

### 1 Introduction

#### 1.1 Contexte et Motivation

Face aux défis environnementaux actuels, la transition vers des sources d'énergie renouvelable, comme l'énergie solaire, est devenue une priorité mondiale. Pour tirer le meilleur parti de cette source d'énergie inépuisable, il est essentiel d'optimiser les systèmes de conversion d'énergie solaire. Les onduleurs multiniveaux sont au cœur de ces systèmes, transformant l'énergie continue produite par les panneaux solaires en énergie alternative utilisable, avec une qualité de tension supérieure et une réduction des distorsions harmoniques.

Cependant, la performance de ces onduleurs est intimement liée aux stratégies de modulation utilisées. Ces stratégies déterminent comment les différents niveaux de tension sont commutés pour produire une forme d'onde de sortie optimale. Chaque stratégie de modulation possède ses propres atouts et faiblesses, influençant des aspects critiques comme la qualité de la tension, le rendement énergétique et la complexité de mise en œuvre.

Dans ce contexte, mener une étude comparative approfondie des différentes stratégies de modulation devient crucial. Cette étude vise à identifier la stratégie de modulation la plus performante pour des onduleurs multiniveaux, afin de maximiser leur efficacité et leur fiabilité dans des applications pratiques.



## 1.2 Problématique

Cette étude soulève plusieurs questions clés concernant les stratégies de modulation pour les onduleurs multiniveaux. Quelle stratégie de modulation offre la meilleure qualité de forme d'onde en termes de distorsion harmonique totale (THD) ? Quelle stratégie est la plus efficace en termes de rendement énergétique et de minimisation des pertes ? En termes de complexité de mise en œuvre, laquelle des stratégies est la plus accessible en termes de calculs et de besoins matériels ? Enfin, comment chaque stratégie de modulation affecte-t-elle les performances dynamiques du système de pompage solaire ?

## 1.3 Objectifs

### 1.3.1 Objectif Général

L'objectif principal de ce mémoire est de déterminer quelle stratégie de modulation offre les meilleures performances pour un onduleur multiniveaux dans un contexte pratique. Cette détermination se fera à travers une comparaison approfondie des performances de chaque stratégie en termes de qualité de la tension de sortie, de rendement énergétique et de complexité de mise en œuvre.

### 1.3.2 Objectifs Spécifiques

1. **Étudier les caractéristiques et les principes de fonctionnement des différentes stratégies de modulation :**
  - Présenter les aspects théoriques de chaque stratégie de modulation.
  - Analyser les avantages et les inconvénients de chaque stratégie dans le contexte des onduleurs multiniveaux.
2. **Modéliser l'onduleur multiniveaux et ses stratégies de modulation :**
  - Décrire la topologie de l'onduleur multiniveaux.
  - Réaliser des simulations de chaque stratégie de modulation en utilisant MATLAB/Simulink.
3. **Comparer les performances des différentes stratégies de modulation :**
  - Mesurer la qualité de la tension de sortie pour chaque stratégie.

- Évaluer le rendement énergétique de chaque stratégie.
- Analyser la complexité de mise en œuvre et les exigences matérielles pour chaque stratégie.

#### **4. Interpréter les résultats et déterminer la meilleure stratégie de modulation :**

- Comparer les résultats des simulations en termes de distorsion harmonique totale (THD), de pertes de commutation et d'efficacité globale.
- Identifier la stratégie de modulation qui offre le meilleur compromis entre performance et complexité dans un contexte pratique.

En atteignant ces objectifs, cette étude vise à fournir des recommandations pratiques pour l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie utilisant des onduleurs multiniveaux, en tenant compte des spécificités des applications pratiques.

### **1.4 Définition et principe de fonctionnement**

Les onduleurs multiniveaux sont des dispositifs électroniques qui convertissent une tension continue en une tension alternative. Ils se distinguent des onduleurs classiques par leur capacité à produire plusieurs niveaux de tension, au lieu de simplement deux niveaux (haut et bas). Cette capacité permet une meilleure qualité de la forme d'onde de sortie et une réduction significative des harmoniques.

### **1.5 Histoire et évolution des onduleurs multiniveaux**

L'idée des onduleurs multiniveaux a émergé dans les années 1970, avec l'objectif de répondre aux besoins croissants de qualité et de performance dans les systèmes de conversion d'énergie. Depuis, plusieurs topologies ont été développées, chacune avec ses avantages et ses inconvénients, pour diverses applications industrielles et de recherche [2].

### **1.6 Avantages des onduleurs multiniveaux**

Les principaux avantages des onduleurs multiniveaux incluent :

- **Qualité améliorée de la forme d'onde de sortie** : Grâce à la production de multiples niveaux de tension, les onduleurs multiniveaux réduisent les distorsions harmoniques.

- **Moins de contraintes sur les composants** : Les tensions de commutation étant plus faibles, les composants subissent moins de stress, ce qui peut prolonger leur durée de vie [3].
- **Réduction des filtres** : La qualité supérieure de la forme d'onde permet de réduire la taille et la complexité des filtres nécessaires pour éliminer les harmoniques.
- **Efficacité énergétique accrue** : Moins de pertes de commutation et une meilleure répartition de l'énergie [3].

## 1.7 Inconvénients et défis des onduleurs multiniveaux

Cependant, ces dispositifs présentent également certains inconvénients :

- **Complexité accrue** : La conception et le contrôle des onduleurs multiniveaux sont plus complexes que ceux des onduleurs traditionnels [3].
- **Coût élevé** : Le nombre accru de composants peut augmenter les coûts de production et de maintenance [3].
- **Fiabilité** : Avec plus de composants, les risques de défaillance peuvent être plus élevés, nécessitant des stratégies de redondance et de maintenance plus élaborées [3].

## 1.8 Applications des onduleurs multiniveaux

Les onduleurs multiniveaux sont utilisés dans une variété d'applications, notamment :

- **Systèmes d'énergie renouvelable** : Comme les parcs éoliens et les centrales solaires, où ils permettent une conversion efficace de l'énergie.
- **Systèmes de traction électrique** : Dans les trains et les véhicules électriques, pour une meilleure gestion de la puissance.
- **Industrie** : Pour le contrôle des moteurs et les systèmes de distribution d'énergie, où la qualité de la puissance est cruciale [2].

## 1.9 Types de topologies des onduleurs multiniveaux

Il existe plusieurs topologies d'onduleurs multiniveaux, parmi les plus courantes [4] :

- **Onduleur à diodes de clamping** : Utilise des diodes pour obtenir les différents niveaux de tension.
- **Onduleur à condensateurs volants** : Utilise des condensateurs pour équilibrer les niveaux de tension.
- **Onduleur en cascade (H-bridge)** : Utilise plusieurs ponts en H pour produire les niveaux de tension requis.
- **PUC (Packed U-Cell)** : Utilise une combinaison de cellules pour obtenir une performance optimale.

En plus des topologies détaillées ci-dessus, il existe plusieurs autres topologies d'onduleurs multiniveaux dérivées des premières. Ces topologies, telles que l'ANPC, le MMC, et le CHB, partagent l'objectif commun d'améliorer la qualité de l'onde de sortie, de réduire les distorsions harmoniques, et d'optimiser l'efficacité énergétique des systèmes dans lesquels elles sont utilisées. La sélection de la topologie la plus appropriée dépendra des exigences spécifiques de l'application et des contraintes de conception.

la figure 1.1 montre un schéma descriptif des structures classiques évoquées.

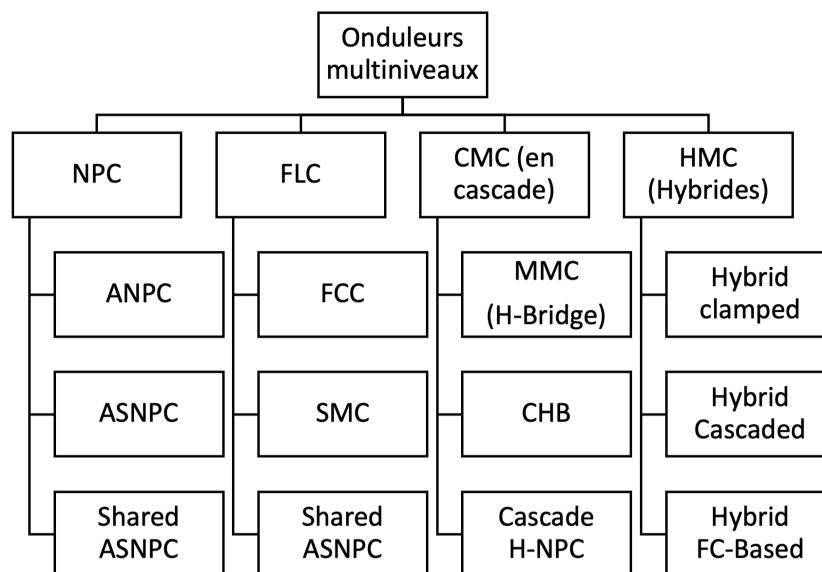


Figure 1.1: Classification des onduleurs multiniveaux [1]

## 2 Stratégies de modulation pour les onduleurs multiniveaux

### - État de l'art

#### 2.1 Introduction

Les stratégies de modulation pour les onduleurs multiniveaux jouent un rôle crucial dans la performance globale du système. Elles influencent la qualité de la forme d'onde de sortie, l'efficacité énergétique, ainsi que les pertes de commutation. Ce sous-chapitre présente un état de l'art des différentes stratégies de modulation utilisées dans les onduleurs multiniveaux [5].

#### 2.2 Historique des stratégies de modulation

Les onduleurs multiniveaux ont suscité un intérêt croissant dans les domaines de la conversion d'énergie électrique depuis les années 1970. Ces convertisseurs offrent de nombreux avantages par rapport aux onduleurs classiques à deux niveaux, notamment une meilleure qualité de la forme d'onde de sortie, une réduction du contenu harmonique et une plus grande capacité de gestion de la puissance. Cependant, le contrôle et la modulation de ces onduleurs multiniveaux ont nécessité le développement de stratégies spécifiques.

**Débuts et premières stratégies:** Les premières approches de modulation pour les onduleurs multiniveaux ont émergé dans les années 1970 et 1980. La modulation à élimination sélective des harmoniques (SHE) a été l'une des toutes premières méthodes proposées. Cette technique, basée sur l'analyse en série de Fourier de la tension de sortie, permettait d'éliminer certains harmoniques indésirables. Bien que relativement simple, cette approche présentait des limitations en termes de flexibilité et de performances spectrales.

**Évolution des stratégies:** Au cours des années 1990 et 2000, de nouvelles stratégies de modulation ont été développées pour améliorer les performances des onduleurs multiniveaux. La modulation sinusoïdale (SPWM), adaptée des onduleurs à deux niveaux, a permis de générer des formes d'onde de sortie plus proches de la sinusoïde. Parallèlement, la modulation vectorielle (SVM) a été étendue aux onduleurs multiniveaux, offrant de meilleures performances spectrales grâce à un contrôle plus précis des vecteurs de tension. []

**Nouvelles stratégies et améliorations:** Dans les années 2000 et 2010, des techniques de

modulation plus avancées ont vu le jour, telles que la modulation MLI précalculée et la modulation MLI avec superposition ou décalage des porteuses. Ces méthodes visaient à optimiser davantage la qualité de la tension de sortie en réduisant encore le contenu harmonique.

L'évolution des stratégies de modulation pour les onduleurs multiniveaux a été étroitement liée aux progrès des technologies de l'électronique de puissance et des systèmes de contrôle. L'utilisation croissante de logiciels de simulation et de contrôle, comme **MATLAB**, a permis d'améliorer la précision et la rapidité des calculs, facilitant ainsi le développement et l'implémentation de ces stratégies avancées. Aujourd'hui, le choix de la stratégie de modulation la plus adaptée dépend des exigences spécifiques de l'application, telles que la qualité de la tension de sortie, l'efficacité énergétique, la complexité de mise en œuvre et les contraintes de coût. L'étude et l'optimisation de ces stratégies de modulation restent un domaine de recherche actif, avec des applications dans des domaines variés comme les systèmes de pompage photovoltaïque, les réseaux électriques haute tension et les alimentations sans interruption [6].

## **2.3 Classification des stratégies de modulation**

### **2.3.1 Modulation par Élimination Sélective des Harmoniques (SHE)**

La modulation par élimination sélective des harmoniques (SHE) est une technique avancée de modulation utilisée pour réduire les harmoniques indésirables dans la sortie d'un onduleur. Cette méthode repose sur la résolution d'un ensemble d'équations non linéaires pour déterminer les angles de commutation spécifiques qui éliminent certains ordres harmoniques tout en maintenant la composante fondamentale désirée [4].

#### **Caractéristiques**

- **Réduction des Harmoniques** : Les angles de commutation sont calculés pour éliminer les harmoniques d'ordre inférieur (tels que les 3ème, 5ème, 7ème, 9ème, et 11ème harmoniques).
- **Complexité de Calcul** : La détermination des angles de commutation nécessite la résolution d'équations non linéaires complexes, généralement effectuée à l'aide de

méthodes numériques comme l'algorithme de Newton-Raphson.

- **Performance** : Offre une très bonne qualité de forme d'onde avec une réduction significative des distorsions harmoniques, particulièrement efficace pour les applications où la qualité de l'énergie est cruciale.

### 2.3.2 Modulation par Largeur d'Impulsion (PWM)

La modulation par largeur d'impulsion (PWM) est une technique de modulation très répandue qui consiste à comparer un signal de référence sinusoïdal avec une ou plusieurs porteuses triangulaires pour générer les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur. Les sous-stratégies de la PWM incluent la PS-PWM et la LS-PWM [7].

#### Caractéristiques

- **Types de PWM** : Inclut plusieurs variantes telles que la PWM unipolaire et bipolaire, ainsi que les techniques de décalage de phase (PS-PWM) et de niveau (LS-PWM).
- **Fréquence de Commutation** : La fréquence de commutation est généralement élevée, ce qui permet de déplacer les harmoniques vers des fréquences plus élevées où ils sont plus faciles à filtrer.
- **Qualité de la Forme d'Onde** : Produit une forme d'onde de sortie relativement lisse et proche de la sinusoïde idéale, avec un THD généralement faible [8].

**PS-PWM (Phase Shifted PWM)** : La modulation par déplacement de phase utilise plusieurs porteuses décalées en phase pour générer les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur [9].

**LS-PWM (Level Shifted PWM)** : La modulation par déplacement de niveau utilise des porteuses décalées en amplitude, chacune étant associée à un niveau de tension de sortie possible de l'onduleur. Selon la disposition des porteuses, cette méthode peut être en phase (PD-PWM), en opposition de phase (POD-PWM) ou en opposition de phase alternée (APOD-PWM).

### 2.3.3 Contrôle au Niveau le Plus Proche (NLC)

Le contrôle au niveau le plus proche (NLC) est une technique de modulation qui sélectionne le niveau de tension le plus proche de la valeur instantanée de la référence sinusoïdale. Cette méthode est particulièrement adaptée aux onduleurs multiniveaux, car elle utilise efficacement les multiples niveaux de tension disponibles [10].

#### Caractéristiques

- **Simplicité** : La logique de commutation est simple, car elle ne nécessite pas de calculs complexes.
- **Qualité de la Forme d'Onde** : Les transitions entre les niveaux de tension sont plus douces, ce qui réduit les pics de commutation et améliore la qualité de la forme d'onde.
- **Applications** : Bien adaptée aux applications où une réponse rapide et une faible complexité de calcul sont requises.

### 2.3.4 Algorithmes basés sur l'Espace Vectoriel

Les algorithmes basés sur l'espace vectoriel incluent [11] :

- **Modulation par Vecteur Spatial (SVM)** : Utilise la théorie des vecteurs pour optimiser la forme d'onde de sortie. Il existe des algorithmes en 2D et en 3D adaptés aux onduleurs à 3 bras et à 4 bras.
- **Contrôle par Vecteur Spatial (SVC)** : Utilise des techniques avancées de contrôle pour ajuster dynamiquement les vecteurs de tension.

### 2.3.5 Modulation Hybride

La modulation hybride combine des techniques de modulation à haute et basse fréquence pour optimiser les performances de l'onduleur. Elle est spécialement conçue pour les CHB avec des sources DC inégales [12].



## Caractéristiques

- **Réduction des Pertes** : Tire parti des différents niveaux de puissance des cellules pour réduire les pertes de commutation et améliorer l'efficacité de l'onduleur.
- **Adaptabilité** : Utilisée pour améliorer l'efficacité et la qualité de la forme d'onde dans les configurations CHB avec des sources de tension inégales [13].

La figure 1.2 résume la classifications des différentes stratégies mentionnées [2].

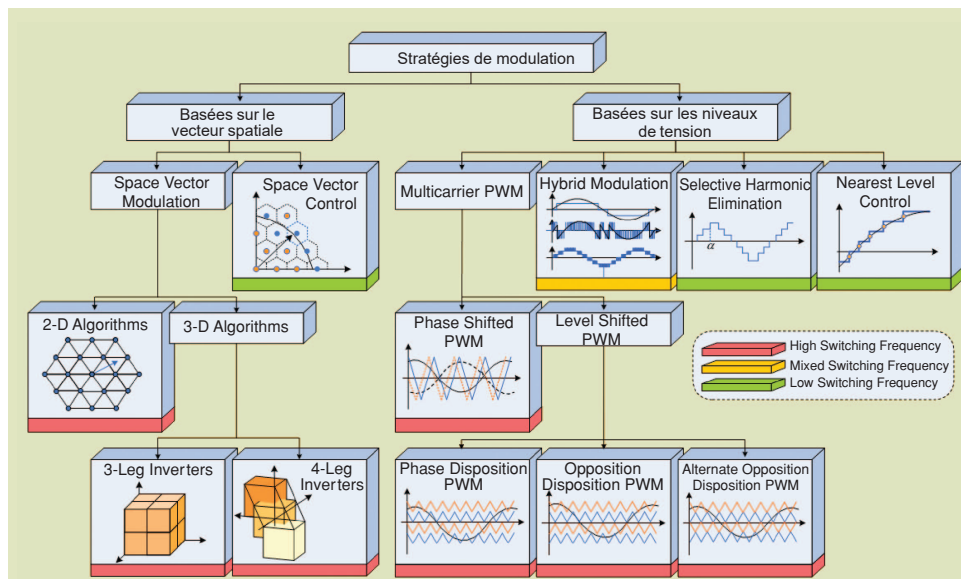


Figure 1.2: Classification des stratégies de modulation pour les onduleurs multiniveaux [2].

## Conclusion

Ce chapitre a présenté une vue d'ensemble des onduleurs multiniveaux, de leurs principes de fonctionnement et des différentes stratégies de modulation développées au fil des années pour optimiser leurs performances.

Nous avons d'abord défini les onduleurs multiniveaux comme des convertisseurs de puissance capables de générer des tensions de sortie avec un nombre de niveaux supérieur à deux, offrant ainsi de meilleures formes d'onde et un contenu harmonique réduit.

L'état de l'art a ensuite mis en lumière l'évolution des stratégies de modulation, depuis les premières approches comme la modulation à élimination sélective des harmoniques (SHE) jusqu'aux techniques les plus récentes telles que la modulation vectorielle (SVM)

et les variantes avancées de la modulation MLI. Ces méthodes ont permis d'améliorer progressivement la qualité de la tension de sortie et l'efficacité énergétique des onduleurs multiniveaux.

Finalement, ce chapitre a souligné l'importance croissante des onduleurs multiniveaux et de leurs stratégies de modulation dans de nombreuses applications. Les avancées continues dans ce domaine témoignent de l'intérêt grandissant pour ces convertisseurs, qui jouent un rôle clé dans la transition énergétique.

# Chapitre 2: Aspects théoriques

## Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude théorique des stratégies de modulation que nous avons choisies pour notre étude comparative appliquée à un onduleur à treize niveaux. Les stratégies de modulation sont essentielles pour optimiser les performances des onduleurs multiniveaux, car elles influent directement sur la qualité des formes d'onde, les pertes de commutation et l'efficacité globale du système. Nous allons nous pencher sur trois techniques de modulation spécifiques : la Selective Harmonic Elimination (SHE), la Pulse Width Modulation (PWM) et la Nearest Level Control (NLC). Chaque section de ce chapitre décrira les principes fondamentaux, les méthodes de calcul, ainsi que les avantages et les limitations de ces stratégies. Toutes les théories et équations présentées seront rigoureusement adaptées pour un onduleur à treize niveaux, garantissant ainsi la cohérence et la pertinence de notre analyse. En abordant ces aspects théoriques, nous visons à établir une base solide pour les comparaisons pratiques et les évaluations de performance qui suivront dans les chapitres ultérieurs de ce mémoire. Cela nous permettra de mieux comprendre les implications et les performances de chaque stratégie de modulation dans le contexte spécifique des onduleurs multiniveaux.

## 1 Nearest Level Control (NLC)

### 1.1 Principe de fonctionnement de la NLC

La Nearest Level Control (NLC) est une stratégie de modulation utilisée dans les onduleurs multiniveaux pour générer une forme d'onde de sortie qui suit de près une forme d'onde de référence. Le principe de base de la NLC repose sur la sélection du niveau de tension le

plus proche de la tension de référence à chaque instant. Cette méthode permet de simplifier le contrôle et d'améliorer la qualité de la forme d'onde de sortie.

Le fonctionnement de la NLC peut être décrit par les étapes suivantes :

**Génération de la Tension de Référence :** La forme d'onde de référence, généralement une sinusoïde pour les applications de puissance, est générée. Cette tension de référence représente la forme d'onde idéale que l'on souhaite obtenir à la sortie de l'onduleur. Cette onde de référence est clairement représenté en noir sur la figure 2.1

**Quantification de la Tension de Référence :** À chaque instant, la tension de référence est comparée aux niveaux de tension disponibles dans l'onduleur multiniveaux ou par analogie en divisant les valeurs des niveaux par un certain coefficient comme montré sur la figure 2.1 ou les tensions de sortie de l'onduleur sont divisées par deux. Pour un onduleur à treize niveaux, il y a douze niveaux de tension distincts plus le niveau zéro.

**Sélection du Niveau de Tension le Plus Proche :** Le niveau de tension le plus proche de la tension de référence est sélectionné. Cette sélection se fait par une simple comparaison, et le niveau de tension choisi est celui qui minimise l'erreur instantanée entre la tension de référence et les niveaux de tension disponibles. Cela va nous permettre de faire correspondre un angle de commutation propre à chaque niveau choisi, ces angles peuvent être représenté comme dans la figure 2.1.

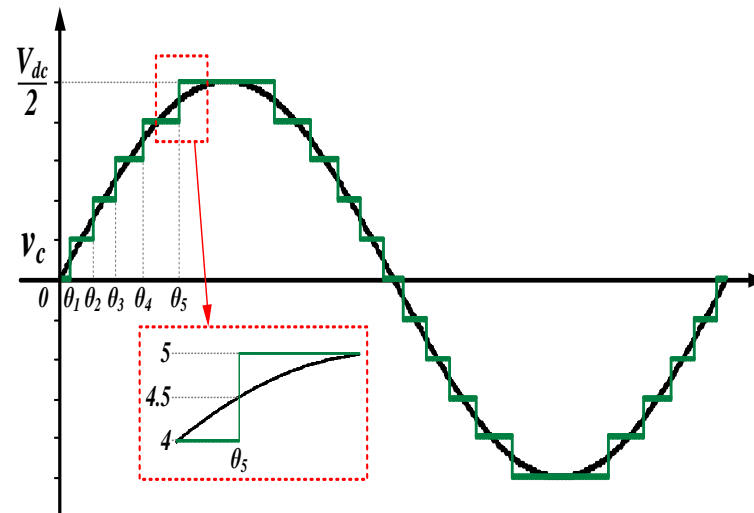


Figure 2.1: Onde de référence et angle de commutations de la stratégie de modulation NLC

**Commutation des Interrupteurs de Puissance :** Une fois le niveau de tension le plus proche déterminé, les interrupteurs de puissance de l'onduleur sont commutés de manière à produire ce niveau de tension à la sortie. Cela implique l'activation des interrupteurs correspondants pour atteindre la tension désirée.

## 1.2 Méthode de détermination du niveau pour la NLC

La détermination du niveau de tension le plus proche dans la NLC se fait par une comparaison instantanée entre la tension de référence et les niveaux de tension disponibles. Voici les étapes détaillées :

### 1.2.1 Tension de Référence

La tension de référence  $V_{ref}(t)$  est définie comme une sinusoïde :

$$V_{ref}(t) = V_m \sin(\omega t)$$

où  $V_m$  est l'amplitude maximale et  $\omega$  est la fréquence angulaire.

### 1.2.2 Niveaux de Tension Disponibles

Les niveaux de tension disponibles  $V_{level,i}$  sont déterminés par la tension continue  $V_{dc}$  et le nombre de niveaux  $N$ . Pour un onduleur à treize niveaux, ces niveaux sont :

$$V_{level,i} = \frac{2i - N - 1}{N - 1} V_{dc} \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, N$$

où  $N = 13$ .

### 1.2.3 Algorithme de Sélection

À chaque instant  $t$ , l'algorithme de la NLC sélectionne le niveau de tension  $V_{sel}(t)$  qui minimise l'erreur  $E(t)$  définie comme :

$$E(t) = |V_{ref}(t) - V_{level,i}|$$

Le niveau  $V_{sel}(t)$  est celui pour lequel  $E(t)$  est le plus petit.

### 1.2.4 Commutation des Interrupteurs

Les interrupteurs de puissance sont activés pour produire  $V_{sel}(t)$ , assurant que la tension de sortie de l'onduleur suive de près la tension de référence.

## 1.3 Avantages de la Stratégie NLC

- **Simplicité de Mise en Œuvre** : La NLC est réputée pour sa simplicité de mise en œuvre. Cette stratégie sélectionne le niveau de tension le plus proche de la référence à chaque instant, éliminant la nécessité de calculs complexes pour déterminer les points de commutation optimaux. Cette caractéristique simplifie considérablement l'architecture du contrôleur, rendant la NLC particulièrement attrayante pour les applications où la simplicité et la robustesse du système de contrôle sont primordiales. De plus, la réduction de la complexité du système de commande peut conduire à une diminution des coûts de développement et à une amélioration de la fiabilité opérationnelle.
- **Réduction des Pertes de Commutation** : En minimisant les transitions entre niveaux de tension, la NLC réduit les pertes de commutation inhérentes aux dispositifs

de puissance. Chaque commutation génère des pertes énergétiques dues aux courants transitoires et aux tensions appliquées aux interrupteurs. La NLC, en limitant le nombre de commutations nécessaires, diminue ces pertes, ce qui améliore l'efficacité énergétique globale du système. Cette réduction des pertes de commutation est particulièrement bénéfique dans les systèmes de conversion de puissance à haute fréquence où les pertes de commutation peuvent représenter une part significative des pertes totales.

#### 1.4 Inconvénients de la Stratégie NLC

- **Erreurs de Quantification** : La principale limitation de la NLC réside dans les erreurs de quantification introduites par la discrétisation des niveaux de tension. Étant donné que la NLC choisit le niveau de tension le plus proche de la référence, la différence entre la tension de sortie réelle et la tension de référence peut introduire des erreurs de quantification. Ces erreurs peuvent se traduire par une distorsion harmonique accrue dans la forme d'onde de sortie, réduisant ainsi la qualité du signal. Cette distorsion harmonique est particulièrement problématique dans les applications sensibles où la pureté du signal est cruciale.
- **Complexité de Gestion des Niveaux de Tension** : Un autre inconvénient de la stratégie de modulation NLC est la complexité liée à la gestion des nombreux niveaux de tension dans un onduleur multiniveau. Chaque niveau de tension doit être précisément contrôlé et équilibré pour garantir une performance optimale du système. Cette gestion complexe des niveaux de tension peut entraîner des défis supplémentaires en termes de conception et de contrôle. Par exemple, des déséquilibres de tension peuvent se produire entre les différents niveaux, ce qui peut affecter la performance globale de l'onduleur et réduire son efficacité. La nécessité de surveiller et d'ajuster continuellement les niveaux de tension ajoute une couche de complexité au système de contrôle, augmentant potentiellement les coûts de maintenance et les risques de défaillance.

## 2 Selective Harmonic Elimination (SHE)

### 2.1 Principe de fonctionnement

La Selective Harmonic Elimination (SHE) est une technique de modulation qui vise à éliminer des harmoniques spécifiques dans la sortie de tension de l'onduleur. Le principe fondamental de la SHE repose sur la définition d'angles de commutation optimaux dans la forme d'onde de sortie, afin de minimiser ou d'éliminer certaines fréquences harmoniques indésirables. Pour cela, les points de commutation sont définis de manière à ce que les courbes de tension de chaque niveau de tension soient alignées de manière à annuler les composantes harmoniques désirées. L'optimisation des points de commutation est réalisée en résolvant un problème d'équations non linéaires, qui prend en compte les contraintes de puissance et de tension. Il existe différents algorithmes et méthodes d'optimisation qui nous permettent de trouver les meilleurs point de commutation, la plus connue reste la méthode de Newton Raphson [?].

### 2.2 Méthodes de calcul des angles de commutation pour la SHE

La capacité d'un onduleur à éliminer les harmoniques dépend du nombre de niveaux de tension qu'il peut générer et des angles de commutation disponibles. Nous allons maintenant expliqué en détails l'algorithme de la formulations des équations et de leurs résolutions afin d'obtenir les angles de commutation nécessaires pour la sortie d'onduleur a treize (13) niveaux :

#### 2.2.1 Définition du problème et objectif de la SHE

Nous cherchons à optimiser les angles de commutation  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ , et  $\theta_6$  pour éliminer certains harmoniques indésirables (3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup>, 9<sup>ème</sup> et 11<sup>ème</sup>) d'une forme d'onde de sortie d'un onduleur à 13 niveaux.

Les angles de commutation sont les points dans le temps où la tension change de niveau. Pour un onduleur à plusieurs niveaux, chaque transition de niveau génère un angle de commutation.

La forme d'onde d'un onduleur à 13 niveaux a 12 transitions par période, ce qui donne 6 angles de commutation distincts par quart de période (en raison de la symétrie de la



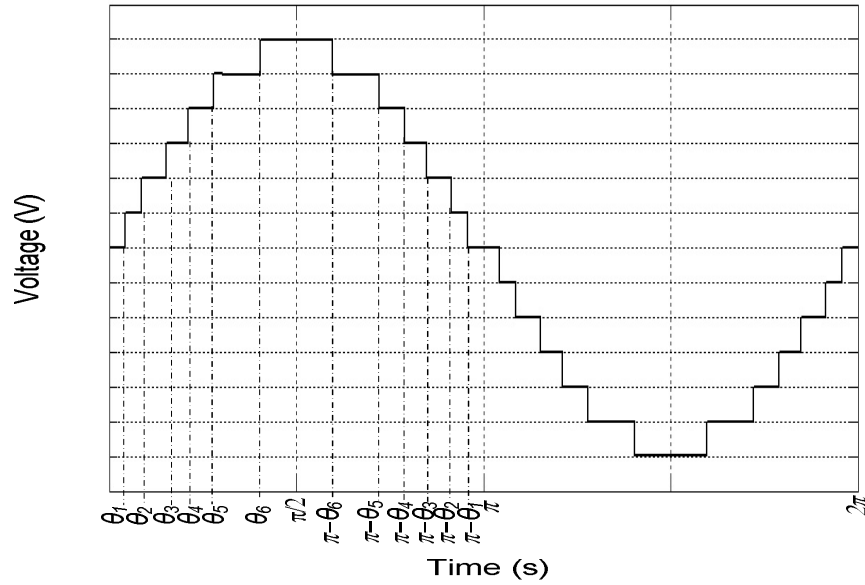


Figure 2.2: Disposition des angles de commutations de la SHE [?]

forme d'onde), comme montré sur la figure 2.2

Nous avons 6 variables (angles de commutation) à déterminer, donc nous pouvons écrire jusqu'à 6 équations. La première équation est généralement utilisée pour fixer la composante fondamentale de la forme d'onde, Les 5 équations suivantes peuvent être utilisées pour éliminer 5 harmoniques indésirables.

### 2.2.2 Formulation des équations non linéaires de la SHE

Les équations non linéaires pour la modulation sélective de l'élimination des harmoniques (SHE) sont dérivées en analysant la série de Fourier de la forme d'onde de sortie de l'onduleur.

La forme d'onde de sortie d'un onduleur à 13 niveaux peut être représentée par une série de Fourier. La série de Fourier d'une forme d'onde périodique  $V_{inv}(t)$  est donnée par :

$$V_{inv}(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (2.1)$$

Pour les onduleurs, en raison de la symétrie de la forme d'onde et de la configuration des niveaux de tension, les coefficients  $a_0$  et  $a_n$  sont nuls. De plus, seuls les termes de sinus persistent dans la série, ce qui simplifie l'expression à :

$$V_{inv}(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (2.2)$$

Les coefficients de Fourier  $b_n$  pour les termes de sinus peuvent être trouvés en intégrant la forme d'onde sur une période complète. Pour un onduleur à 13 niveaux avec des angles de commutation spécifiques, les coefficients de Fourier sont donnés par :

$$b_n = \frac{4V_{DC}}{n\pi} \sum_{k=1}^6 \cos(n\theta_k) \quad (2.3)$$

Pour la composante fondamentale ( $n = 1$ ), l'équation est :

$$b_1 = \frac{4V_{DC}}{\pi} [\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) + \cos(\theta_4) + \cos(\theta_5) + \cos(\theta_6)] \quad (2.4)$$

Pour une amplitude fondamentale  $V_1$ , nous avons :

$$V_1 = \frac{4V_{DC}}{\pi} \sum_{k=1}^6 \cos(\theta_k) \quad (2.5)$$

En réarrangeant pour normaliser avec l'indice de modulation  $M$ :

$$\sum_{k=1}^6 \cos(\theta_k) = \frac{\pi V_1}{4V_{DC}} = 6M \quad (2.6)$$

Pour éliminer les harmoniques indésirables (3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup>, 9<sup>ème</sup> et 11<sup>ème</sup>), nous devons nous assurer que leurs coefficients  $b_n$  sont nuls [?] :

$$\sum_{k=1}^6 \cos(3\theta_k) = 0 \quad (2.7)$$

$$\sum_{k=1}^6 \cos(5\theta_k) = 0 \quad (2.8)$$

$$\sum_{k=1}^6 \cos(7\theta_k) = 0 \quad (2.9)$$

$$\sum_{k=1}^6 \cos(9\theta_k) = 0 \quad (2.10)$$

$$\sum_{k=1}^6 \cos(11\theta_k) = 0 \quad (2.11)$$

En combinant toutes ces équations, nous obtenons le système d'équations non linéaires suivant à résoudre pour les angles  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$  :

$$\begin{cases} \cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) + \cos(\theta_4) + \cos(\theta_5) + \cos(\theta_6) = 6M \\ \cos(3\theta_1) + \cos(3\theta_2) + \cos(3\theta_3) + \cos(3\theta_4) + \cos(3\theta_5) + \cos(3\theta_6) = 0 \\ \cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3) + \cos(5\theta_4) + \cos(5\theta_5) + \cos(5\theta_6) = 0 \\ \cos(7\theta_1) + \cos(7\theta_2) + \cos(7\theta_3) + \cos(7\theta_4) + \cos(7\theta_5) + \cos(7\theta_6) = 0 \\ \cos(9\theta_1) + \cos(9\theta_2) + \cos(9\theta_3) + \cos(9\theta_4) + \cos(9\theta_5) + \cos(9\theta_6) = 0 \\ \cos(11\theta_1) + \cos(11\theta_2) + \cos(11\theta_3) + \cos(11\theta_4) + \cos(11\theta_5) + \cos(11\theta_6) = 0 \end{cases}$$

### 2.2.3 Application d'une méthode d'optimisation pour la SHE

Étant assez complexe, les équations non linéaires doivent être résolues en adaptant une méthode d'optimisation, ces techniques sont généralement mises en pratique grâce à des logiciels adaptés tel que **MATLAB**. En intégrant les différentes conditions et paramètres des équations, ce logiciel va nous permettre d'obtenir les résultats voulus [?].

## 2.3 Avantages de la modulation SHE

### 2.3.1 Élimination précises des harmoniques spécifiques

La SHE permet de cibler et d'éliminer des harmoniques spécifiques de basse fréquence, améliorant ainsi la qualité du signal de sortie.

### 2.3.2 Compatibilité avec les onduleurs multiniveaux

La SHE est particulièrement bien adaptée aux onduleurs multiniveaux, permettant de tirer parti de leurs multiples niveaux de tension pour une modulation précise.

### 2.3.3 Réduction des Interférences Électromagnétiques (EMI)

En éliminant les harmoniques indésirables, la SHE peut aider à réduire les interférences électromagnétiques, améliorant ainsi la compatibilité électromagnétique du système [?].

## **2.4 Inconvénients de la modulation SHE**

### **2.4.1 Augmentation des Harmoniques d'ordre Supérieur**

L'élimination des harmoniques de basse fréquence peut entraîner une redistribution de l'énergie harmonique vers les harmoniques d'ordre supérieur, augmentant potentiellement le THD global.

### **2.4.2 Nécessité d'une Précision Élevée des Commutations**

Les angles de commutation doivent être très précis pour que la SHE soit efficace. Toute imprécision dans les angles peut réduire l'efficacité de l'élimination des harmoniques.

### **2.4.3 Dépendance aux Paramètres de Modulation**

L'efficacité de la SHE dépend fortement de l'indice de modulation et des autres paramètres du système. Des variations dans ces paramètres peuvent affecter la performance de la technique [?].

## **3 Pulse Width Modulation (PWM)**

### **3.1 Principe de fonctionnement de la PWM**

La Pulse Width Modulation (PWM) est une technique de modulation largement utilisée pour contrôler la tension de sortie d'un onduleur en modulant la largeur des impulsions appliquées aux interrupteurs de puissance. Le fonctionnement de la PWM repose sur le principe de modulation d'un signal de référence par une onde porteuse, permettant ainsi de générer une forme d'onde de sortie qui correspond étroitement au signal de référence désiré [14].

Les étapes clés du fonctionnement de la PWM sont décrites comme suit :

- **Génération du signal de référence** : Le signal de référence, généralement une onde sinusoïdale, représente la forme d'onde de sortie souhaitée. Dans le cas d'un système triphasé, trois signaux de référence sinusoïdaux, déphasés de 120 degrés les uns par rapport aux autres, sont utilisés pour générer les trois phases de la tension de sortie.
- **Génération de l'onde porteuse** : Une onde porteuse, souvent une onde triangulaire ou en dents de scie, est générée avec une fréquence de commutation  $f_c$  beaucoup plus élevée que la fréquence du signal de référence  $f_1$ . la figure 2.3 visualise les deux ondes (référence et porteuse) et montre que la fréquence des signaux triangulaires est bien plus supérieurs a celle de la référence. Typiquement, la fréquence de l'onde porteuse est de l'ordre de plusieurs kilohertz, ce qui permet de moduler la largeur des impulsions à une cadence élevée.

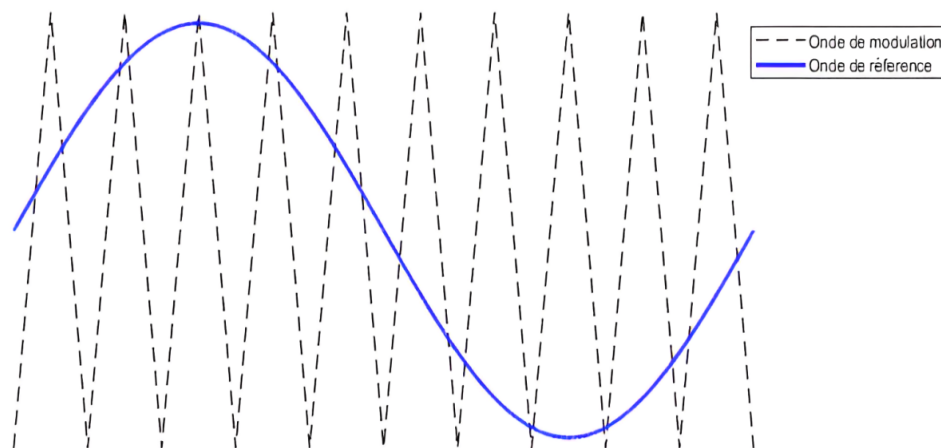


Figure 2.3: Visualisation des ondes de référence et de porteuse pour la PWM

- **Comparaison des signaux** : Le signal de référence est comparé à l'onde porteuse. Cette comparaison détermine les états de commutation des interrupteurs de puissance de l'onduleur. Lorsque le signal de référence dépasse l'onde porteuse, un signal de commutation "haut" est généré, activant les interrupteurs de puissance pour produire une tension positive. Inversement, lorsque le signal de référence est inférieur à l'onde porteuse, un signal de commutation "bas" est généré, produisant une tension négative ou désactivant les interrupteurs de puissance.

- **Modulation de la largeur des impulsions** : La largeur de chaque impulsion générée est proportionnelle à l'amplitude instantanée du signal de référence. Ainsi, une amplitude élevée du signal de référence correspond à une impulsion large, tandis qu'une amplitude faible correspond à une impulsion étroite. Cette modulation permet de synthétiser une forme d'onde de sortie qui suit de près l'enveloppe du signal de référence sinusoïdal.
- **Synthèse de la forme d'onde de sortie** : En modulant la largeur des impulsions à haute fréquence, la PWM crée une séquence d'impulsions qui, une fois filtrée par les composants passifs du circuit (inductances et condensateurs), se traduit par une forme d'onde de sortie lisse et sinusoïdale. La haute fréquence de commutation permet de minimiser les harmoniques de basse fréquence, améliorant ainsi la qualité de la forme d'onde de sortie.

### 3.2 Équations pour la PWM dans un Onduleur à Treize Niveaux

Pour un onduleur à treize niveaux utilisant la Pulse Width Modulation (PWM), plusieurs aspects mathématiques et équations peuvent être intégrés pour mieux comprendre et optimiser le fonctionnement de la modulation. Voici quelques-unes des équations et concepts clés [14] :

#### 3.2.1 Nombre de Porteuses et Nombre de Niveaux

Pour un onduleur multiniveaux, le nombre de porteuses  $N_c$  est directement lié au nombre de niveaux de sortie  $N$ . Pour un onduleur à treize niveaux, le nombre de porteuses est donné par :

$$N_c = N - 1$$

Pour un onduleur à treize niveaux :

$$N_c = 13 - 1 = 12$$

Chaque porteuse est déphasée par rapport aux autres pour répartir les commutations et minimiser les harmoniques.

### 3.2.2 Indice de Modulation (Modulation Index)

L'indice de modulation  $m_a$  est un paramètre clé en PWM, défini comme le rapport entre l'amplitude du signal de référence  $V_m$  et l'amplitude de l'onde porteuse  $V_c$  :

$$m_a = \frac{V_m}{V_c}$$

L'indice de modulation influence directement la tension de sortie de l'onduleur et la qualité de la forme d'onde.

### 3.2.3 Fréquence des Porteuses

La fréquence des porteuses  $f_c$  est généralement beaucoup plus élevée que la fréquence fondamentale  $f_1$  du signal de référence. La fréquence de commutation affecte la qualité de la forme d'onde et les pertes de commutation. Une fréquence de commutation élevée réduit les harmoniques de basse fréquence mais augmente les pertes de commutation :

$$f_c \gg f_1$$

### 3.2.4 Tension de Sortie et Élimination des Harmoniques

La tension de sortie  $V_{out}(t)$  d'un onduleur modulé en largeur d'impulsion peut être représentée par la somme des impulsions pondérées par la largeur de l'impulsion :

$$V_{out}(t) = \sum_{i=1}^{N_c} V_{dc} \cdot d_i(t)$$

où  $V_{dc}$  est la tension continue, et  $d_i(t)$  est la fonction de modulation définissant la largeur des impulsions.

Pour une forme d'onde modulée en largeur d'impulsion, la tension de sortie  $V_{out}(t)$  peut être représentée par une série de Fourier, incluant la composante fondamentale et les harmoniques :

$$V_{out}(t) = V_1 \sin(\omega t) + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \phi_n)$$

Les amplitudes des harmoniques  $V_n$  dépendent de la stratégie de modulation et des paramètres de l'onde porteuse. Pour la PWM, ces amplitudes peuvent être approximées

par des coefficients de Fourier pour une onde carrée modulée :

$$V_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi m_a}{2}\right)$$

où : -  $V_{dc}$  est la tension continue appliquée. -  $n$  est l'ordre de l'harmonique ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ). -  $m_a$  est l'indice de modulation.

La distorsion harmonique totale (THD) peut être calculée pour évaluer la qualité de la forme d'onde :

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2}$$

où  $V_n$  est l'amplitude de la n-ième harmonique et  $V_1$  est l'amplitude de la composante fondamentale.

### 3.3 Commutations rapides de la PWM : avantages et inconvénients

La stratégie PWM se distingue par des commutations de très hautes fréquences comparé à d'autre stratégie notamment à cause de la fréquence élevée des signaux de porteuses, ceci peut se traduire par les nombreux créneaux, ou commutations, entre deux niveaux successifs de tension dans l'onde de sortie de l'onduleur multiniveaux, comme montré sur la figure 2.4 qui représente la sortie du signal de comparaison des deux ondes visualisées précédemment (figure 2.3) [15].

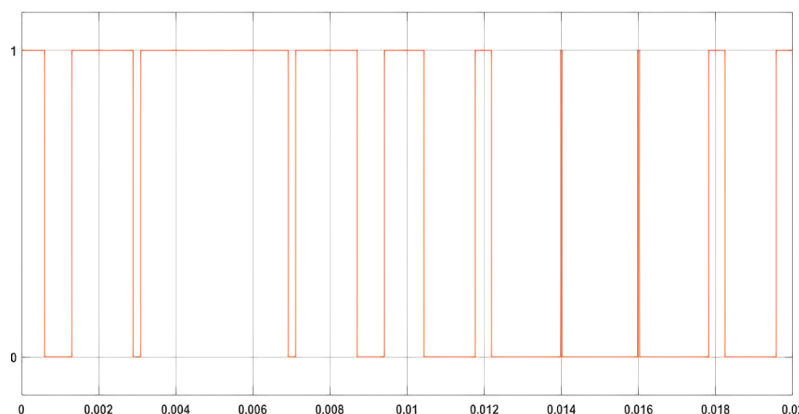


Figure 2.4: Signal de sortie d'une comparaison des signaux: référence/porteuse)

Cela signifie que le signal modulé par PWM change de niveau très fréquemment, contrairement à la modulation NLC (Nearest Level Control) ou SHE (Selective Harmonic



Elimination) où les changements de niveau sont moins fréquents et mieux contrôlés pour réduire les harmoniques. ces commutations rapides peuvent présenter certains avantages mais aussi quelques inconvénients :

**Avantages :**

- **Réduction des harmoniques basses fréquences** Les nombreuses commutations dans la modulation PWM déplacent les harmoniques vers des fréquences plus élevées. Cela facilite le filtrage des harmoniques indésirables, ce qui est bénéfique pour la qualité de la forme d'onde de sortie.

- **Lissage du courant (pour une charge inductive)** Une charge inductive tend à lisser le courant. Cela signifie que les variations rapides de tension dues aux nombreuses commutations de la PWM ne se traduisent pas directement par des variations rapides du courant. L'inductance stocke l'énergie et la libère progressivement, ce qui adoucit les variations du courant.

**Inconvénients :**

- **Bruit électromagnétique (EMI) :** Les nombreuses commutations rapides peuvent générer des interférences électromagnétiques, ce qui peut perturber d'autres équipements électroniques à proximité.

- **Usure des composants** Les commutations fréquentes peuvent entraîner une usure plus rapide des composants de commutation (comme les transistors), ce qui peut réduire leur durée de vie.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, les trois principales stratégies de modulation utilisées pour les onduleurs à treize niveaux ont été explorées en détail : la Selective Harmonic Elimination (SHE), la Pulse Width Modulation (PWM), et la Nearest Level Control (NLC). Chacune de ces techniques présente des principes de fonctionnement uniques, des avantages et des inconvénients spécifiques, ainsi que des applications typiques distinctes.

**La Selective Harmonic Elimination (SHE)** repose sur des équations mathématiques permettant de déterminer les angles de commutation optimaux pour éliminer les harmoniques spécifiques. Cette stratégie offre une réduction efficace des harmoniques et une amélioration de la qualité de la forme d'onde, mais elle nécessite des calculs complexes et est sensible aux variations de paramètres.

**La Pulse Width Modulation (PWM)** est basée sur la modulation de la largeur des impulsions pour contrôler la tension de sortie de l'onduleur. La PWM est appréciée pour sa simplicité de mise en œuvre et sa capacité à produire une forme d'onde de haute qualité avec une faible distorsion harmonique. Cependant, elle peut engendrer des pertes de commutation élevées et des interférences électromagnétiques.

**La Nearest Level Control (NLC)** sélectionne le niveau de tension le plus proche de la référence à chaque instant, simplifiant ainsi le contrôle de l'onduleur. La NLC est facile à implémenter et réduit les pertes de commutation, mais elle peut introduire des erreurs de quantification dues à la discrétisation des niveaux de tension, ce qui peut affecter la précision de la forme d'onde de sortie.

Chaque stratégie de modulation présente des caractéristiques qui les rendent adaptées à différentes applications et contextes. Le choix de la technique appropriée dépend des exigences spécifiques de l'application, telles que la qualité de la forme d'onde, l'efficacité énergétique, et la complexité de mise en œuvre.

Ce chapitre a fourni une base théorique solide pour comprendre les mécanismes et les performances des stratégies de modulation SHE, PWM, et NLC. Cette compréhension est essentielle pour l'analyse comparative approfondie qui sera menée dans les chapitres suivants de ce mémoire. La prochaine étape consiste à appliquer ces concepts dans un cadre de simulation pour évaluer et comparer les performances de ces stratégies en conditions pratiques.

# Chapitre 3: Méthodologie et Outils

## Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons en détail la topologie de l'onduleur Arranged Multicellular Inverter (AMI). Cette topologie innovante combine les avantages des onduleurs multicellulaires à condensateurs volants (FLC) et des ponts H en cascade (CHB), tout en minimisant leurs inconvénients. Nous commencerons par une présentation des concepts de base des topologies FLC et CHB, suivie d'une transition vers la topologie AMI. Nous examinerons ensuite la structure et les avantages de l'AMI, en mettant en lumière son organisation asymétrique des sources de tension et la disposition optimisée des interrupteurs. Par la suite, nous décrirons la modélisation du circuit électrique de l'onduleur AMI à 13 niveaux dans l'environnement MATLAB Simulink, et son intégration dans un système de pompage photovoltaïque. Enfin, nous analyserons en détail les étapes de modélisation de trois stratégies de modulation : Pulse Width Modulation (PWM), Nearest Level Control (NLC), et Selective Harmonic Elimination (SHE).

## 1 L'onduleur AMI (Arranged Multicellular Inverter)

### 1.1 Origine et Évolution de la Topologie Arranged Multicellular Inverter (AMI)

La topologie de l'onduleur arrangé s'inspire à la fois des onduleurs multicellulaires (FLC) et des ponts H en cascade (CHB), d'où son acronyme AMI (Arranged Multicellular Inverter) [1] :

### 1.1.1 Brève introduction aux topologies FLC et CHB

**Flying Capacitor Inverter (FLC) :** La topologie FLC utilise des condensateurs volants pour créer des niveaux de tension intermédiaires. Les condensateurs sont chargés et déchargés de manière à produire les niveaux de tension souhaités à la sortie.

- **Avantages :** Permet de réaliser des onduleurs multiniveaux sans besoin de nombreuses sources DC séparées.
- **Inconvénients :** La gestion des condensateurs volants peut être complexe, nécessitant une surveillance et un équilibrage constants pour éviter les déséquilibres de tension.

**Cascaded H-Bridge Inverter (CHB) :** La topologie CHB consiste en plusieurs ponts H connectés en série, chaque pont H étant alimenté par une source DC distincte. Cette configuration permet de produire une forme d'onde de sortie avec plusieurs niveaux de tension.

- **Avantages :** Simplicité de conception et modularité. Chaque module peut être ajouté ou retiré sans affecter les autres.
- **Inconvénients :** Nécessite de nombreuses sources DC distinctes, ce qui peut augmenter la complexité du système d'alimentation.

### 1.1.2 Transition vers la Topologie AMI

La topologie AMI combine les avantages des FLC et des CHB tout en minimisant leurs inconvénients. Voici comment [1] :

**Réduction du nombre de composants (inspiré de FLC) :** Comme le FLC, l'AMI cherche à minimiser le nombre de composants de puissance en utilisant une configuration intelligente des cellules. Au lieu d'utiliser des condensateurs volants, l'AMI utilise des sources de tension DC asymétriques pour obtenir les niveaux de tension nécessaires, simplifiant ainsi la gestion de l'alimentation.

**Simplicité modulaire (inspiré de CHB) :** Comme le CHB, l'AMI utilise une structure modulaire où chaque étage ou cellule peut être conçu et testé indépendamment. Cependant,

au lieu de nécessiter une source DC pour chaque pont H, l'AMI optimise l'utilisation des sources DC pour réduire le nombre total de d'alimentations DC nécessaires.

## **1.2 Structure Dérivée et Avantages**

### **1.2.1 Organisation des Composants**

Chaque étage de l'AMI est essentiellement un pont H classique, mais avec des sources de tension DC connectées de manière asymétrique et en inverse de polarité par rapport aux étages adjacents. Cela permet de créer des niveaux de tension intermédiaires sans nécessiter de nombreux condensateurs volants ou sources DC.

La figure 3.1 illustre comment transformer un CHB à deux étages en un multicellulaire arrangé, avec l'avantage de supprimer deux interrupteurs. Chaque étage nécessite une source DC, connectée avec une polarité inversée par rapport aux étages voisins. Les interrupteurs de deux étages consécutifs sont également disposés de manière inversée, sans nécessairement fonctionner de manière complémentaire. Cette configuration des interrupteurs et des sources permet d'utiliser des niveaux de tension DC variés et non ordonnés pour chaque alimentation, contrairement à la topologie FLC où il faut respecter un ordre croissant des sources DC successives [1].

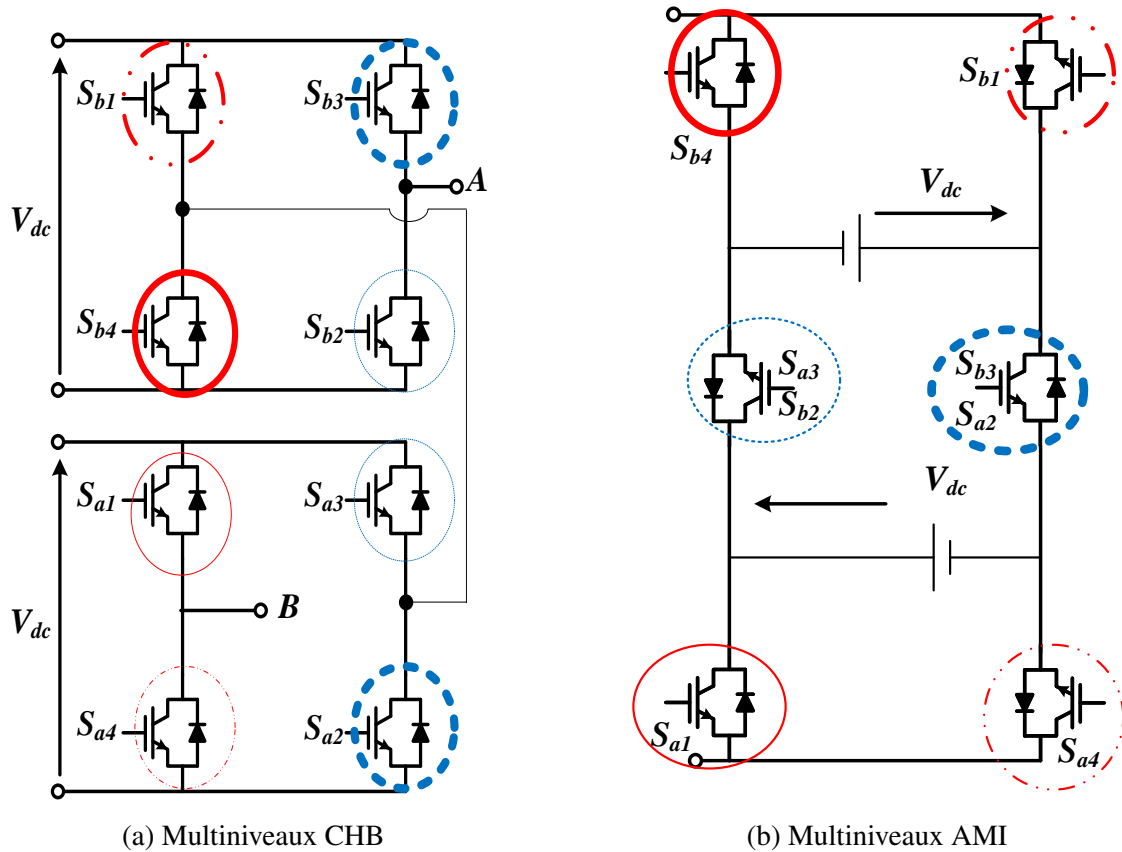


Figure 3.1: Topologies multiniveaux CHB et AMI [1]

### 1.2.2 Asymétrie des Sources de Tension

L'AMI utilise des sources de tension asymétriques :

$$V_1 \neq V_2 \neq \dots \neq V_n$$

Et ce pour générer une large gamme de niveaux de tension de sortie. Cette asymétrie permet d'obtenir des formes d'onde plus complexes et plus précises, améliorant ainsi la qualité de la tension de sortie.

### 1.2.3 Disposition des Interrupteurs

Les interrupteurs sont disposés de manière à éviter les commutations redondantes et à optimiser le flux de puissance. En inversant la polarité des interrupteurs dans les étages successifs, l'AMI réduit les pertes de puissance et simplifie la commande des interrupteurs.

#### 1.2.4 Réduction des Pertes par Commutation

En minimisant le nombre de commutateurs nécessaires et en optimisant leur disposition, l'AMI réduit les pertes par commutation, ce qui améliore l'efficacité globale de l'onduleur. Cette réduction des pertes est un avantage significatif par rapport aux topologies FLC et CHB traditionnelles.

### 1.3 Structure AMI à 13 niveaux

#### 1.3.1 Description de la structure AMI 13 niveaux

La structure de l'onduleur AMI à 13 niveaux se compose de plusieurs étages, chacun étant une cellule H classique. Les sources de tension sont disposées de manière asymétrique avec des valeurs spécifiques de  $V_1 = V_{dc}$ ,  $V_2 = 3V_{dc}$ , et  $V_3 = 2V_{dc}$ , permettant ainsi de générer une tension de sortie avec 13 niveaux distincts, atteignant une tension maximale de  $6V_{dc}$ . Chaque cellule est connectée de manière à inverser la polarité des sources de tension par rapport aux étages adjacents, ce qui simplifie la gestion de l'alimentation et améliore l'efficacité globale. Les interrupteurs dans chaque cellule (représentés par Q1, Q2, ..., Q8) sont organisés pour assurer une commutation efficace et minimiser les pertes. Les interrupteurs de deux étages successifs sont inversés en disposition pour éviter les commutations redondantes et optimiser le flux de puissance [1].

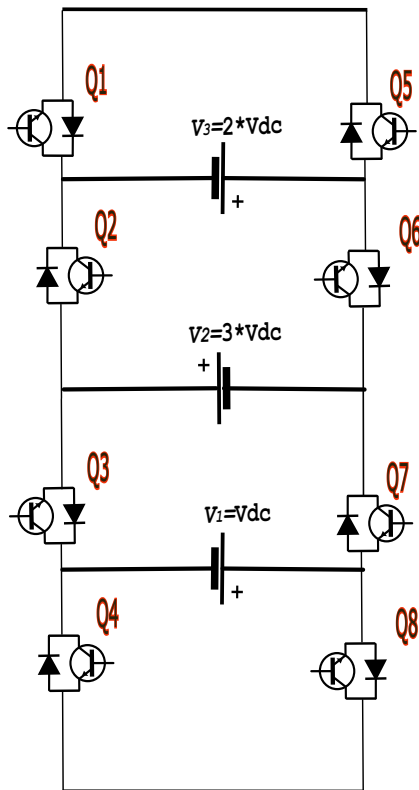


Figure 3.2: Structure monophasée de l'AMI 13 niveaux

L'organisation asymétrique des sources de tension et la disposition optimisée des interrupteurs permettent de produire des formes d'onde plus complexes et plus précises, répondant ainsi aux exigences des applications nécessitant des onduleurs multiniveaux performants.

### 1.3.2 Mode de fonctionnement de l'onduleur AMI 13 niveaux

Le mode de fonctionnement de l'onduleur AMI à 13 niveaux repose sur une séquence de commutation bien définie des interrupteurs pour obtenir les différents niveaux de tension de sortie. La table de commutation suivante montre les états des interrupteurs pour chaque niveau de tension produit par l'onduleur. Les interrupteurs sont contrôlés de manière à additionner ou soustraire les tensions des sources  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$ , créant ainsi une forme d'onde de sortie avec 13 niveaux distincts.

Cette table de commutation permet de générer les différents niveaux de tension en contrôlant précisément l'état des interrupteurs.



Tableau 3.1: Table de commutations des interrupteurs pour la structure de l'onduleur AMI à 13 niveaux [1]

Niveaux de tension	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
$V_1 + V_2 + V_3$	1	0	1	0	0	1	0	1
$V_1 + V_2$	1	0	1	1	0	1	0	0
$V_2 + V_3$	0	0	1	0	1	1	0	1
$V_3$	1	1	1	0	0	0	0	1
$V_2$	0	0	1	1	1	1	0	0
$V_1$	1	0	0	0	0	1	1	1
0	1	1	1	1	0	0	0	0
$-V_1$	0	1	1	1	1	0	0	0
$-V_2$	1	1	0	0	0	0	1	1
$-V_3$	0	0	0	1	1	1	1	0
$-(V_2 + V_3)$	1	1	0	1	0	0	1	0
$-(V_1 + V_2)$	0	1	0	0	1	0	1	1
$-(V_1 + V_2 + V_3)$	0	1	0	1	1	0	1	0

### 1.3.3 Structure triphasée de l'AMI 13 niveaux

La structure triphasée de l'onduleur AMI à 13 niveaux suit un principe similaire à la version monophasée, mais elle est étendue pour inclure trois phases décalées de 120 degrés. Chaque phase est composée de cellules H avec des sources de tension asymétriques et des interrupteurs disposés pour minimiser les pertes par commutation. Cette configuration permet de produire une forme d'onde de sortie équilibrée et de haute qualité pour les applications triphasées.

La structure triphasée de l'AMI offre une flexibilité et une modularité améliorées, ce qui la rend adaptée pour diverses applications industrielles et de distribution d'énergie.

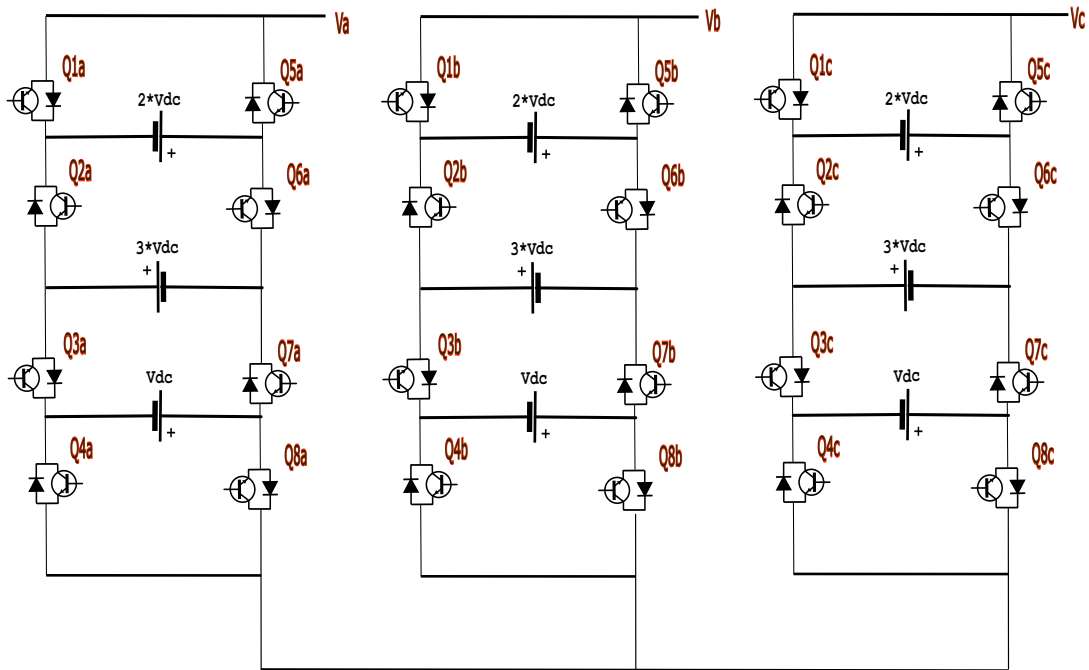


Figure 3.3: Circuit électrique triphasé de la structure AMI à 13 niveaux [1]

## 2 Modélisation du circuit électrique de l'onduleur AMI à 13 niveaux

Dans cette section, nous présentons la modélisation de l'onduleur AMI à 13 niveaux en utilisant l'environnement MATLAB Simulink. La modélisation permet de simuler le comportement de l'onduleur et de vérifier son fonctionnement avant la mise en œuvre pratique.

Le schéma de modélisation de l'onduleur AMI à 13 niveaux dans MATLAB Simulink (figure 3.4) illustre les différents composants et leur interconnexion pour simuler le comportement de l'onduleur.

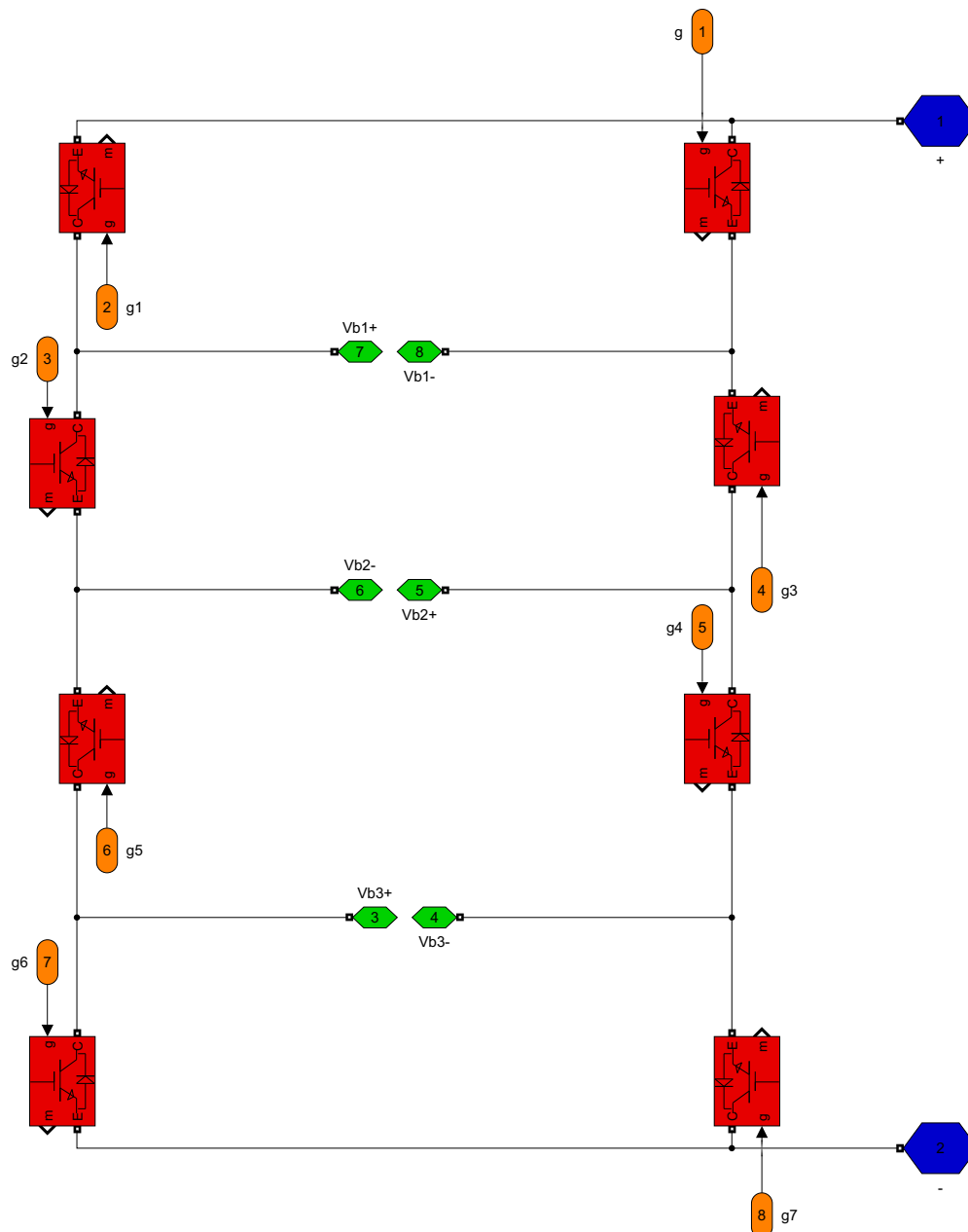


Figure 3.4: Schéma de modélisation de l'onduleur AMI à 13 niveaux dans MATLAB Simulink

Les composants principaux du modèle comprennent les sources de tension qui sont modélisées pour fournir les niveaux de tension nécessaires. Les interrupteurs utilisés dans ce modèle sont des IGBT/diodes, qui sont modélisés pour contrôler la commutation et produire les différents niveaux de tension de sortie. Une charge est également connectée à la sortie de l'onduleur pour observer la réponse de celui-ci.

### **3 Modélisation de l'intégration de l'onduleur AMI dans un système de pompage photovoltaïque**

#### **3.1 Modèle généralisé du système de pompage photovoltaïque**

Un système de pompage solaire photovoltaïque est constitué de plusieurs composants clés travaillant ensemble pour transformer l'énergie solaire en énergie mécanique utilisée pour le pompage de l'eau. Les panneaux solaires convertissent la lumière du soleil en électricité continue, optimisée ensuite par un dispositif de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour extraire le maximum de puissance des panneaux. Un convertisseur boost est ensuite employé pour élever la tension continue à un niveau approprié, permettant d'alimenter un moteur asynchrone. Ce moteur entraîne une pompe pour le pompage de l'eau. Un onduleur est nécessaire pour convertir l'électricité continue en électricité alternative, assurant ainsi le fonctionnement du moteur asynchrone et, si besoin, la synchronisation avec le réseau électrique.

Dans notre cas, l'adoption de l'onduleur multicellulaire arrangé (AMI) à 13 niveaux apporte des avantages techniques notables par rapport aux onduleurs traditionnels à trois niveaux. En premier lieu, l'AMI à 13 niveaux offre une qualité d'énergie supérieure en produisant une onde sinusoïdale de tension plus lisse et plus proche de l'idéal. Cette amélioration de la qualité de l'onde permet de réduire les harmoniques et les pertes associées, garantissant ainsi un fonctionnement plus fluide et fiable du moteur asynchrone.

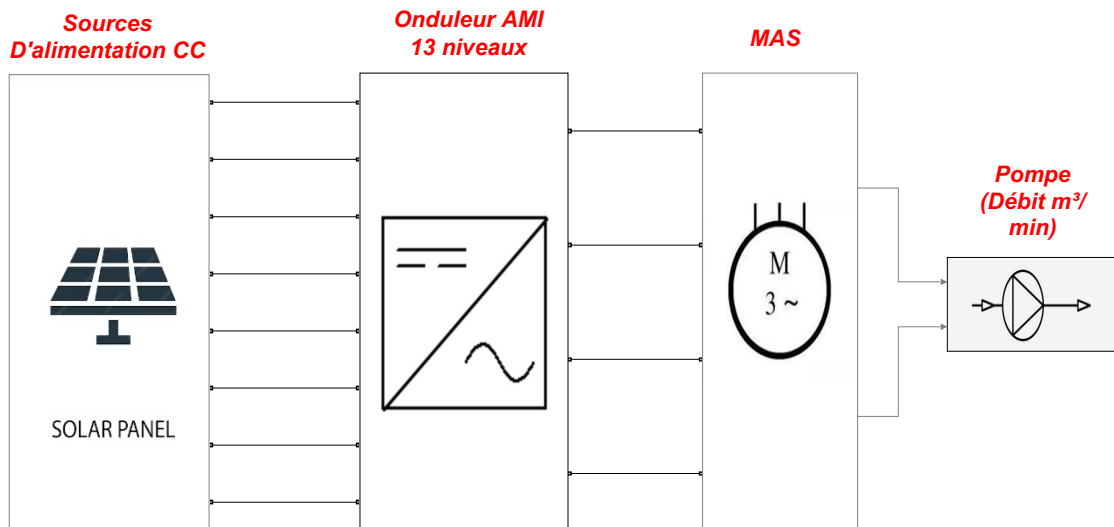


Figure 3.5: Modèle SIMULINK de l'onduleur multiniveaux intégré au système de pompage photo-voltaïque

### 3.2 Modélisation des modules PV

Pour modéliser le module photovoltaïque dans MATLAB/Simulink, nous avons opté pour l'utilisation du bloc "PV array". Cette décision a été prise afin de simplifier le modèle et d'éviter la complexité et les ralentissements potentiels du processus de simulation, souvent causés par l'intégration laborieuse des convertisseurs dans Simulink. L'utilisation de ce bloc n'affecte en rien l'efficacité du composant dans notre système. En effet, ce bloc permet l'intégration des paramètres adéquats du module solaire (tableau 3.2), garantissant ainsi un fonctionnement optimal et une simulation fidèle aux conditions réelles.

Module	Sunny International Power SPM-220PB204
Puissance maximale (W)	220.4
Nombre de cellules par module (Ncell)	60
Tension en circuit ouvert Voc (V)	36.44
Courant de court-circuit Isc (A)	8
Tension au point de puissance maximale Vmp (V)	29
Courant au point de puissance maximale Imp (A)	7.6
Coefficient de température de Voc (%/°C)	-0.388
Coefficient de température de Isc (%/°C)	0.0397

Tableau 3.2: Paramètres du module PV Sunny International Power SPM-220PB204

### 3.2.1 Maximum power point tracker

Le MPPT est le point où le panneau solaire produit le plus de puissance compte tenu de la luminosité, de la température et d'autres facteurs environnementaux. Le système MPPT a donc été inclus dans notre modèle dans le but d'optimiser l'efficacité énergétique du panneau solaire. La stratégie utilisée est la méthode  $P\&O$  (Perturb and Observe).

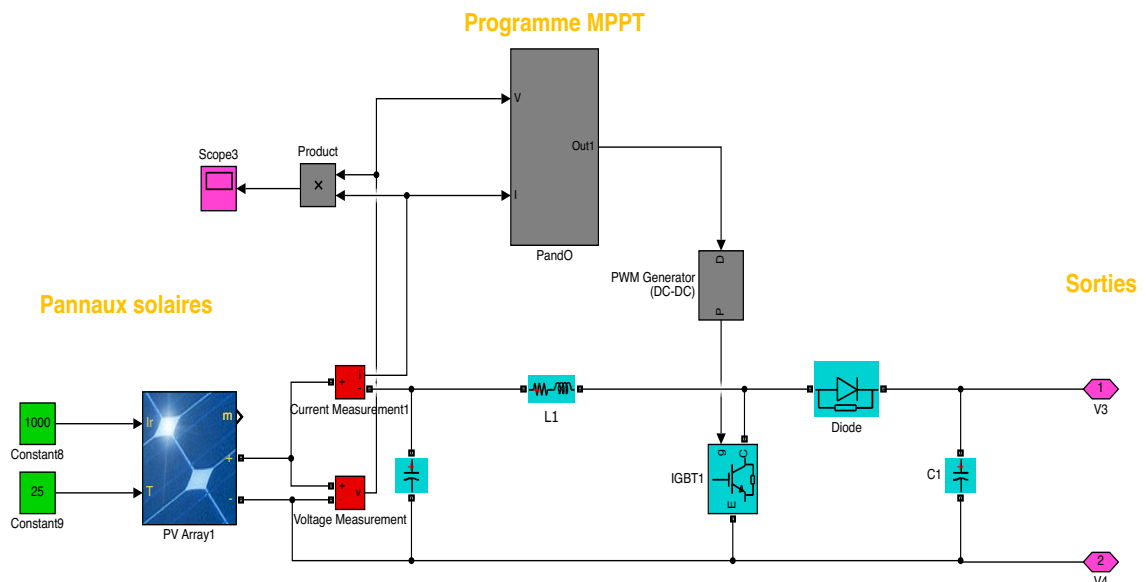


Figure 3.6: Modèle Simulink du raccordement du MPPT avec le PV

### 3.3 Modélisation d'une MAS alimentant une pompe

Pour la modélisation de la Machine Asynchrone (MAS), nous avons opté pour l'utilisation du bloc disponible dans la bibliothèque de MATLAB/Simulink. Les paramètres de la machine ont été réglés pour assurer des raccordements et des résultats adéquats. La pompe reliée à cette machine est ainsi alimentée par la vitesse du moteur, fournissant un certain volume d'eau.

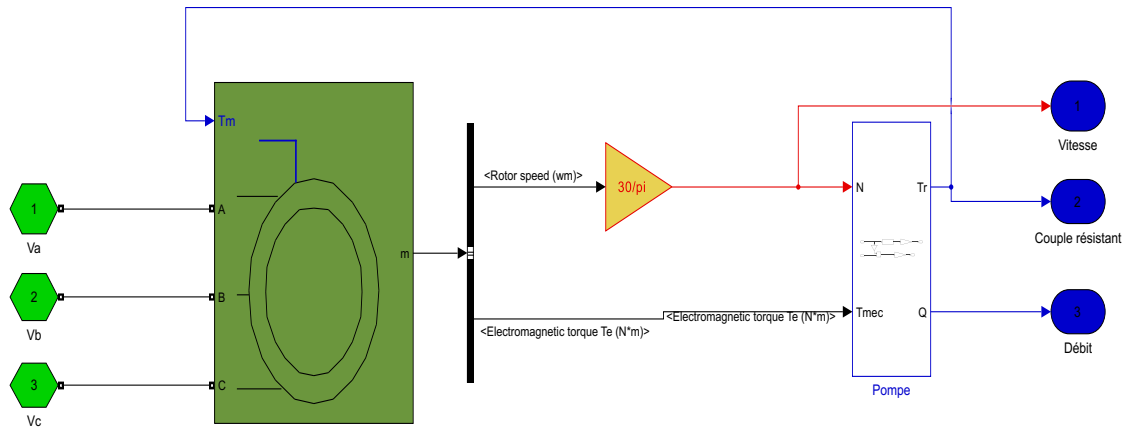


Figure 3.7: Modèle Simulink de la MAS

La pompe reliée à cette machine est ainsi alimentée par la vitesse du moteur, fournissant un certain volume d'eau.

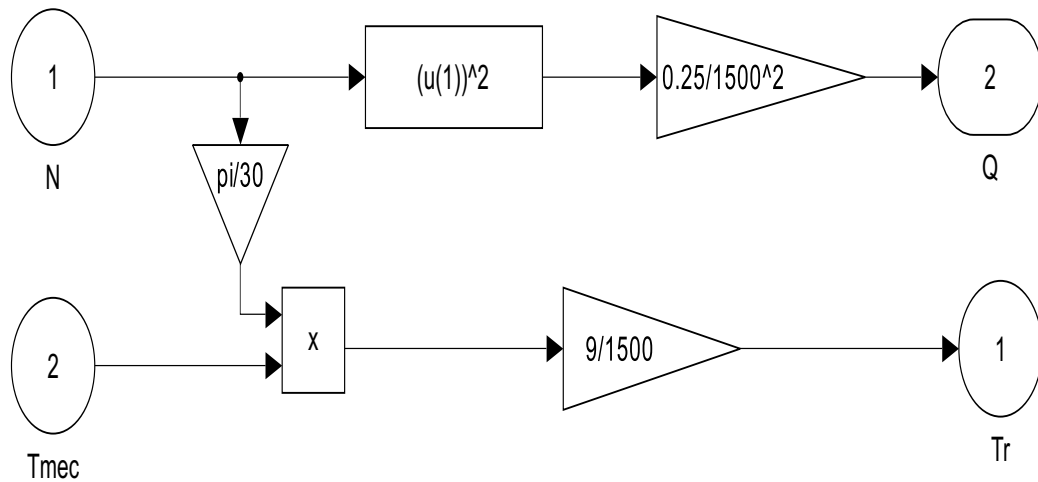


Figure 3.8: Modèle Simulink de la pompe

Avec :

$$Q = N^2 \times \frac{0.25}{1500^2} \quad (3.1)$$

où :

- $Q$  est le débit de la pompe.
- $N$  est la vitesse de la machine asynchrone (MAS) en tours par minute (tr/min).

$$Tr = N \times \frac{\pi}{30} \times T_{mec} \times \frac{9}{1500} \quad (3.2)$$

où :

- $Tr$  est le couple résistant appliqué à la pompe.
- $T_{mec}$  est le couple mécanique appliqué à la pompe.

## 4 Modélisation des trois stratégies de modulation

### 4.1 Modélisation de la stratégie Nearest Level Control (NLC)

Pour l'adaptation de cette stratégie sur le logiciel MATLAB, nous avons d'abord créé et exécuté un programme qui permet le calcul des angles de commutations, pour ensuite implémenter ces résultats dans un modèle SIMULINK impliquant l'onduleur AMI à 13 niveaux.

Pour moduler la sortie de l'onduleur, nous utilisons un signal sinusoïdal de référence défini par une amplitude égale 1 et une fréquence de 50Hz.

Les niveaux de tension de l'onduleur à 13 niveaux sont définis par des valeurs fractionnaires de la tension de sortie max de l'onduleur. Ces niveaux sont : 1/12, 3/12, 5/12, 7/12, 9/12, et 11/12 de la tension maximale. Chaque niveau représente une étape de la tension de sortie de l'onduleur.

Les angles de commutation sont calculés en détectant les points d'intersection entre le signal sinusoïdal de référence et les niveaux de tension prédéfinis. Ce processus implique une interpolation linéaire pour déterminer avec précision les instants où le signal sinusoïdal croise chaque niveau de tension. Les intersections entre la référence et les niveaux élaborés sur un quart de période sont représentées sur la figure 3.9.

Les angles de commutation calculés sont ensuite appliqués dans un modèle Simulink pour générer le signal de sortie de l'onduleur à 13 niveaux. Pour chaque angle de commutation, un signal de sortie trivalué est généré. Par exemple, pour un angle  $\theta_1$ , le signal est défini comme suit :

- Le signal est égal à 1 si  $\theta_1 < t < 0.01 - \theta_1$ .
- Le signal est égal à -1 si  $0.01 + \theta_1 < t < 0.02 - \theta_1$ .



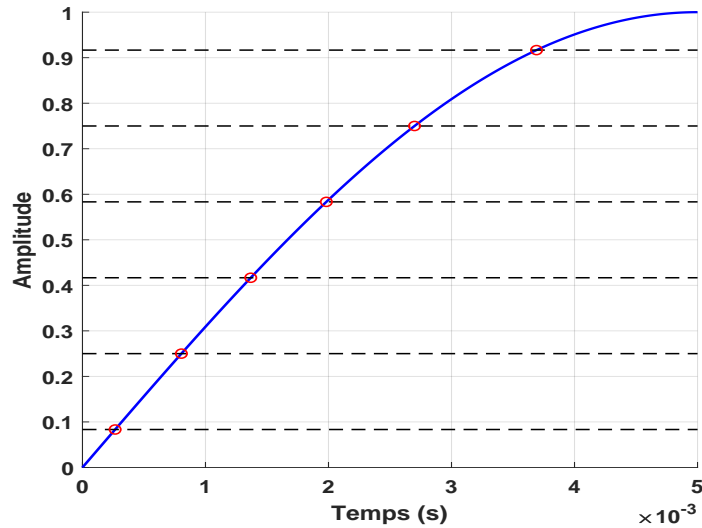


Figure 3.9: Intersections signal de référence et niveau d'amplitude

La figure 3.10 met en évidence le résultat de l'allure de ce signal pour un angle  $\theta$  prédéfini.

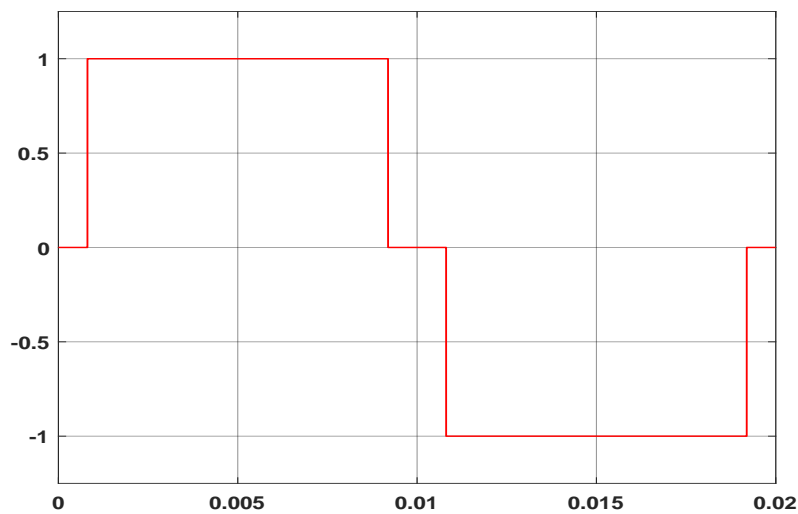


Figure 3.10: Allure de sortie pour l'application d'un seul angle de commutation-NLC

Cette procédure est répétée pour les six angles de commutation. En additionnant les signaux obtenus pour chacun des angles, nous générons un signal de sortie à 13 niveaux avec des amplitudes variant de -6 à 6 tel qu'affiché sur la figure 3.11 . Ce signal de sortie est ensuite utilisé pour commander les interrupteurs de l'onduleur, en assurant que la forme d'onde de sortie suit étroitement le signal sinusoïdal de référence comme illustré sur la figure 3.12

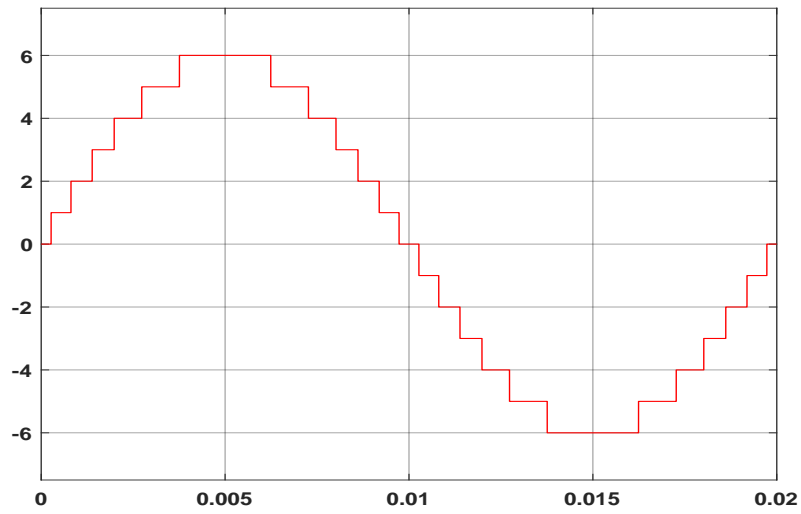


Figure 3.11: Allure de sortie pour l'application et la somme de tous les angles commutation-NLC

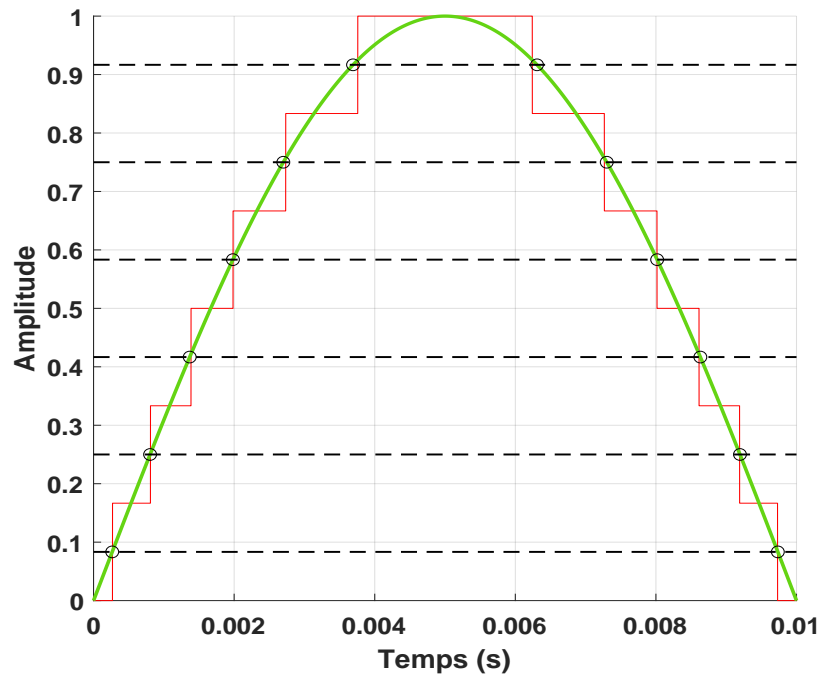


Figure 3.12: Superposition des niveaux résultants et l'onde de référence

La figure 3.13 représente le modèle SIMULINK de la stratégie NLC.

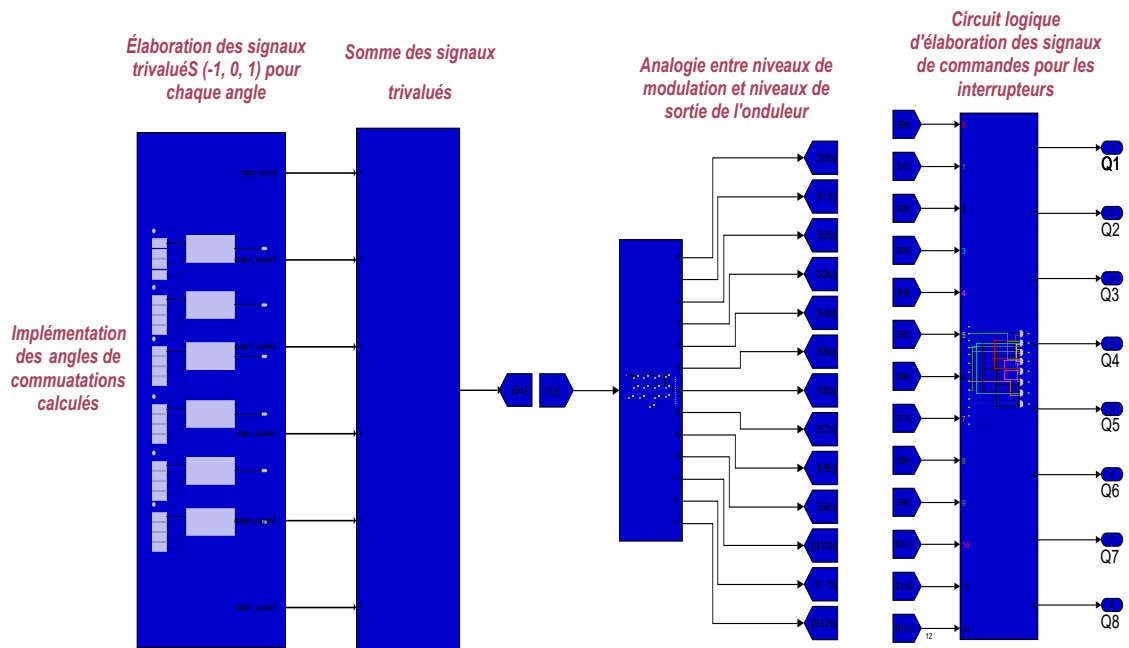


Figure 3.13: Modèle SIMULINK de la modulation NLC

## 4.2 Modélisation de la stratégie Selective Harmonic Elimination (SHE)

Toutes les étapes de la modélisation de la stratégie de modulation Selective Harmonic Elimination (SHE) pour un onduleur multiniveaux à 13 niveaux sont les mêmes que celles de la stratégie **NLC**, à l'exception du calcul des angles de commutation.

Le calcul des angles de commutation pour la stratégie **SHE** est effectué en résolvant un système d'équations non linéaires visant à éliminer certains harmoniques spécifiques de l'onde de sortie tout en maintenant la composante fondamentale de la tension de sortie. Ces équations ont été résolues en utilisant la aussi un programme MATLAB qui suit des étapes bien définies :

Les équations utilisées pour calculer les angles de commutation sont les suivantes :

$$F_1(\theta) = \sum \cos(\theta) - 6M = 0$$

$$F_2(\theta) = \sum \cos(3\theta) = 0$$

$$F_3(\theta) = \sum \cos(5\theta) = 0$$

$$F_4(\theta) = \sum \cos(7\theta) = 0$$

$$F_5(\theta) = \sum \cos(9\theta) = 0$$

$$F_6(\theta) = \sum \cos(11\theta) = 0$$

Ces équations sont résolues simultanément pour trouver les angles  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$  qui éliminent les harmoniques impairs jusqu'à l'ordre 11 inclus tout en maintenant la composante fondamentale à la valeur désirée.

### Paramètres de Base

- Vdc : Tension continue de l'onduleur.
- V1 : Composante fondamentale de la tension.
- M : Indice de modulation.

et

$$M = \frac{2sV_{dc}}{\pi V_1}$$

Où  $s$  est le nombre de niveaux de l'onduleur moins un (pour un onduleur à 13 niveaux,  $s=12$ ).

Les angles de commutation initiaux sont estimés de manière heuristique. Pour notre cas, les angles initiaux sont choisis comme  $\theta_0 = \left[ \frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{3}, \frac{5\pi}{12} \right]$ .

Ensuite, les angles de commutation optimaux sont calculés en résolvant un système d'équations non linéaires. Ce système est formulé de manière à ce que la somme des cosinus des angles multiples (3, 5, 7, 9, 11 fois les angles) soit nulle, éliminant ainsi les harmoniques correspondants. La somme des cosinus des angles simples est ajustée pour atteindre six fois l'indice de modulation.

La méthode de Newton-Raphson (implémentée via `fsolve` en MATLAB) est utilisée pour résoudre le système d'équations non linéaires. Cette méthode itérative ajuste les

angles initiaux pour minimiser l'erreur des équations.

Les angles optimisés doivent être compris dans l'intervalle  $[0, \frac{\pi}{2}]$ . Si les angles calculés ne respectent pas cette condition, ils sont réajustés ou recalculés.

Après le calcul des six (6) angles de commutation, c'est maintenant, exactement le même processus que celui de **NLC** (figure 3.13) qui va être appliqué :

Une fois les angles de commutation optimisés calculés, ils sont appliqués dans un modèle Simulink pour générer le signal de sortie de l'onduleur à 13 niveaux. Pour chaque angle de commutation, un signal de sortie est généré (figure 3.14 ):

- Le signal est égal à 1 si  $\theta < t < 0.01 - \theta$ .
- Le signal est égal à -1 si  $0.01 + \theta < t < 0.02 - \theta$ .
- Le signal est égal à 0 sinon.

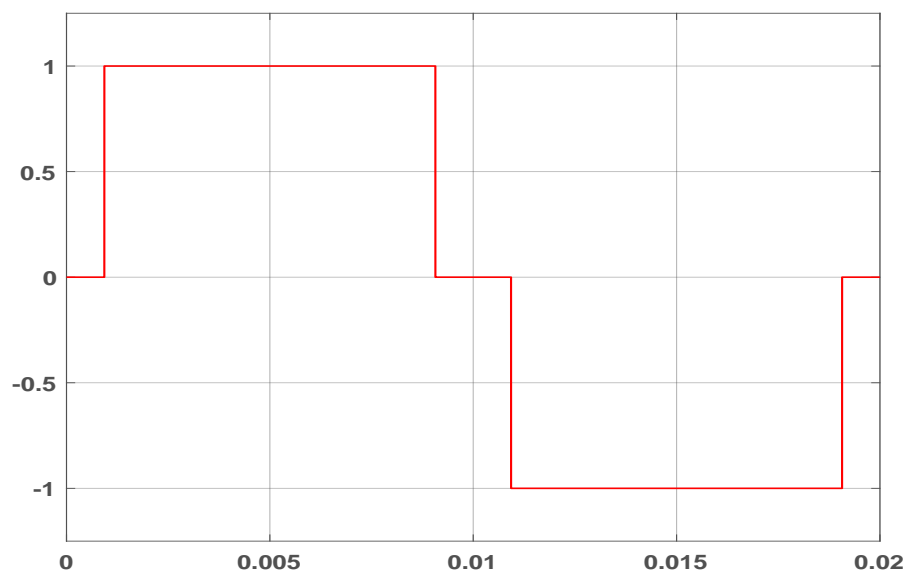


Figure 3.14: Allure de sortie pour l'application d'un seul angle de commutation-SHE

Et comme pour la **NLC**, cette procédure est répétée pour les six angles de commutation. En additionnant les signaux obtenus pour chacun des angles, nous générons un signal de sortie à 13 niveaux avec des amplitudes variant de -6 à 6 illustré sur la figure 3.15. Ce signal de sortie est ensuite utilisé pour commander les interrupteurs de l'onduleur, en assurant que la forme d'onde de sortie suit étroitement le signal sinusoïdal de référence tout en éliminant les harmoniques spécifiés.

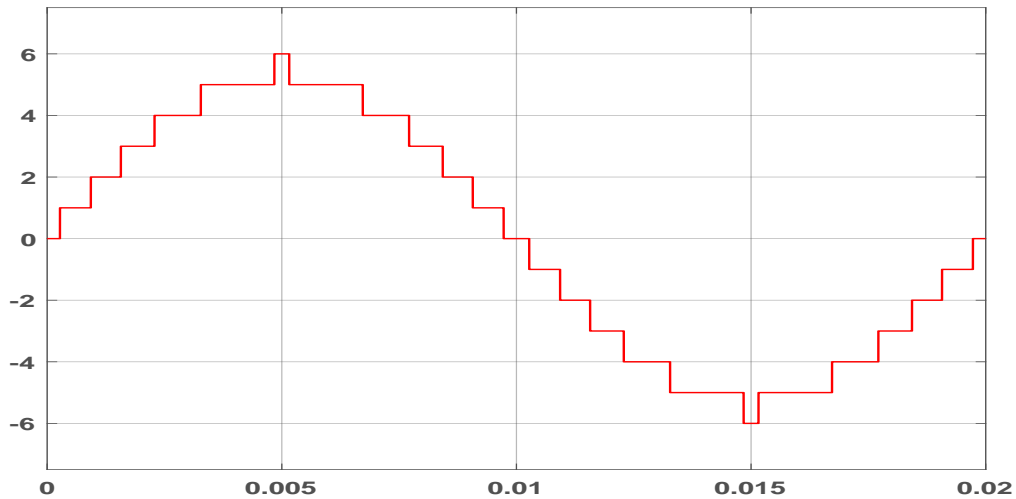


Figure 3.15: Allure de sortie pour l'application et la somme de tous les angles commutation-SHE

### 4.3 Modélisation de la stratégie Pulse Width Modulation (PWM)

La stratégie de modulation PWM est la technique de modulation la plus connue pour les convertisseurs, pour les onduleurs conventionnels comme pour les onduleurs multiniveaux. Le principe de fonctionnement de cette stratégie ainsi que les équations la régissant ont été expliqués en détails dans la partie 3.

Comme mentionné dans le paragraphe 2.3.2, il existe plusieurs techniques de la PWM, pour notre travail, c'est la PSPWM (Phase Shifted Pulse Width Modulation) qui a été choisie, Elle se distingue par la configuration de ses porteuses, qui sont alignées horizontalement et décalées en phase. Pour un onduleur à 13 niveaux, 12 signaux de porteuse sont utilisés, chacun étant décalé en phase par rapport aux autres de  $\frac{360^\circ}{12}$  comme montré sur la figure 3.16, Le signal de référence est ensuite comparé à ces signaux de porteuse pour générer les impulsions de commande. Cette technique offre plusieurs avantages, notamment une répartition égale des commutations entre les niveaux, ce qui réduit le stress sur les composants et améliore leur durée de vie, ainsi qu'une réduction de la distorsion harmonique, produisant généralement une sortie de meilleure qualité.

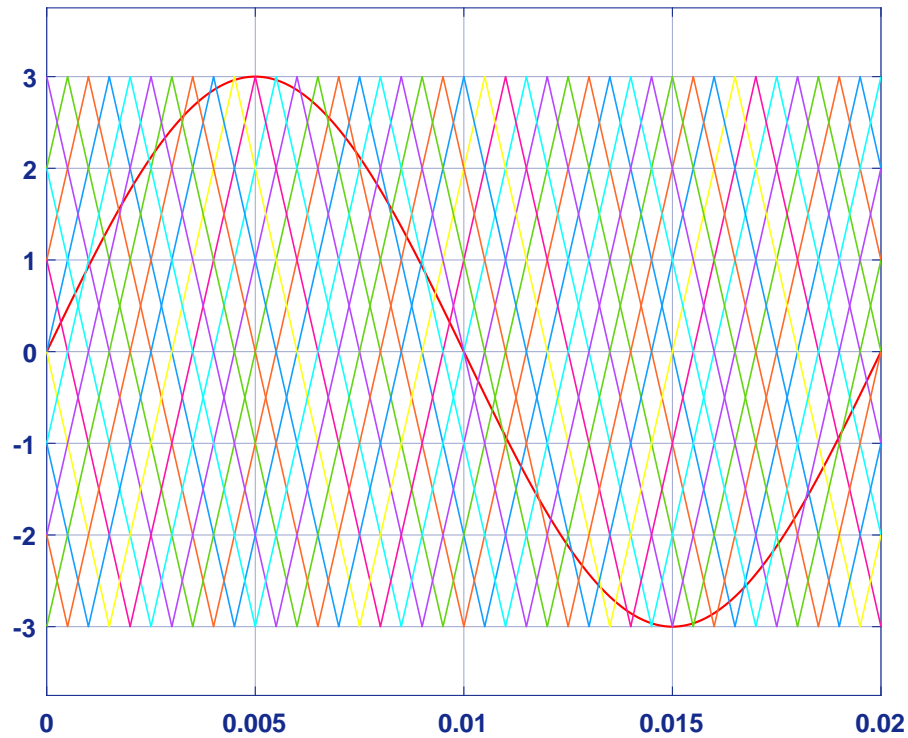


Figure 3.16: Ondes référence et porteuses de la PSPWM

La comparaison des signaux triangulaires avec l'onde de références donne des signaux variant entre 0 et 1 en fonction de la disposition du signal sinusoïdale et des porteuses triangulaires, a titre d'exemple, la figure 3.17 est le résultat de la comparaison de l'onde de référence avec l'un des signaux triangulaire.

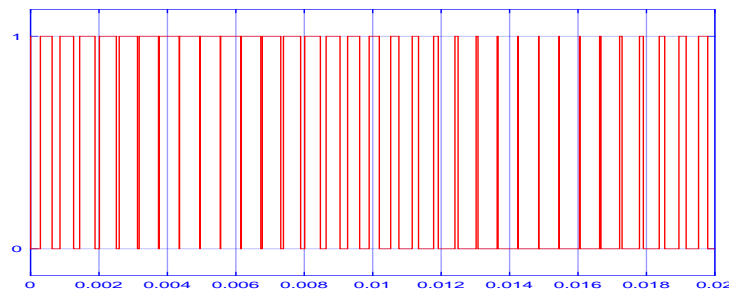


Figure 3.17: Sortie du comparateur Référence/Porteuse

En additionnant les sorties de comparaisons de toutes les porteuses triangulaires, nous obtenons un signal combinant 13 niveaux d'amplitudes ( de 0 a 12 ) comme illustré sur la figure 3.18, ce résultat sera utilisé afin de réaliser une analogie entre ces 13 niveaux et les étages de tension de sortie de l'onduleur AMI.

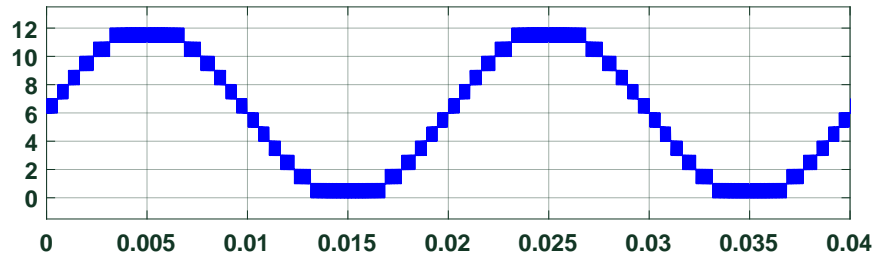


Figure 3.18: Somme des signaux des comparateurs

Nous avons mis en point cette analogie en réalisant un circuit logique avec les niveaux d'amplitudes de la somme des signaux de comparaisons comme entrée, et les signaux de commandes des commutateurs de l'onduleur AMI 13 niveaux comme sorties.

La figure 3.19 représente une vue d'ensemble du modèle SIMULINK de notre modélisation de la stratégie PSPWM.

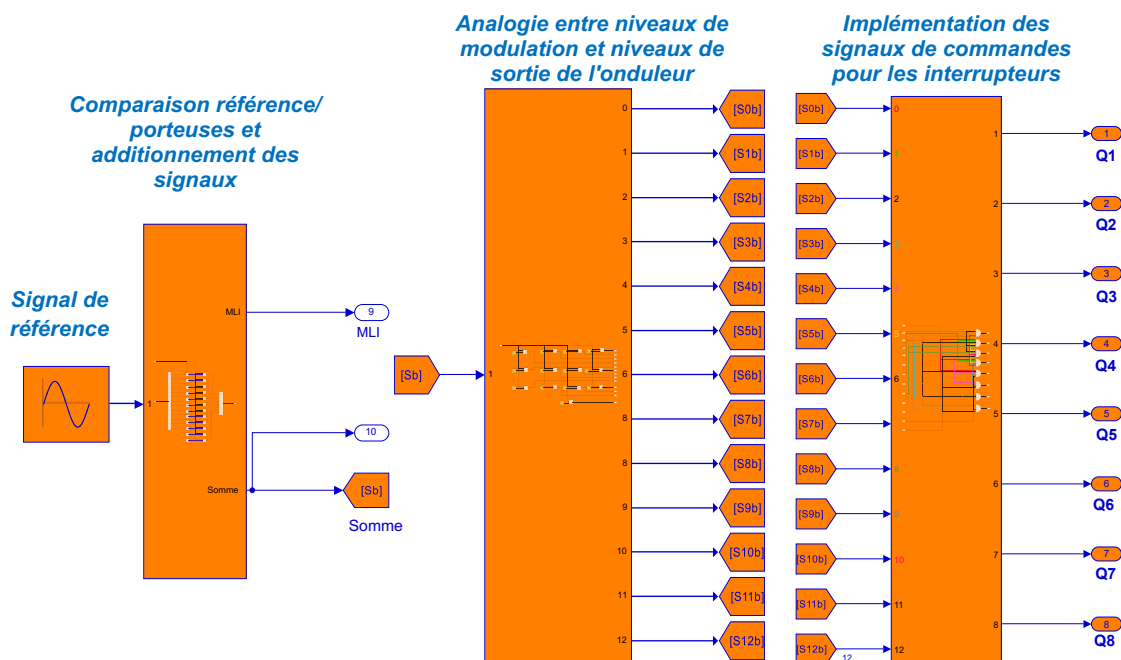


Figure 3.19: Modèle Simulink de la PSPWM

## Conclusion

Ce chapitre a fourni une analyse détaillée de la topologie de l'onduleur Arranged Multicellular Inverter (AMI), démontrant comment cette topologie parvient à intégrer les avantages des onduleurs FLC et CHB tout en minimisant leurs inconvénients. La transition vers l'AMI s'est révélée bénéfique en termes de réduction du nombre de composants nécessaires et de



simplification de la gestion des sources de tension grâce à son organisation asymétrique et modulaire.

La structure AMI a été efficacement modélisée dans MATLAB Simulink, permettant de simuler et de vérifier son fonctionnement avant une mise en œuvre pratique conceptualisée par son l'intégration de l'AMI dans un système de pompage photovoltaïque.

Ce chapitre a également fourni une analyse approfondie des étapes de modélisation des trois stratégies de modulation principales pour un onduleur AMI à 13 niveaux : Phase-Shifted Pulse Width Modulation (PSPWM), Nearest Level Control (NLC), et Selective Harmonic Elimination (SHE).

Pour la stratégie PSPWM, nous avons utilisé des signaux de porteuse alignés horizontalement et décalés en phase. Cette méthode a permis de générer un signal combiné de 13 niveaux en comparant les signaux de référence sinusoïdaux avec les signaux de porteuse. La stratégie NLC a été modélisée en calculant les angles de commutation optimaux pour générer les différents niveaux de tension. En détectant les points d'intersection entre le signal sinusoïdal de référence et les niveaux de tension prédéfinis, nous avons pu élaborer une séquence de commutation précise. Cette approche a démontré son efficacité pour obtenir une forme d'onde de sortie avec des niveaux de tension bien définis et une réduction significative des harmoniques.

Enfin, la stratégie SHE a été modélisée en résolvant un système d'équations non linéaires pour éliminer des harmoniques spécifiques tout en maintenant la composante fondamentale de la tension de sortie. Cette méthode a permis de générer une forme d'onde de sortie propre avec une réduction notable des harmoniques indésirables, soulignant la capacité de la SHE à améliorer la qualité de l'énergie.

La modélisation des différentes stratégies de modulation a donc révélé des niveaux de complexité variés. La stratégie PSPWM s'avère être la plus complexe en raison de la nécessité de générer et gérer douze signaux de porteuses triangulaires déphasés. En revanche, les stratégies NLC et SHE sont plus simples à implémenter, nécessitant uniquement l'application des angles de commutation calculés via des programmes MATLAB. Cette différence de complexité est essentielle pour évaluer la faisabilité et l'efficacité des différentes stratégies de modulation dans les onduleurs multiniveaux.

# Chapitre 4: Résultats et Interprétations

Le chapitre présent est dédié à l'analyse comparative des performances de trois stratégies de modulation appliquées à un onduleur multiniveaux à 13 niveaux, à savoir la modulation par largeur d'impulsion (PWM), la modulation Nearest Level Control (NLC), et la modulation Selective Harmonic Elimination (SHE). Ces stratégies ont été modélisées et simulées dans un système de pompage photovoltaïque. Chaque stratégie présente des caractéristiques uniques en termes de qualité de forme d'onde, de distorsion harmonique et d'efficacité globale. L'objectif de ce chapitre est de modéliser chaque stratégie en détail, de simuler leurs performances et de comparer les résultats obtenus pour différentes grandeurs telles que les tensions, les courants, la vitesse de la machine asynchrone et le débit d'eau de la pompe.

## 1 Visualisations, interprétations et comparaisons des résultats des simulations pour les trois stratégies

Les paramètres de la source d'alimentation continue (panneaux PV) sont présentés sur le tableau 3.2.

Les caractéristiques de la MAS sont définies comme suit : la fréquence est de 50 Hz, la puissance nominale est de 4 kW et la tension entre phases est de 400 V.

La valeur de l'indice de modulation pour la stratégie PWM est choisie comme suit :

$$m_a = \frac{V_{ref}}{V_m}, \text{ où } V_{ref} = 5.99 \text{ et } V_m = 6. \text{ Ainsi, } m_a = \frac{5.99}{6} \approx 0.9983.$$

Pour un indice de modulation de  $M = 0.996$ , les angles de commutation calculés par le programme adapté de la stratégie NLC sont :  $\theta_1 = 4.78026^\circ$ ,  $\theta_2 = 14.47758^\circ$ ,  $\theta_3 = 24.62400^\circ$ ,  $\theta_4 = 35.68500^\circ$ ,  $\theta_5 = 48.59100^\circ$  et  $\theta_6 = 66.44340^\circ$ .

Pour un indice de modulation de  $M = 0.69$ , les angles de commutation calculés par le programme adapté de la stratégie SHE sont :  $\theta_1 = 4.8971^\circ$ ,  $\theta_2 = 16.7500^\circ$ ,  $\theta_3 = 28.2667^\circ$ ,

$\theta_4 = 41.1792^\circ$ ,  $\theta_5 = 58.9545^\circ$  et  $\theta_6 = 87.1940^\circ$ .

## 1.1 Tensions simples et composées des trois stratégies

### 1.1.1 Tensions Simples Triphasées

Pour comparer les performances des trois stratégies de modulation (NLC, SHE et PWM), nous analysons les tensions simples triphasées  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$  à la sortie de l'onduleur. Les figures ci-dessous présentent les tensions simples pour chaque stratégie.

**Tensions Simples - NLC :** Les tensions simples  $V_a$ ,  $V_b$ , et  $V_c$  (figure 4.1) présentent une forme d'onde relativement lisse avec des transitions entre les niveaux de tension. La modulation NLC permet des transitions progressives, réduisant ainsi les pics de commutation et améliorant la qualité de la forme d'onde.

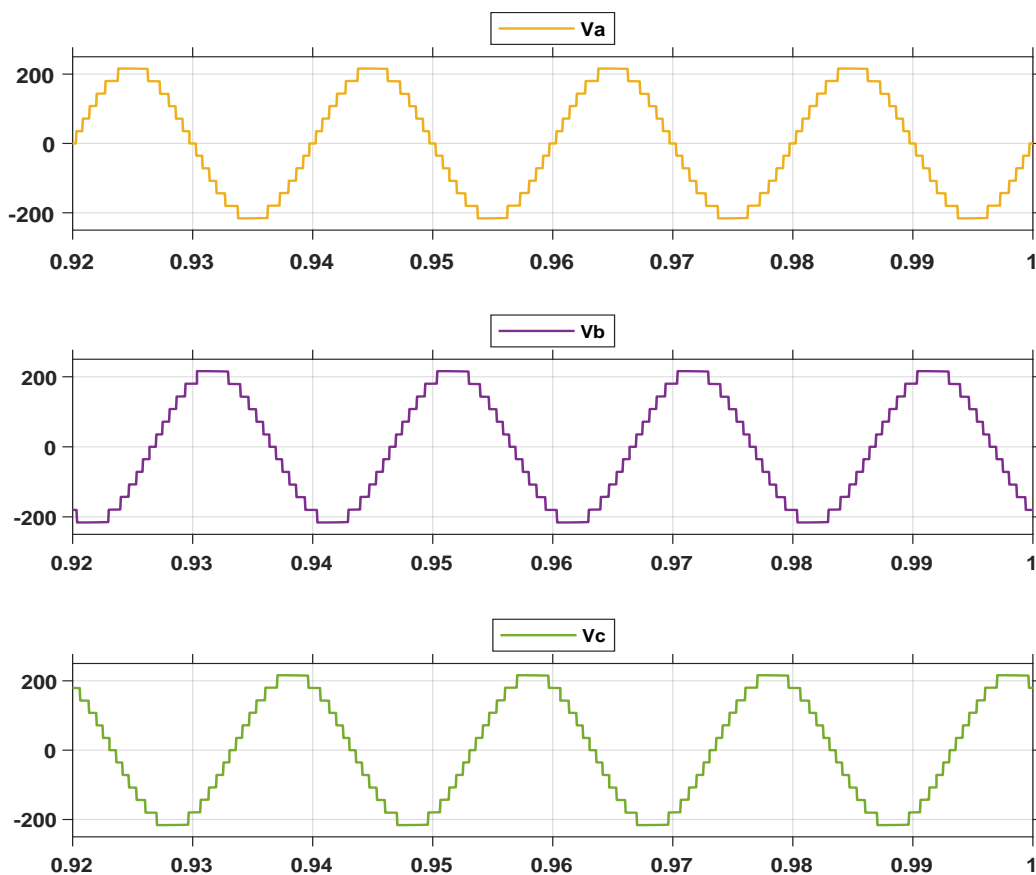


Figure 4.1: Tensions Simples - NLC

**Tensions Simples - SHE :** Les tensions  $V_a$ ,  $V_b$ , et  $V_c$  (figure 4.2) montrent également une forme d'onde lisse, similaire à celle obtenue avec NLC, mais avec des transitions plus marquées. La modulation SHE est conçue pour éliminer spécifiquement les harmoniques d'ordre inférieur (3, 5, 7, 9 et 11), ce qui améliore la qualité globale de la forme d'onde.

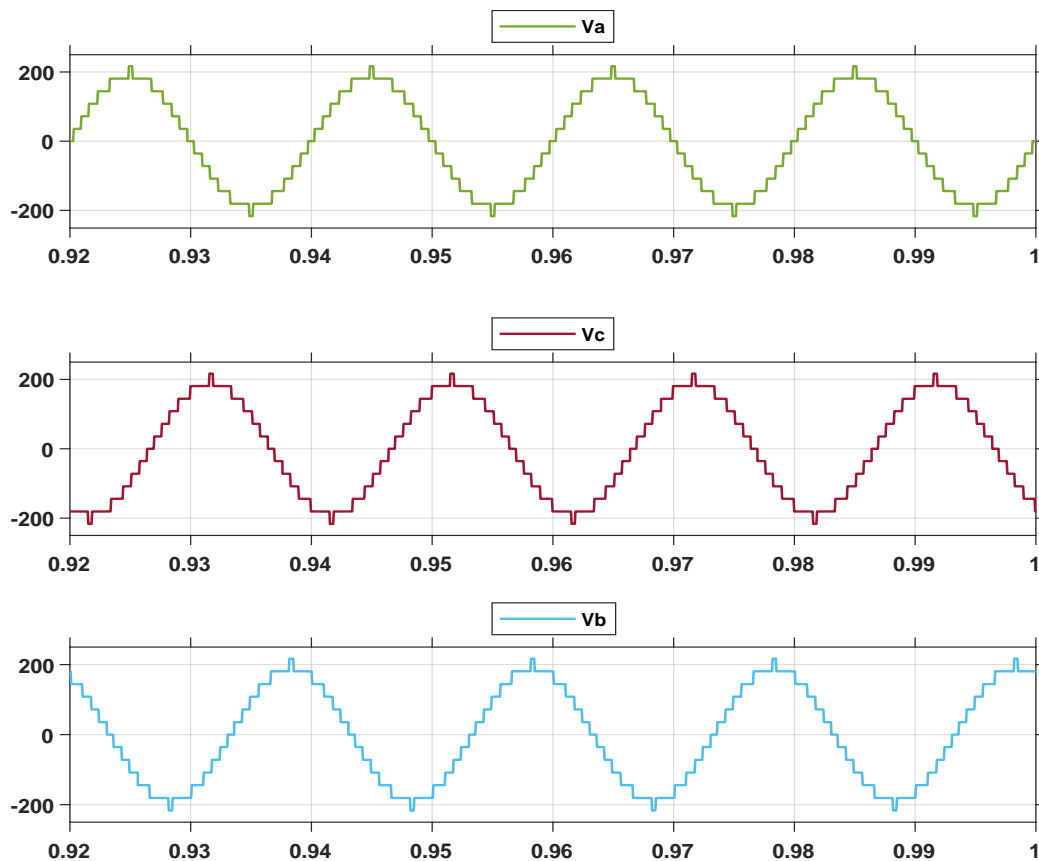


Figure 4.2: Tensions Simples - SHE

**Tensions Simples - PWM :** Les tensions  $V_a$ ,  $V_b$ , et  $V_c$  (figure 4.3) montrent une forme d'onde plus saccadée avec de nombreuses transitions, typique de la modulation par largeur d'impulsion. Cette méthode engendre des transitions rapides et fréquentes, ce qui peut augmenter la distorsion harmonique.

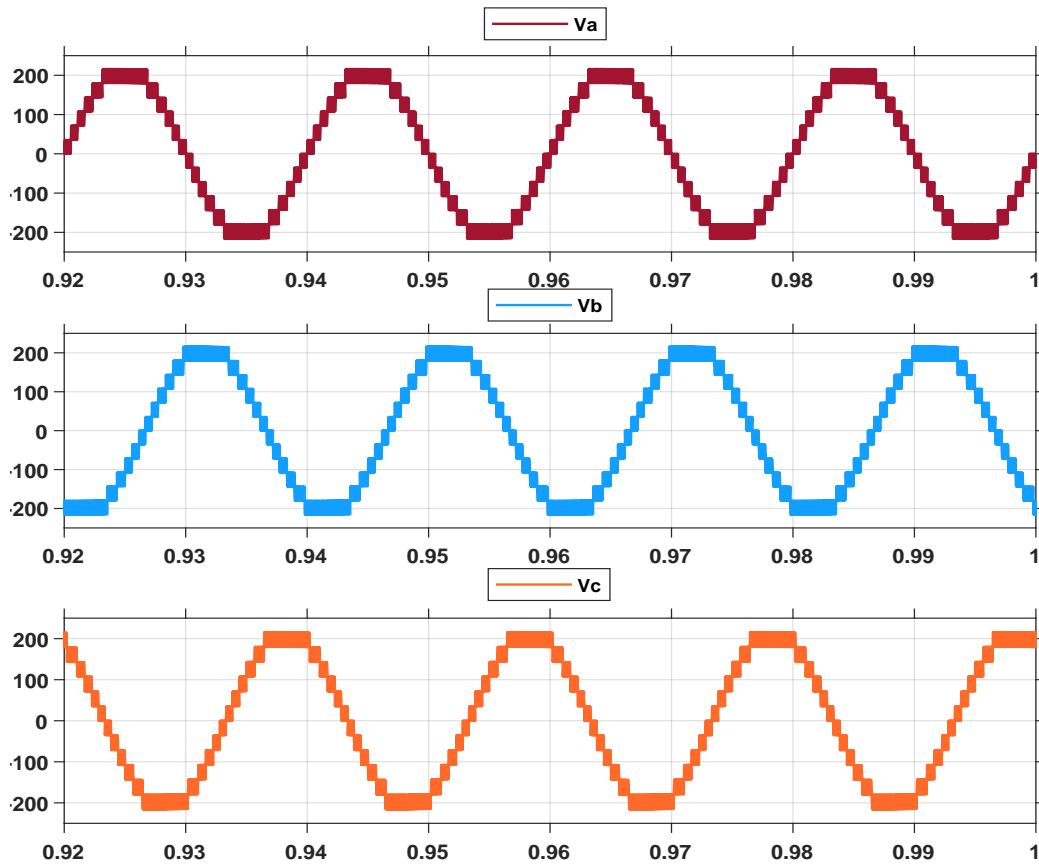


Figure 4.3: Tensions Simples - PWM

### 1.1.2 Tensions Composées Triphasées

**Tensions Composées - NLC :** Les tensions composées  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ , et  $V_{ca}$  (figure 4.4) montrent des formes d'onde lisses et bien définies, avec des transitions douces entre les niveaux de tension.

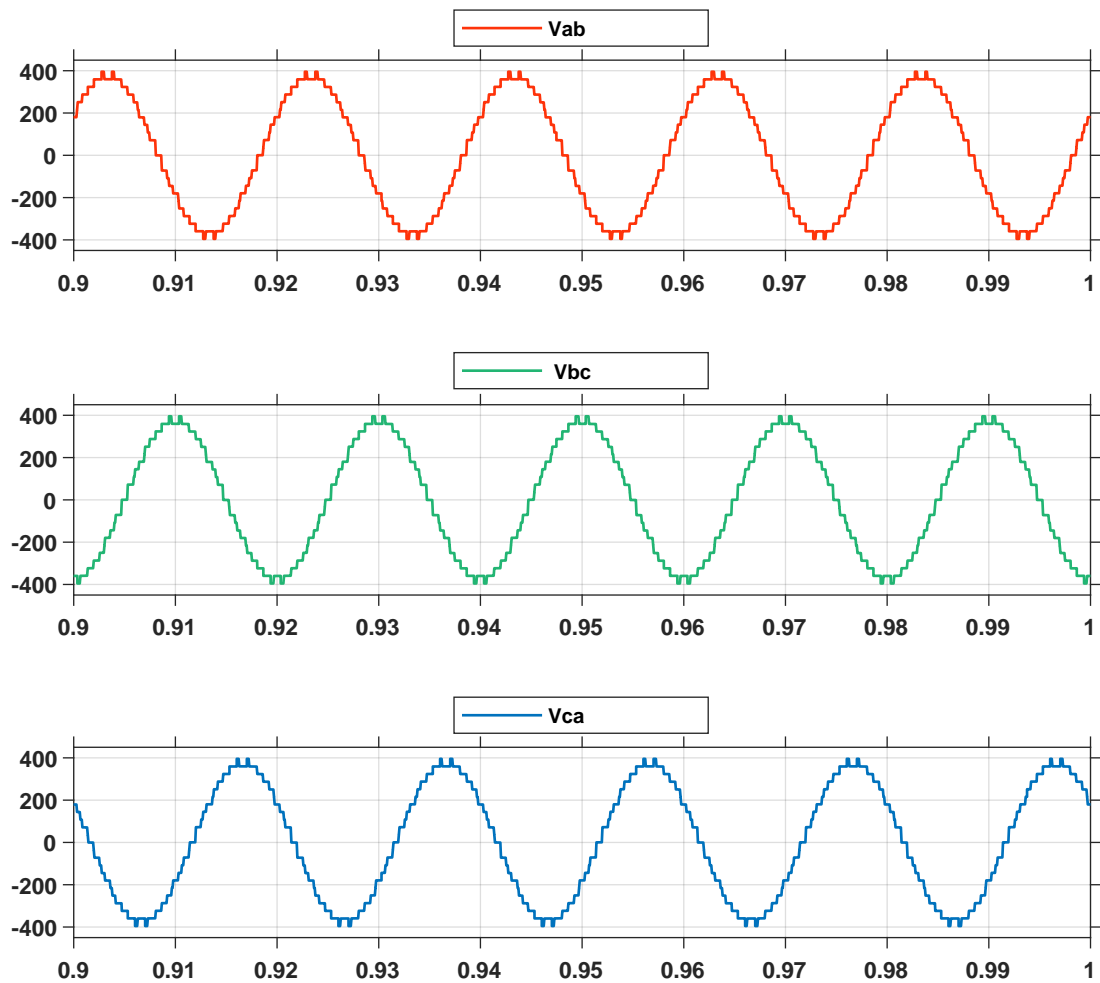


Figure 4.4: Tensions Composées - NLC

**Tensions Composées - SHE :** Les tensions composées  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ , et  $V_{ca}$  (figure 4.5) présentent des formes d'onde similaires à celles obtenues avec NLC, mais avec des transitions légèrement plus marquées, correspondant à l'élimination des harmoniques spécifiques

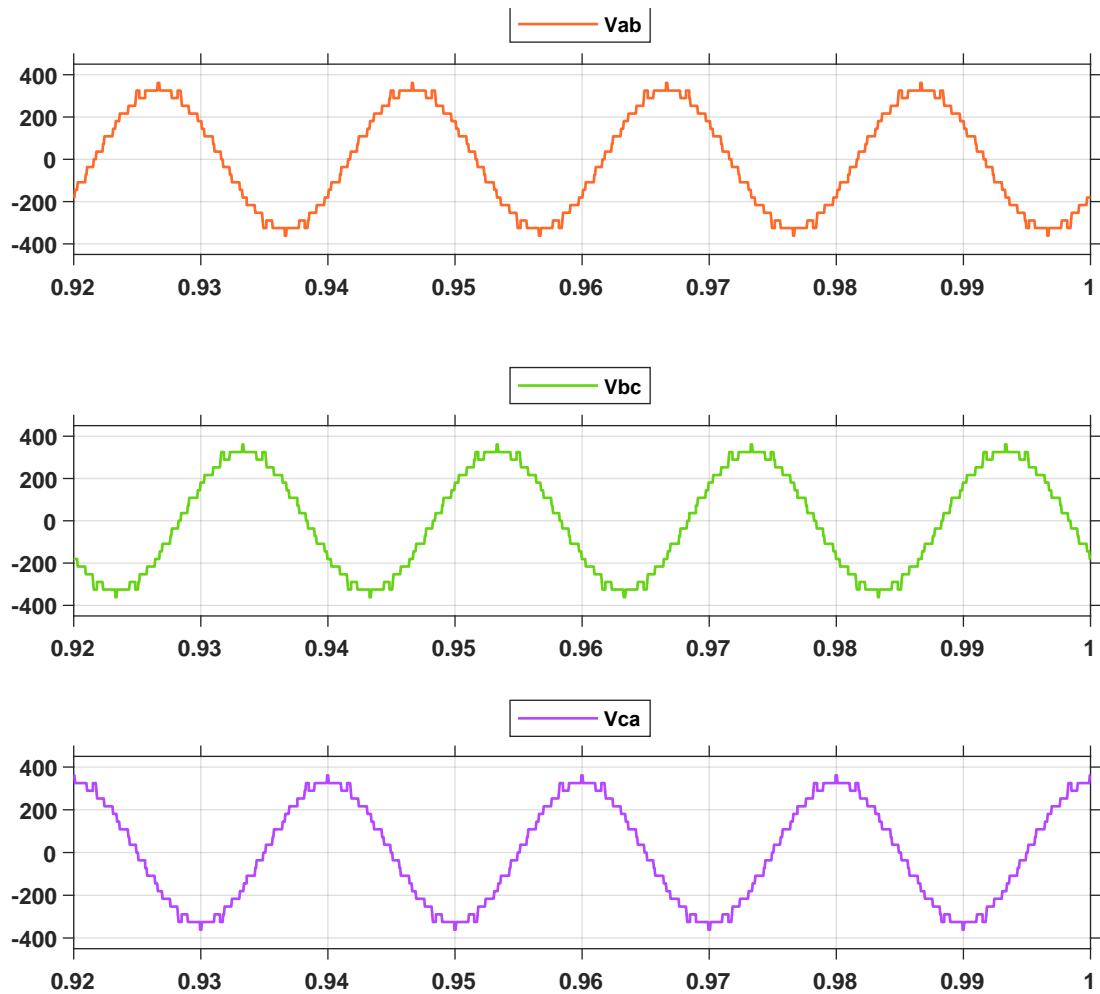


Figure 4.5: Tensions Composées - SHE

**Tensions Composées - PWM :** Les tensions composées  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ , et  $V_{ca}$  (figure 4.6) comme pour les tensions simples montrent une tension de sortie avec de nombreuses transitions rapides, typiques de la modulation par largeur d'impulsion.

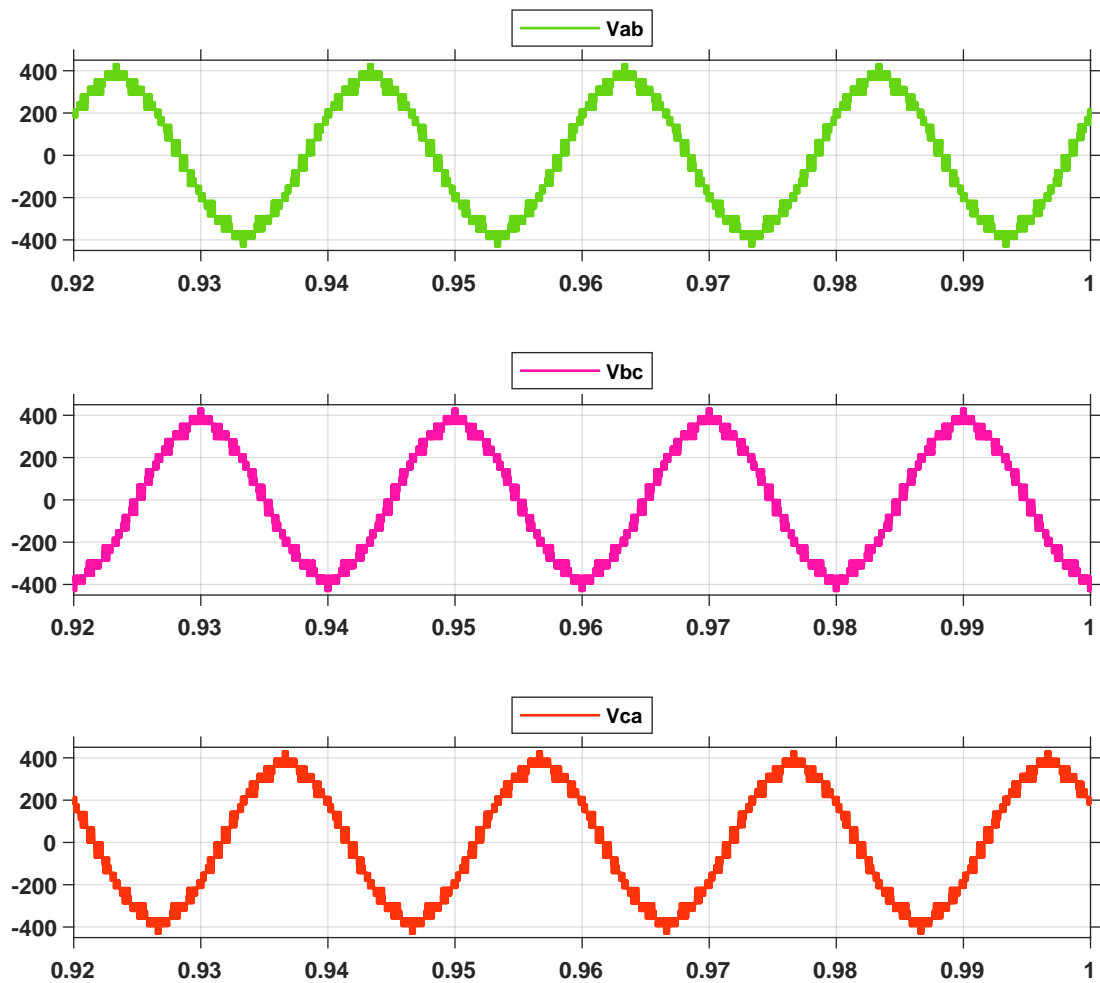


Figure 4.6: Tensions Composées - PWM

### 1.1.3 Analyse du THD des Tensions Simples

Le Total Harmonic Distortion (THD) des tensions simples est une mesure critique de la qualité de la forme d'onde. Un THD plus faible indique une forme d'onde plus proche d'une sinusoïde pure.

**THD de la tension simple - NLC :** La composante fondamentale est de 215.8 V avec un THD de 6.49%. La distribution spectrale montre des harmoniques à des niveaux relativement bas, ce qui indique une forme d'onde de bonne qualité. Les harmoniques dominants sont bien contrôlés, ce qui réduit la distorsion harmonique globale.



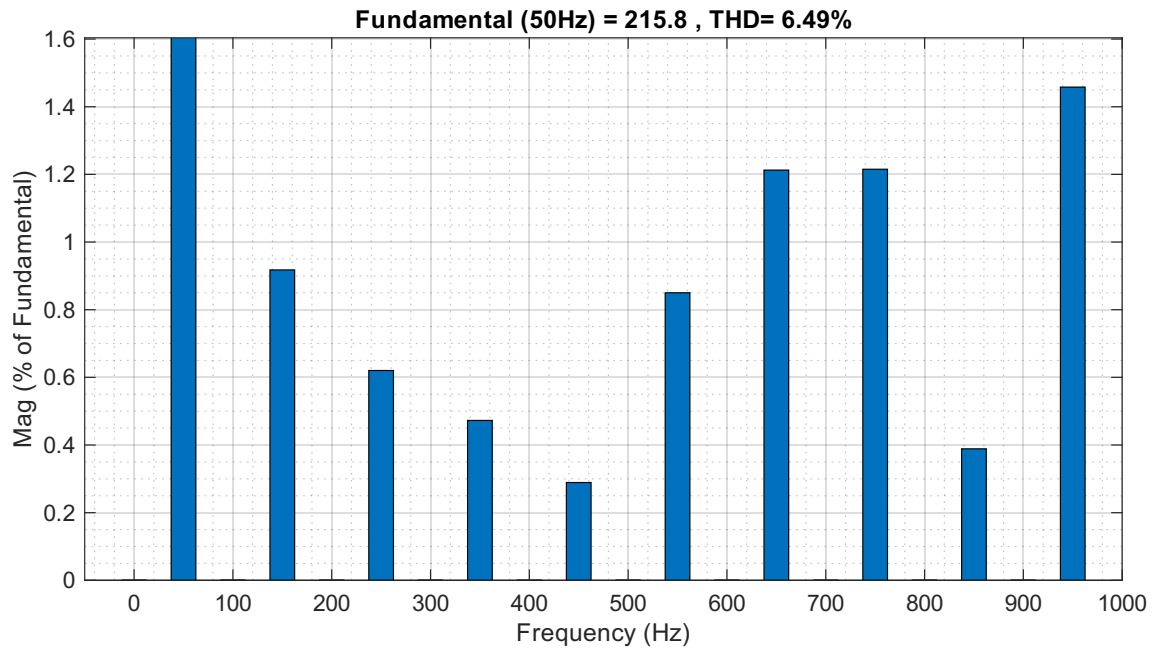


Figure 4.7: THD des tensions simples - NLC

**THD de la tension simple - SHE :** La composante fondamentale est de 192.7 V avec un THD de 7.95%. Les harmoniques d'ordre 3, 5, 7, 9 et 11 sont pratiquement annulés, comme prévu par la stratégie SHE. Cela se traduit par une réduction significative de la distorsion harmonique dans ces bandes de fréquences spécifiques, mais avec une légère augmentation des harmoniques de plus haute fréquence.

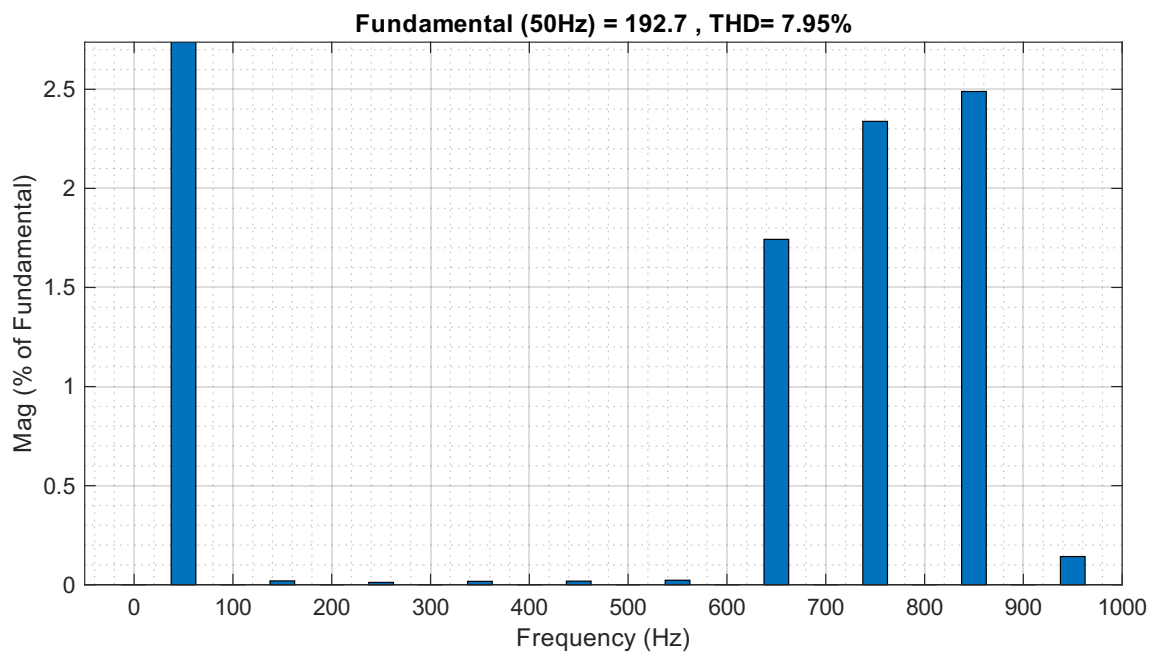


Figure 4.8: THD des tensions simples - SHE

**THD de la tension simple - PWM :** La composante fondamentale est de 215.6 V avec un THD de 9.22%. La distribution spectrale montre des harmoniques significativement plus élevés, ce qui indique une forme d'onde de qualité inférieure en termes de distorsion harmonique par rapport à la NLC et à la SHE. Les harmoniques générés par la PWM sont plus dispersés, entraînant un THD plus élevé.

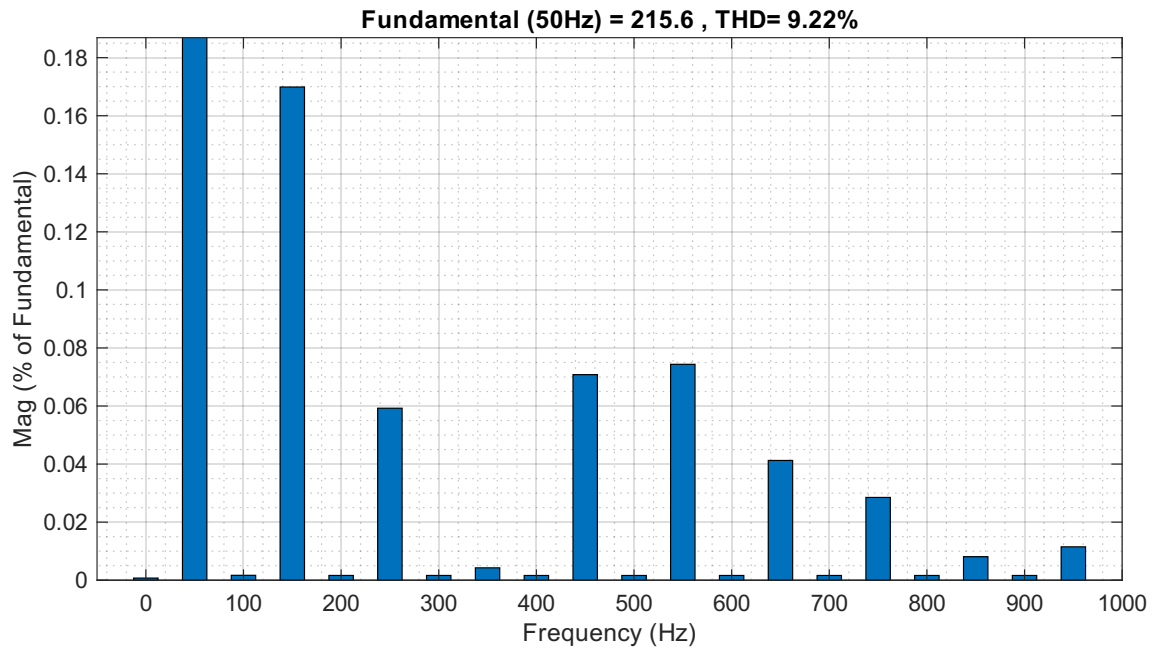


Figure 4.9: THD des tensions simples - PWM

#### 1.1.4 Analyse du THD des Tensions Composées

**THD de la tension composée - NLC :** La composante fondamentale est de 374.9 V avec un THD de 5.35%. Les tensions composées montrent une amélioration du THD par rapport aux tensions simples, indiquant une meilleure qualité de la forme d'onde dans le système triphasé.

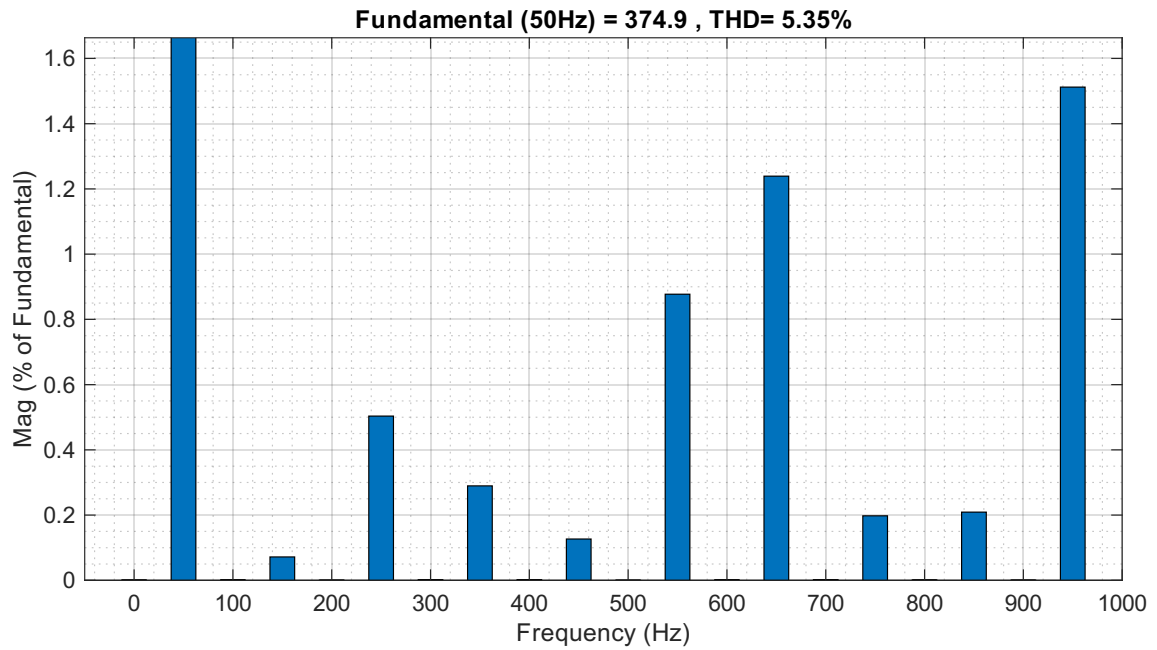


Figure 4.10: THD des tensions composées - NLC

**THD de la tension composée - SHE :** La composante fondamentale est de 333.7 V avec un THD de 6.67%. Les tensions composées bénéficient également de l'élimination des harmoniques d'ordre inférieur, mais montrent une légère augmentation du THD par rapport à NLC.

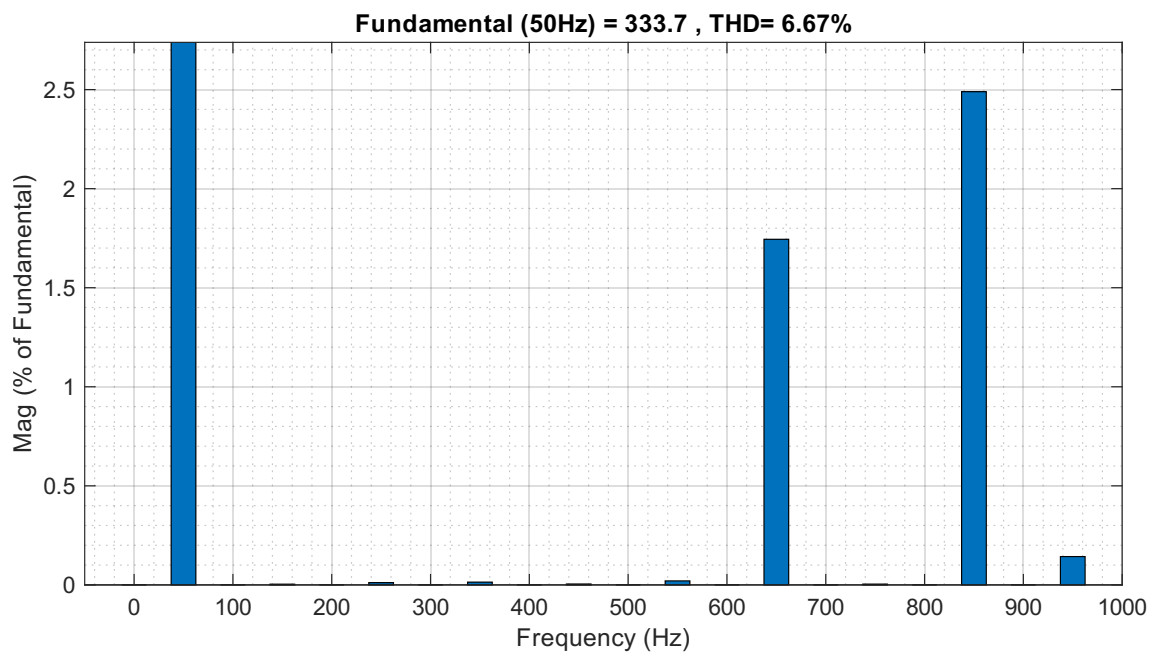


Figure 4.11: THD des tensions composées - SHE

**THD de la tension composée - PWM :** La composante fondamentale est de 373.4 V avec un THD de 7.69%. Les tensions composées affichent une réduction du THD par rapport aux tensions simples, mais restent les plus élevées parmi les trois stratégies, indiquant une distorsion harmonique significative.

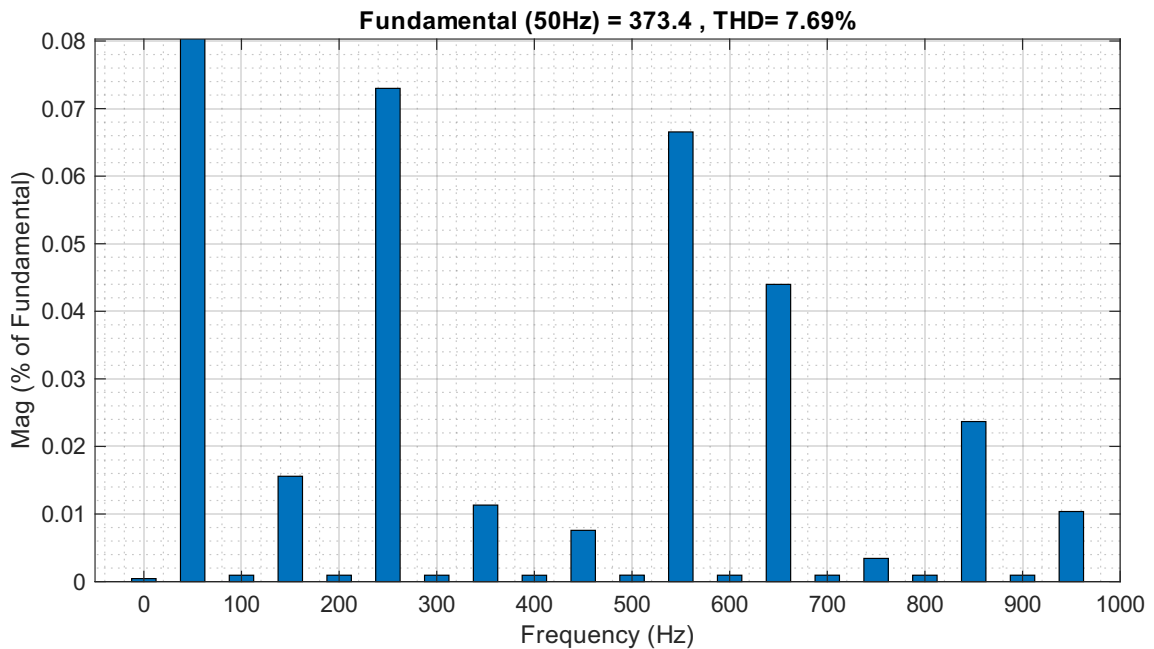


Figure 4.12: THD des tensions composées - PWM

### 1.1.5 Interprétation et Comparaison

#### Forme des Ondes

- **NLC et SHE :** Les formes d'onde obtenues avec ces deux stratégies sont relativement lisses avec des transitions bien définies. La NLC présente des transitions plus douces, ce qui réduit les pics de commutation et améliore la qualité de la forme d'onde. La SHE, quant à elle, assure une élimination précise des harmoniques d'ordre inférieur.
- **PWM :** La forme d'onde est beaucoup plus saccadée en raison des nombreuses transitions rapides inhérentes à cette méthode. Cela peut provoquer des pertes de commutation accrues et une distorsion harmonique plus élevée.

#### THD des Tensions Simples

- **NLC :** Offre la meilleure qualité de forme d'onde avec le THD le plus faible à 6.49%. Cela indique que la majorité de l'énergie harmonique est concentrée dans la composante fondamentale, avec une distorsion harmonique minimale.

- **SHE** : Montre une performance légèrement inférieure à NLC avec un THD de 7.95%. Cependant, elle réussit à éliminer presque complètement les harmoniques d'ordre 3, 5, 7, 9 et 11, ce qui est crucial pour certaines applications. La légère augmentation du THD est due à des harmoniques de plus haute fréquence.
- **PWM** : Affiche le THD le plus élevé à 9.22%, ce qui indique une forme d'onde avec une distorsion harmonique plus significative. Les harmoniques sont plus dispersés, ce qui réduit l'efficacité globale du système.

### THD des Tensions Composées

- **NLC** : Montre une amélioration du THD par rapport aux tensions simples avec un THD de 5.35%, indiquant une meilleure qualité de la forme d'onde dans le système triphasé.
- **SHE** : Le THD est de 6.6%, légèrement plus élevé que la NLC, mais les harmoniques spécifiques sont bien contrôlés, ce qui est bénéfique pour la qualité de puissance.
- **PWM** : Affiche un THD de 7.69%, le plus élevé parmi les trois stratégies, ce qui indique une distorsion harmonique significative même dans les tensions composées.

## 1.2 Courants de sorties pour les trois stratégies

Pour comparer les performances des trois stratégies de modulation (NLC, SHE et PWM), nous analysons les courants triphasés obtenus à la sortie de l'onduleur. Les figures ci-dessous présentent les courants pour chaque stratégie.

**Allure des courants - NLC** : Les courants triphasés  $I_a$ ,  $I_b$ , et  $I_c$  montrent une forme d'onde relativement lisse et équilibrée. Les transitions sont douces, ce qui indique une commutation efficace et une bonne qualité de courant.

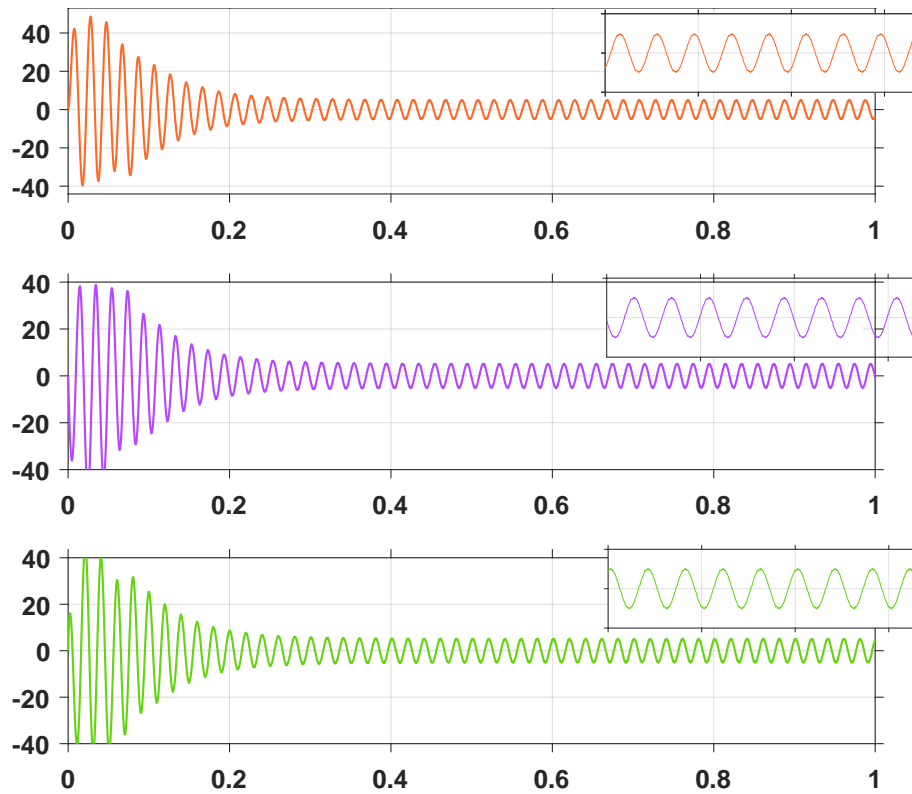


Figure 4.13: Allure des courants - NLC

**THD du courant - NLC :** La composante fondamentale est de 4.819 A avec un THD de 2.82%. La distribution spectrale montre des harmoniques à des niveaux relativement bas, indiquant une bonne qualité de courant.

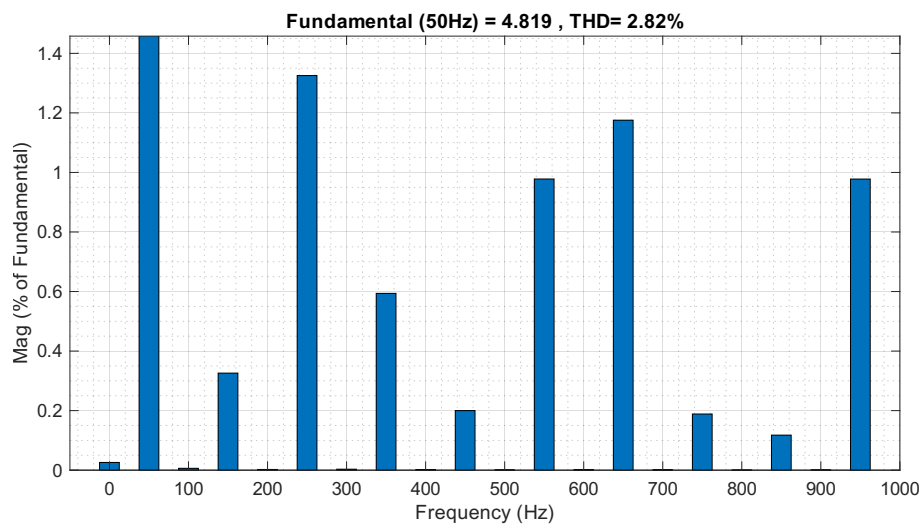


Figure 4.14: THD du courant - NLC

**Allure des courants - SHE :** Les courants triphasés  $I_a$ ,  $I_b$ , et  $I_c$  présentent une forme d'onde similaire à celle obtenue avec NLC, avec des transitions légèrement plus marquées, correspondant à l'élimination des harmoniques spécifiques.

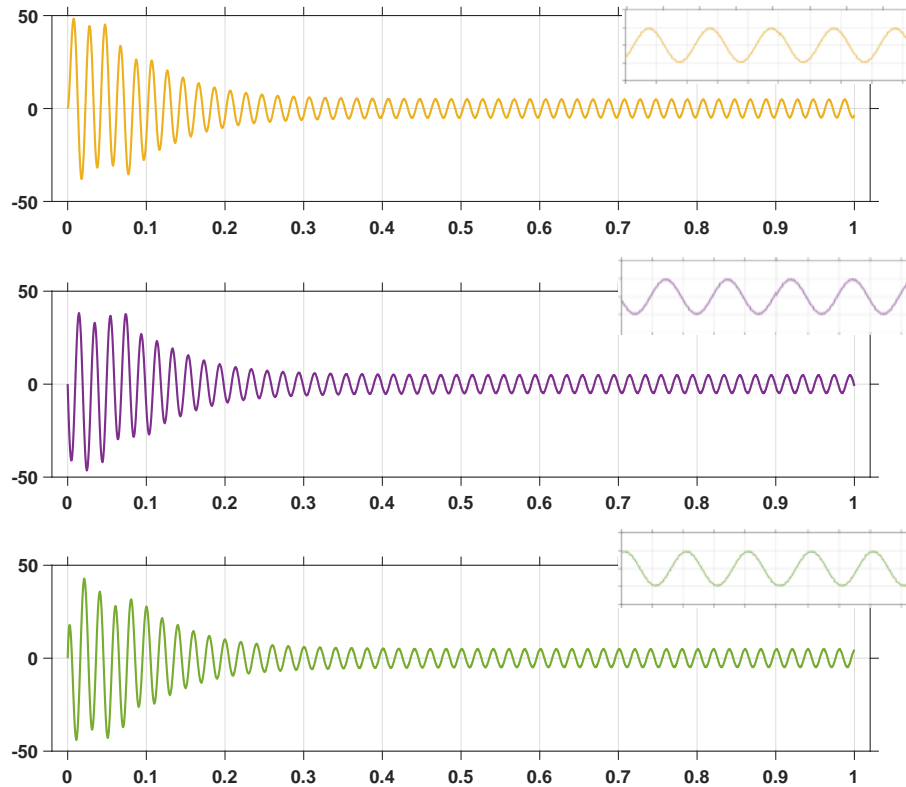


Figure 4.15: Allure des courants - SHE

**THD du courant - SHE :** La composante fondamentale est de 4,752 A avec un THD de 2,99 %. Les harmoniques de rang 3, 5, 7, 9 et 11 sont quasiment éliminés, conformément à la stratégie SHE. Cela entraîne une réduction notable de la distorsion harmonique dans ces bandes de fréquences spécifiques.

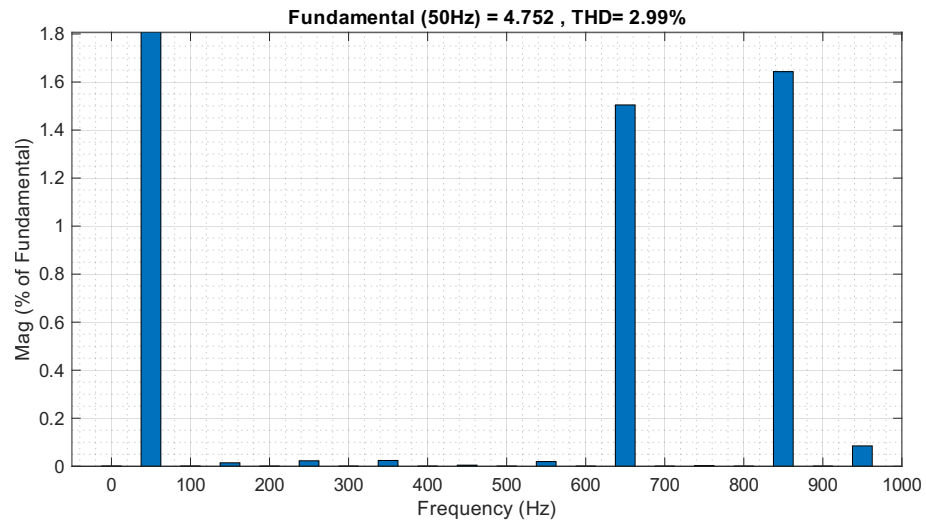


Figure 4.16: THD du courant - SHE

**Allure des courants - PWM** Les courants triphasés  $I_a$ ,  $I_b$ , et  $I_c$  montrent une forme d'onde très lisse avec de nombreuses transitions rapides. Bien que les transitions soient fréquentes, la forme d'onde est proche de celle d'une sinusoïde idéale.

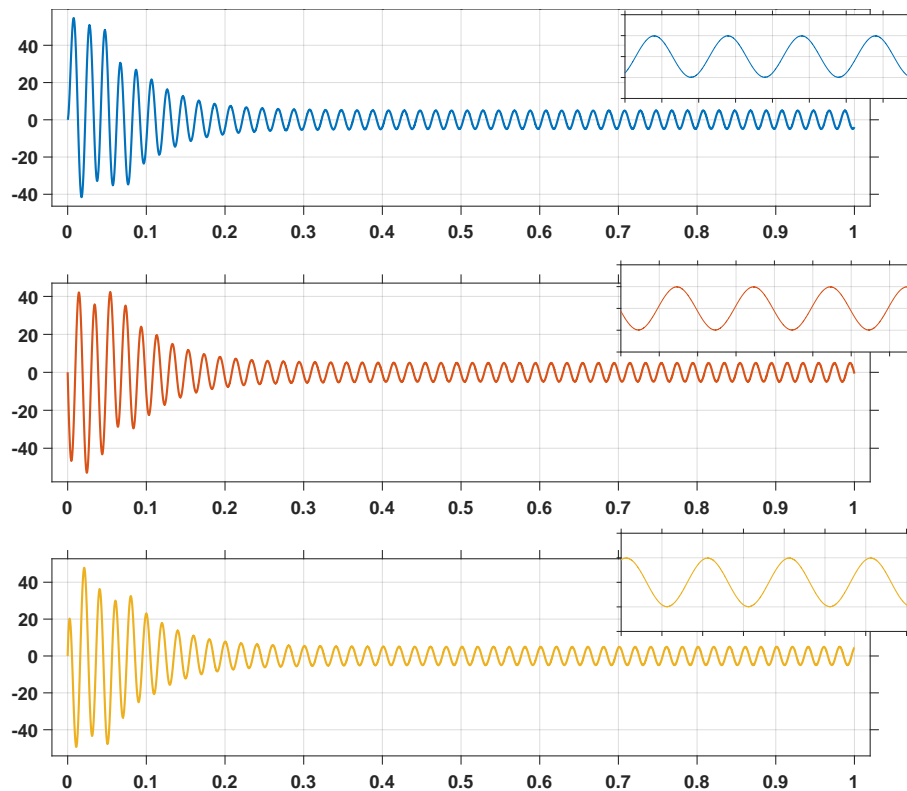


Figure 4.17: Allure des courants - PWM



**THD du courant - PWM** La composante fondamentale est de 4.948 A avec un THD de 0.21%. La distribution spectrale montre une diminution des harmoniques de basse mais aussi de haute fréquence, ce qui explique le THD global inférieur et indique une forme d'onde de courant de meilleure qualité en termes de distorsion harmonique totale.

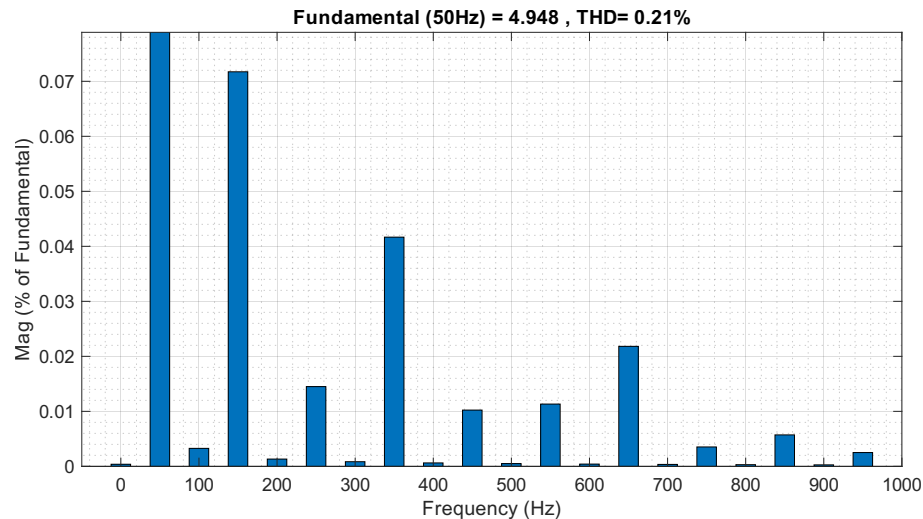


Figure 4.18: THD du courant - PWM

## Interprétation et Comparaison

### Forme des Ondes

- **NLC et SHE** : Les formes d'onde obtenues avec ces deux stratégies sont relativement lisses avec des transitions bien définies. NLC présente des transitions plus douces, ce qui réduit les pics de commutation et améliore la qualité de la forme d'onde. SHE, quant à elle, assure une élimination précise des harmoniques d'ordre inférieur.
- **PWM** : Bien que la PWM utilise de nombreuses transitions rapides, la forme d'onde obtenue est très lisse et proche de la sinusoïde idéale. Cela est dû au fait que les transitions rapides et fréquentes déplacent les harmoniques vers des fréquences plus élevées, où ils sont plus faciles à filtrer.

### THD des Courants

- **NLC** : Offre une bonne qualité de forme d'onde avec un THD de 2.82%. Cela indique que la majorité de l'énergie harmonique est concentrée dans la composante fondamentale, avec une distorsion harmonique minimale.

- **SHE** : Montre une performance légèrement inférieure à NLC avec un THD de 2.99%. Cependant, elle réussit à éliminer presque complètement les harmoniques d'ordre 3, 5, 7, 9 et 11, ce qui est crucial pour certaines applications. La légère augmentation du THD est due à des harmoniques de plus haute fréquence.
- **PWM** : Affiche un THD de 0.21%, indiquant une meilleure performance en termes de distorsion harmonique totale. La forme d'onde très lisse obtenue avec PWM est due au déplacement des harmoniques vers des fréquences plus élevées, où ils sont plus facilement atténués.

Le tableau comparatif 4.1 résume clairement les valeurs des THD pour les trois stratégies de modulation :

Tableau 4.1: Comparaison des THD pour les trois stratégies de modulation

Stratégie	THD Tensions Simples	THD Tensions Composées	THD Courant
NLC	6.49%	5.35%	2.82%
SHE	7.95%	6.67%	2.99%
PWM	9.22%	7.69%	0.21%

### 1.3 Analyse des Résultats de la Vitesse de la MAS et du Débit de la Pompe

**Vitesse de la Machine Asynchrone** La vitesse de la machine asynchrone atteint environ 1430 tr/min pour les trois stratégies de modulation (NLC, SHE et PWM), ce qui est proche de la vitesse de synchronisme de 1480 tr/min, attendue pour une machine asynchrone. Les courbes de vitesse montrent une montée progressive et stable dans les trois cas démontrant l'efficacité de ces stratégie en termes de réponse dynamique.

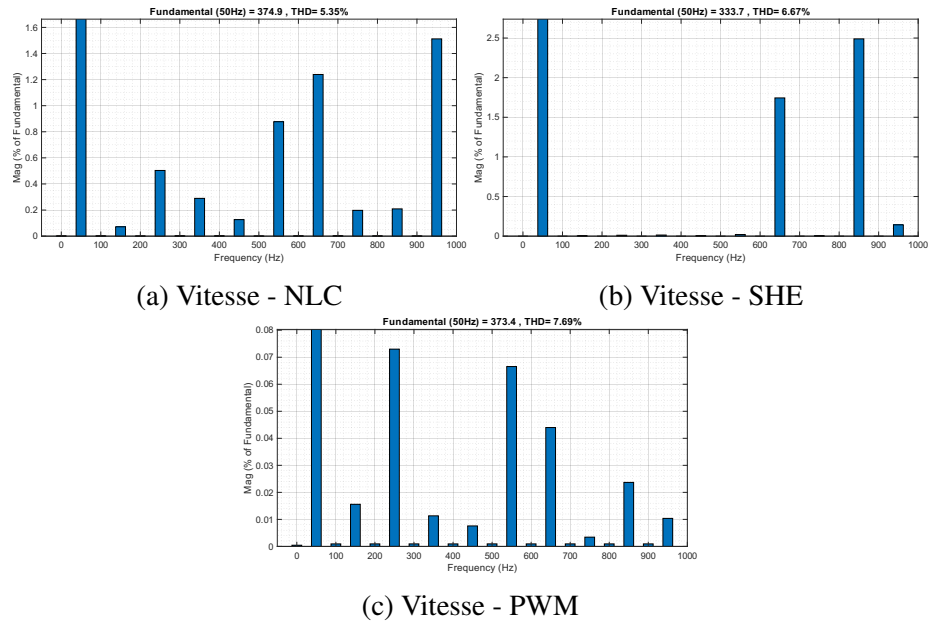


Figure 4.19: Vitesse de la Machine Asynchrone pour les Stratégies NLC, SHE et PWM

**Débit d'eau de la Pompe :** Le débit d'eau de la pompe se stabilise à environ  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  pour les trois stratégies de modulation, démontrant leur efficacité dans le contrôle du débit.

Toutes les stratégies étudiées (NLC, SHE et PWM) montrent une capacité adéquate à gérer le débit d'eau de la pompe et la vitesse de la machine asynchrone, assurant ainsi une bonne performance globale du système de pompage photovoltaïque.

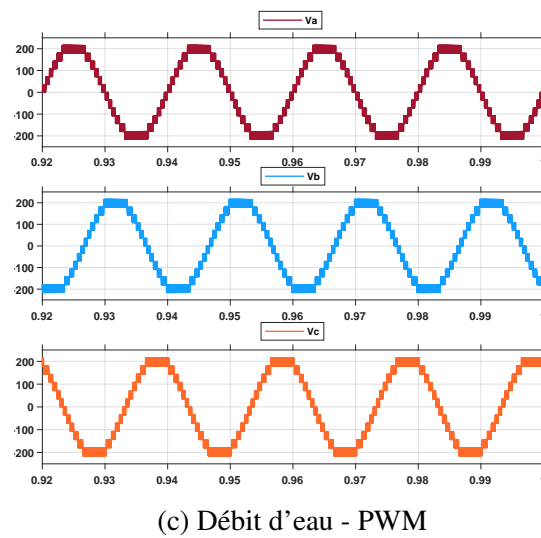
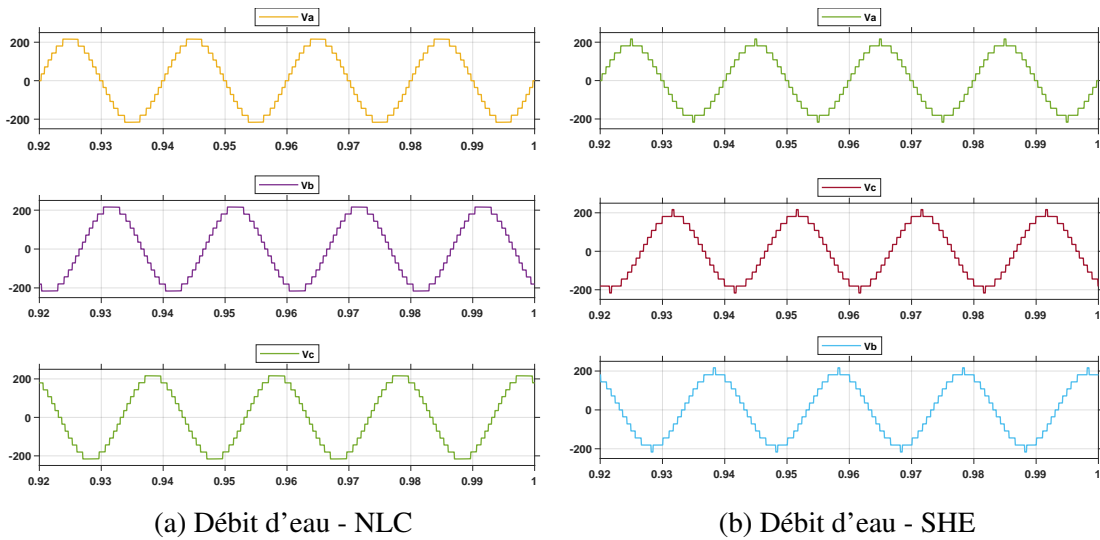


Figure 4.20: Débit d'eau de la Pompe pour les Stratégies NLC, SHE et PWM

## Conclusion

Ce chapitre a offert une analyse comparative approfondie des performances de trois stratégies de modulation appliquées à un onduleur multiniveaux à 13 niveaux dans un système de pompage photovoltaïque : la modulation par largeur d'impulsion (PWM), la modulation par contrôle du niveau le plus proche (NLC) et la modulation par élimination sélective des harmoniques (SHE). Les résultats ont montré que la PWM produit des tensions simples et composées avec de nombreuses transitions rapides, typiques de cette méthode, ce qui déplace les harmoniques vers des fréquences plus élevées mais génère une forme d'onde plus saccadée et une distorsion harmonique plus élevée. En revanche, les courants triphasés obtenus avec PWM sont très lisses, bien que les commutations fréquentes puissent

causer des interférences électromagnétiques et des pertes de commutation. Les tensions simples et composées avec la NLC montrent des transitions douces, réduisant les pics de commutation et améliorant la qualité de la forme d'onde, tandis que les courants triphasés sont équilibrés et lisses, avec une distorsion harmonique contrôlée. La SHE, quant à elle, génère des tensions avec des transitions plus marquées mais élimine efficacement les harmoniques d'ordre inférieur, et les courants triphasés présentent une bonne élimination des harmoniques d'ordre inférieur. Bien que la PWM se distingue par une qualité de courant exceptionnelle, ses défis pratiques, comme les interférences et les pertes, ne doivent pas être ignorés. Les stratégies NLC et SHE offrent un bon compromis entre performance et praticité, rendant ces méthodes particulièrement adaptées pour des applications nécessitant une fiabilité opérationnelle et une efficacité énergétique. En conclusion, cette étude met en lumière l'importance d'une évaluation exhaustive et contextuelle des stratégies de modulation pour optimiser les performances des onduleurs multiniveaux, contribuant ainsi à l'efficacité et à la fiabilité des systèmes d'énergie renouvelable, et fournit des bases solides pour orienter les choix technologiques futurs dans le domaine des systèmes de pompage photovoltaïque et autres applications similaires.

# Conclusion Générale

Ce mémoire a réalisé une étude comparative approfondie des trois principales stratégies de modulation appliquées à un onduleur multiniveaux à 13 niveaux : la modulation par largeur d'impulsion (PWM), le contrôle par niveau le plus proche (NLC) et l'élimination sélective des harmoniques (SHE). Chacune de ces stratégies présente des caractéristiques uniques et des performances distinctes en termes de qualité de la tension de sortie, de rendement énergétique et de complexité de mise en œuvre.

En termes de performances globales et de comparaisons basées sur plusieurs critères, nous pouvons mentionner les éléments suivants :

**Qualité de la Tension de Sortie :** La stratégie NLC s'est révélée offrir la meilleure qualité de tension de sortie grâce à ses transitions douces entre les niveaux de tension, ce qui réduit les pics de commutation et minimise la distorsion harmonique. La SHE, bien que très efficace pour éliminer les harmoniques spécifiques, présente des limitations dans le contrôle global de la distorsion harmonique. Les tensions produites par la SHE montrent des transitions plus marquées, ce qui peut introduire des harmoniques de plus haute fréquence. La PWM, malgré une distorsion harmonique plus élevée dans les tensions, maintient une bonne qualité de courant grâce à la fréquence élevée des transitions, qui déplace les harmoniques vers des fréquences plus élevées.

**Rendement Énergétique :** La NLC offre un bon compromis entre qualité de tension et rendement énergétique. En réduisant les pics de commutation, la NLC minimise les pertes de commutation, améliorant ainsi l'efficacité énergétique globale du système. La SHE, avec ses transitions marquées, est très efficace pour éliminer les harmoniques ciblés, mais peut entraîner des pertes de commutation légèrement plus élevées. La PWM, bien que très efficace pour réduire la distorsion harmonique totale, peut entraîner des pertes de commutation significatives en raison des nombreuses transitions rapides nécessaires pour

maintenir une forme d'onde de haute qualité.

**Complexité de Mise en Œuvre :** La stratégie PWM est la plus complexe à mettre en œuvre en raison de la nécessité de générer et de gérer douze signaux de porteuses triangulaires déphasés. Cette complexité accrue exige des algorithmes de contrôle plus sophistiqués et des exigences matérielles plus élevées. En revanche, la NLC et la SHE sont plus simples à implémenter en nécessitant l'application des angles de commutation calculés via des programmes MATLAB. Ces stratégies nécessitent moins de ressources matérielles, rendant leur mise en œuvre plus accessible.

**Performances de la Machine Asynchrone et de la Pompe :** Les performances de la machine asynchrone et de la pompe ont été analysées pour chaque stratégie de modulation. La NLC a montré une montée en vitesse progressive et stable, permettant à la machine asynchrone d'atteindre une vitesse proche de la vitesse de synchronisme avec une réponse dynamique efficace. La SHE, en éliminant spécifiquement les harmoniques d'ordre inférieur, a maintenu une stabilité opérationnelle, bien que les transitions plus marquées puissent affecter la réponse dynamique dans certaines conditions. La PWM, avec ses transitions fréquentes, a offert une réponse rapide, mais a introduit des oscillations à des fréquences plus élevées, ce qui peut affecter la stabilité du système. Le débit d'eau de la pompe, stabilisé à environ 0,25 m<sup>3</sup>/s, a confirmé l'efficacité de ces stratégies dans le contrôle du système de pompage photovoltaïque, démontrant que toutes les stratégies étudiées (NLC, SHE et PWM) sont capables de gérer efficacement le débit de la pompe et la vitesse de la machine asynchrone.

En conclusion, la stratégie NLC semble offrir le meilleur équilibre entre qualité de forme d'onde, rendement énergétique et facilité de mise en œuvre pour les onduleurs multiniveaux à 13 niveaux. Elle surpasse la SHE en termes de performances globales et la PWM en termes de simplicité et d'efficacité énergétique. Cette analyse permet de mieux orienter le choix des stratégies de modulation en fonction des besoins spécifiques des applications pratiques, contribuant ainsi à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie renouvelable. En atteignant ces objectifs, cette étude fournit des recommandations pratiques pour améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes de pompage solaire et autres applications similaires.

Ainsi, la comparaison des topologies d'onduleurs et des stratégies de modulation offre une vue détaillée des performances, mais il est crucial de considérer d'autres aspects

pour une évaluation complète. L'impact des différentes conditions de fonctionnement, les effets de la variation de la charge et les performances à long terme sous des conditions environnementales fluctuantes sont des facteurs qui méritent une attention future. De plus, l'intégration des nouvelles technologies de semi-conducteurs, comme les transistors à large bande (SiC, GaN), pourrait offrir des améliorations significatives en termes de rendement énergétique et de réduction des pertes de commutation. Une étude approfondie de ces aspects peut fournir des insights supplémentaires pour l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie renouvelable.



# Bibliographie

- [1] A. sidi-mohammed el amine, “Commande du convertisseur multicellulaire pour la production d’énergie d’origine renouvelable, thèse de doctorat,” *Université A.MIRA-BEJAIA, Faculté de technologie, Département de génie électriques*, 2018.
- [2] J. I. L. U. d. S. R. P. U. d. S. S. K. U. T. F. S. M. Jose Rodriguez, Universidad Técnica Federico Santa María, “The age of multilevel converters arrives. industrial electronics,” *EEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 49, NO. 4, MAY 2002*.
- [3] A. M. C. w. L. a.-J. K. O. Ronak A. Rana 1, Sujal A. Patel, “Review of multilevel voltage source inverter topologies and analysis of harmonics distortions in fc-mli,” *Power Converters in Power Electronics*, September 2019.
- [4] S. Ahmad, I. Ashraf, A. Iqbal, and M. A. A. Fatimi, “She pwm for multilevel inverter using modified nr and pattern generation for wide range of solutions,” 2018.
- [5] G. Diyoke, O. Nwaorgu, and I. Onwuka, “Hybridised single-phase cascaded multilevel inverter topology using reduced number of power switches,” 01 2015.
- [6] g. subarnan and V. Venkatesan, “Multi carrier based multilevel inverter with minimal harmonic distortion,” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 6, 06 2015.
- [7] R. Sarker, “Phase disposition pwm (pd-pwm) technique to minimize withd from a three-phase npc multilevel voltage source inverter,” 2020.

- 
- [8] M. Manjrekar and G. Venkataramanan, "Advanced topologies and modulation strategies for multilevel inverters," in *PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 2, pp. 1013–1018 vol.2, 1996.
- [9] M. Sajitha, J. Sandeep, and R. Ramchand, "Comparative analysis of different modulation techniques for three level three phase t-type npc inverter," in *TENCON 2019 - 2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, pp. 1529–1534, 2019.
- [10] P. Mahesh, C. Venkatesh, and V. Rajagopal, "Nlc and sfo control technique based multilevel inverter fed 3- induction motor drive," 2021.
- [11] M. Haei, A. Khoshooei, and A. Khoshsaadat, "Unconditional control of npc inverter by a modified virtual space vector modulation," 2022.
- [12] Z. Akhmetov, L. Chushan, W. Li, and A. Ruderman, "A hybrid three-phase seven-level chb inverter with a novel modulation scheme," pp. 2451–2454, 03 2020.
- [13] G. J. Rushiraj and P. Kapil, "Analysis of different modulation techniques for multilevel inverters," in *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, pp. 3017–3024, 2016.
- [14] Y. Ye, S. Chen, X. Wang, and K.-W. E. Cheng, "Self-balanced 13-level inverter based on switched capacitor and hybrid pwm algorithm," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 6, pp. 4827–4837, 2021.
- [15] C. R. M. I. T. A. Andressa C. Schittler, Daniel Heer, "Interaction of power-module design and modulation scheme for active neutral-point-clamped inverters," 2019.

## Résumé

Ce mémoire étudie et optimise les stratégies de modulation pour un onduleur multiniveaux à 13 niveaux utilisé dans un système de pompage photovoltaïque. L'objectif principal est de déterminer la stratégie de modulation la plus efficace en termes de qualité de forme d'onde, réduction des distorsions harmoniques et efficacité énergétique. Une analyse comparative des techniques Selective Harmonic Elimination (SHE), Pulse Width Modulation (PWM) et Nearest Level Control (NLC) est présentée, en tenant compte des aspects théoriques, de la modélisation, de la simulation et de l'analyse des résultats.

### Mots clés:

Onduleurs multiniveaux; Stratégies de modulation; Photovoltaïque; Qualité de forme d'onde ;Selective Harmonic Elimination (SHE) ;Pulse Width Modulation (PWM); Nearest Level Control (NLC); ;Réduction des distorsions harmoniques Système de pompage.

---

## Abstract

This thesis studies and optimizes modulation strategies for a 13-level multilevel inverter used in a photovoltaic pumping system. The main objective is to determine the most effective modulation strategy in terms of waveform quality, harmonic distortion reduction, and energy efficiency. A comparative analysis of Selective Harmonic Elimination (SHE), Pulse Width Modulation (PWM), and Nearest Level Control (NLC) techniques is presented, considering theoretical aspects, modeling, simulation, and result analysis.

### Key words:

Multilevel inverter; Modulation strategies; Photovoltaic; Waveform quality; Harmonic distortion; Selective Harmonic Elimination (SHE); Pulse Width Modulation (PWM); Nearest Level Control (NLC); Pumping system.

---

## ملخص

يدرس هذا البحث ويحسن استراتيجيات التضمين لمحول متعدد المستويات بقدرة ١٣ مستوى يستخدم في نظام ضخم ضوئي كهروضوئي. الهدف الرئيسي هو تحديد استراتيجية التضمين الأكثر فعالية من حيث جودة الشكل الموجي، وتقليل التشوهات التوافقية، وكفاءة الطاقة. يتم تقديم تحليل مقارنة لتقنيات التخلص الانتقائي من التوافقيات (SHE)، تضمين عرض النبضة (PWM)، والتحكم في المستوى الأقرب (NLC)، مع مراعاة الجوانب النظرية، والنمذجة، والمحاكاة، وتحليل النتائج.

### الكلمات المفتاحية:

محول متعدد المستويات؛ استراتيجيات التضمين؛ ضوئي كهروضوئي؛ جودة الشكل الموجي؛ التشوه التوافقي؛ التخلص الانتقائي من التوافقيات (SHE)؛ تضمين عرض النبضة (PWM)؛ التحكم في المستوى الأقرب (NLC)؛ نظام ضخم.