

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 d'Ingénieur

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Énergie et environnement

Présenté par : BEKKAL BRIKCI Nihel et BOUALLOU Mohammed Mehdi

Thème

**Étude comparative de quatre topologies
d'onduleur à cinq 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 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, 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

Dédicaces	i
Remerciements	iv
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xi
Introduction Générale	1
1 Cadre Général de l'Étude	3
1 Introduction	3
1.1 Contexte de l'étude	3
1.2 Problématique	4
1.3 Objectif	4
2 État de l'art	5
2.1 Historique des onduleurs multiniveaux	5
2.2 Différentes topologies des onduleurs multiniveaux	6
3 Applications des onduleurs multiniveaux	8
3.1 Les onduleurs multiniveaux pour les énergies renouvelables	8
3.2 Applications de grande puissance	9
3.3 Commande des moteurs à courant alternatif	10
4 Avantages des onduleurs multiniveaux:	10
4.1 Réduction du taux d'harmoniques	10
4.2 Réduction des pertes de commutation	10
4.3 Capacité à gérer des tensions élevées	11
4.4 Comparaison entre onduleur conventionnel et onduleur multiniveaux	11

5	Stratégies de modulation	12
5.1	Stratégies de modulation basées sur les vecteurs spatiaux	12
5.2	Stratégies de modulation basées sur les niveaux de tension	12
5.2.1	NLC (Nearest Level Control)	13
5.2.2	SHE (Selective Harmonic Elimination)	13
5.2.3	PWM (Pulse Width Modulation)	13
5.3	Modulation hybride	13
2	Méthodologies et outils	15
1	La topologie d'onduleur multiniveaux neutral point clamped (NPC)	15
1.1	Description de la Topologie NPC	15
1.2	La topologie NPC à 5 Niveaux	16
1.2.1	Structure de la NPC à 5 niveaux	16
1.2.2	Mode de fonctionnement de la NPC 5 niveaux	17
1.3	Structure triphasée de la NPC 5 niveaux	18
2	La topologie d'onduleur multiniveaux Cascaded H-Bridge (CHB)	19
2.1	Description de la topologie CHB	19
2.2	La topologie CHB à 5 niveaux	19
2.2.1	Structure de la CHB à 5 niveaux	19
2.2.2	Mode de fonctionnement de la CHB 5 niveaux	20
2.3	Structure triphasée de la CHB à 5 niveaux	21
3	La topologie d'onduleurs multiniveaux Packed U-cell (PUC)	22
3.1	Description de la topologie PUC	22
3.2	La topologie PUC à 5 Niveaux	22
3.2.1	Structure de la PUC à 5 niveaux	22
3.2.2	Mode de fonctionnement de la PUC à 5 niveaux	23
3.3	Structure triphasée de la PUC à 5 niveaux	24
4	La topologie Reduced semi-conductor inverter (RSI)	25
4.1	Description de la topologie RSI	25
4.2	La topologie RSI à 5 Niveaux	25
4.2.1	Structure de la RSI à 5 niveaux	25
4.2.2	Mode de fonctionnement de la RSI à 5 niveaux	25
4.3	Structure triphasée de la RSI 5 niveaux	26

5	Présentation Parallèle des Architectures des Onduleurs multiniveaux	27
6	Choix de la stratégie de modulation	30
6.1	Pulse width Modulation (PWM)	30
6.2	L'Indice de modulation	32
7	Outils de simulation pour onduleurs multiniveaux : MATLAB/Simulink	33
3	Résultats et discussions	34
1	Modèles Simulink des quatre topologies	34
2	Stratégie de modulation utilisée pour les quatre topologies d'onduleurs à cinq niveaux	36
3	Modélisation des onduleurs multiniveaux dans le système de pompage	46
3.1	Modèle généralisé du système de pompage photovoltaïque	47
3.2	Modélisation des modules PV	47
3.2.1	Maximum power point tracker	48
3.3	Modélisation du moteur asynchrone de la moto-pompe	49
4	Résultats de simulations	50
4.1	Performances de l'onduleur	51
4.2	Performances de la charge (MAS-Pompe)	57
5	Comparaison entre résultats des topologies	60
5.1	Tensions de sorties	60
5.2	Courants de sorties	61
5.3	Taux de distorsion harmonique THD	62
5.4	Vitesse et débit MAS/Pompe	66
5.5	Effet de l'indice de modulation	67
	Conclusion Générale	71
	Bibliographie	72

Liste des figures

1.1	Classification des onduleurs multiniveaux [1]	8
1.2	Chaîne de conversion d'énergies renouvelables :Alimentation directe d'une charge [1]	9
1.3	Chaîne de conversion d'énergies renouvelables :Raccordement au réseau électrique [2]	9
1.4	Classification des stratégies de modulation [4]	14
2.1	Circuit électrique monophasé de la NPC à 5 niveaux	17
2.2	Circuit électrique triphasé de la NPC 5 niveaux	18
2.3	Circuit électrique monophasé de la CHB à 5 niveaux	20
2.4	Circuit électrique triphasé de la CHB 5 niveaux	21
2.5	Circuit électrique monophasé de la PUC 5 niveaux	23
2.6	Circuit électrique triphasé de la PUC 5 niveaux	24
2.7	Circuit électrique monophasé de la RSI à 5 niveaux	25
2.8	Circuit électrique triphasé de la RSI 5 niveaux	27
2.9	Représentation des ondes de référence et de porteuses pour la LSPWM . .	31
3.1	Modélisation des topologie avec MATLAB SIMULINK	35
3.2	Généralisation du Modèle SIMULINK pour les 4 topologies	36
3.3	Sorties des comparateurs	37
3.4	Somme des sorties des commutateurs	38
3.5	Modèle SIMUNLIK du circuit de contrôle de la NPC	39
3.6	Signaux de commande des interrupteurs de la NPC	40
3.7	Modèle SIMUNLIK du circuit de contrôle de la CHB	41
3.8	Signaux de commande des interrupteurs de la CHB	42
3.9	Modèle SIMUNLIK du circuit de contrôle de la PUC	43

3.10	Signaux de commande des interrupteurs de la PUC	44
3.11	Modèle SIMUNLIK du circuit de contrôle de la RSI	45
3.12	Signaux de commande des interrupteurs de la RSI	46
3.13	Modèle SIMULINK de l'onduleur multiniveaux intégré au système de pompage photo-voltaïque	47
3.14	Paramètres du bloc SIMULINK ' PV array '	48
3.15	Modèle Simulink de l'association Panneaux PV hacheur MPPT	49
3.16	Modèle Simulink de l'association MAS-pompe	49
3.17	Modèle Simulink de la pompe	50
3.18	Tension simple pour la topologie NPC	51
3.19	Tension simple pour la topologie CHB	52
3.20	Tension simple pour la topologie PUC	52
3.21	Tension simple pour la topologie RSI	53
3.22	Tension composée pour la topologie NPC	54
3.23	Tension composée pour la topologie CHB	54
3.24	Tension composée pour la topologie PUC	55
3.25	Tension composée pour la topologie RSI	55
3.26	Courant de la NPC	56
3.27	Courant de la CHB	56
3.28	Courant de la PUC	57
3.29	Courant de la RSI	57
3.30	Vitesse MAS - NPC	58
3.31	Vitesse MAS - CHB	58
3.32	Vitesse MAS - PUC	58
3.33	Vitesse MAS - RSI	58
3.34	Vitesse MAS des 4 topologies	58
3.35	Débit d'eau - NPC	59
3.36	Débit d'eau - CHB	59
3.37	Débit d'eau - PUC	59
3.38	Débit d'eau - RSI	59
3.39	Débit d'eau des 4 topologies	59
3.40	Superposition des tensions simples	61

3.41	Superpositions des courants	62
3.42	THD des tensions composées des topologies	63
3.43	THD des tensions simples pour les topologies	64
3.44	THD des courants pour les 4 topologies	65
3.45	Superposition des vitesses	66
3.46	Superposition de débits	67
3.47	Effet de l'indice de modulation sur le THD	68

Liste des tableaux

1.1	Comparatif entre les onduleurs conventionnels et les onduleurs multiniveaux	12
2.1	Table de commutation NPC à 5 niveaux	17
2.2	Table de commutation pour la structure triphasé NPC	19
2.3	Table de commutation de la CHB à 5 niveaux	20
2.4	All Possible Switching States of PUC Inverter	23
2.5	Table de commutation RSI à 5 niveaux	26
2.6	Tableau comparatif entre les structures des quatre (4) topologies adoptées	29

Abréviations

Abréviation	Définition
PV	Photo-voltaïque
MAS	Moteur Asynchrone
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
SHE	Selective Harmonic Elimination (Modulation selective des Harmoniques)
SVM	Space Vector Modulation (Modulation Vectorielle Spatiale)
NPC	Neutral Point Clamped (point neutre serré)
CC	Courant Continu
IGBT	insulated-gate bipolar transistor (Transistor bipolaire à grille isolée)
THD	Taux de distorsion d'harmonique
DC	Direct current (courant continu)
AC	Alternatif current (courant alternatif)
MC	Mode Commun
HVDC	High Voltage Direct Current (haute tension courant continu)
SM	Sous Modules
FLC	Flying Capacitor
ANPC	Active Neutral Point Clamped(point neutre serré actif)
SMC	Sliding Mode Control
CHB	Cascaded H-Bridge (pont en H cascadé)
CMC	Capacitor-Clamped Multilevel Converter
HMC	Hybrid Multilevel Converter (convertisseur multiniveau hybride)
MMC	Modular Multilevel Converter
PUC	Packed U-Cells
AMI	Arranged Multilevel Inverter
RSI	Reduced Semiconductors Inverter
MPPT	Maximum Power Point Tracking (suivi du point maximal de puissance)
P&O	Perturb and observ
PWM	Pulse Wide Modulation (modulation de largeur d'impulsion)
PSPWM	Phase Shifted Pulse Wide Modulation
LSPWM	Level Shifted Pulse Wide Modulation
IM	Indice de Modulation

FFT

Fast Fourier Transform (Transformation de Fourier rapide)

Introduction Générale

Dans le contexte actuel de la transition énergétique, l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques joue un rôle crucial pour répondre aux défis environnementaux et énergétiques. Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, l'énergie photovoltaïque a connu un essor remarquable au cours des dernières décennies. Les avancées technologiques et les efforts de recherche et développement ont permis de réduire les coûts des systèmes photovoltaïques et d'améliorer leurs performances, les rendant de plus en plus compétitifs par rapport aux sources d'énergie traditionnelles.

Un élément clé dans les systèmes photovoltaïques est l'onduleur, qui permet de convertir l'énergie continue (DC) produite par les panneaux solaires en énergie alternative (AC) compatible avec le réseau électrique. Les onduleurs multiniveaux, en particulier, ont attiré une attention considérable en raison de leurs avantages en termes de qualité de l'onde, de réduction des distorsions harmoniques et d'efficacité énergétique. Ces dispositifs sont essentiels pour maximiser la production d'énergie et assurer une intégration harmonieuse des systèmes photovoltaïques dans les réseaux électriques.

Ce mémoire d'ingénierie vise à explorer et comparer les différentes topologies d'onduleurs multiniveaux, en mettant l'accent sur leurs performances spécifiques lorsqu'ils sont intégrés dans un système de pompage photovoltaïque. Le système étudié est composé de panneaux photovoltaïques, d'onduleurs multiniveaux, d'un moteur asynchrone et d'une pompe. Ce type de système trouve de nombreuses applications dans les zones rurales et les régions isolées, où l'accès à l'eau et à l'électricité est limité.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre présente un cadre général de l'étude, comprenant le contexte de l'étude, la problématique, les objectifs, et l'état de l'art. Cette section établit les bases théoriques nécessaires à la compréhension des onduleurs multiniveaux et de leurs

applications, en fournissant une revue détaillée de la littérature existante et des avancées technologiques dans ce domaine.

Le deuxième chapitre est consacré aux outils et à la méthodologie utilisés pour cette étude comparative. Il décrit en détail les topologies d'onduleurs adoptées, la stratégie de modulation sélectionnée, ainsi que l'outil de simulation utilisé. Cette section met en lumière les caractéristiques spécifiques de chaque topologie et les raisons de leur sélection pour cette étude.

Enfin, le troisième chapitre est dédié à la modélisation, à la discussion et à la comparaison des résultats. Les simulations effectuées sont analysées pour évaluer les performances de chaque topologie d'onduleur multiniveaux en termes de qualité de l'onde, de distorsion harmonique, et d'efficacité énergétique. Les résultats obtenus sont comparés pour déterminer la topologie la plus adaptée à l'application étudiée.

En conclusion, ce mémoire vise à fournir une évaluation approfondie des onduleurs multiniveaux dans le cadre de systèmes de pompage photovoltaïque, en mettant en lumière les avantages et les défis associés à chaque topologie.

Les conclusions tirées de cette étude contribueront à l'optimisation des systèmes photovoltaïques et à la promotion de solutions énergétiques durables et efficaces.

Chapitre 1

Cadre Général de l'Étude

1 Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Les onduleurs multiniveaux ont gagné en importance dans le domaine de l'électronique de puissance en raison de leurs nombreux avantages par rapport aux onduleurs traditionnels à deux niveaux. Ils sont particulièrement pertinents dans des applications où la qualité de la conversion de puissance est critique, comme les systèmes photovoltaïques, les entraînements de moteurs et les applications industrielles de haute puissance. L'évolution rapide des technologies et la demande croissante d'une énergie électrique de haute qualité ont poussé à l'adoption des onduleurs multiniveaux. Ces dispositifs permettent de produire des formes d'onde de sortie avec une distorsion harmonique totale (THD) réduite, ce qui améliore les performances des systèmes électriques et prolonge la durée de vie des équipements. Les onduleurs multiniveaux fonctionnent en générant plusieurs niveaux de tension de sortie à partir d'une source de tension unique, ce qui nécessite une gestion sophistiquée des dispositifs de commutation pour assurer une distribution uniforme des tensions et des courants. Cependant, leur conception et leur contrôle présentent des défis techniques complexes. Ces défis incluent la coordination précise des dispositifs de commutation pour minimiser les pertes de commutation et la gestion des niveaux de tension intermédiaires pour maintenir une performance stable.

1.2 Problématique

Malgré leurs nombreux avantages, les onduleurs multiniveaux posent des défis techniques importants. L'augmentation de la complexité des circuits et la nécessité de techniques avancées de modulation pour garantir une qualité d'onde optimale sont parmi les principales difficultés. Par exemple, la modulation en largeur d'impulsion (PWM) à plusieurs niveaux requiert des algorithmes sophistiqués pour contrôler les nombreux interrupteurs de puissance et pour synchroniser les niveaux de tension. Chaque configuration d'onduleur multiniveaux a des caractéristiques uniques qui influencent ses performances globales, ce qui rend nécessaire une comparaison systématique pour identifier celles offrant le meilleur compromis en termes de qualité de l'onde, d'efficacité et de fiabilité dans des applications spécifiques, comme les systèmes de pompage photovoltaïque. Les questions de recherche de cette étude se concentrent sur les performances relatives des différentes configurations d'onduleurs multiniveaux en termes de distorsion harmonique, d'efficacité énergétique et de stabilité, ainsi que sur les défis spécifiques associés à leur mise en œuvre et à leur contrôle. Par exemple, comment les différentes techniques de modulation affectent-elles la THD et l'efficacité globale ? Comment la conception des circuits peut-elle avoir un impact sur les performances du convertisseur ? ...

1.3 Objectif

L'objectif principal de cette étude est de réaliser une analyse comparative des performances des différentes configurations d'onduleurs multiniveaux lorsqu'elles sont intégrées à un système de pompage photovoltaïque. Cette analyse vise à identifier les configurations les plus efficaces et les plus fiables pour cette application spécifique. Pour atteindre cet objectif, nous analyserons les caractéristiques techniques de chaque configuration d'onduleur multiniveaux, notamment en termes de complexité du circuit, de fréquence de commutation et de qualité de l'onde de sortie. Nous intégrerons ces configurations dans un modèle de système de pompage photovoltaïque et simulerons les performances globales pour évaluer leur impact en termes de rendement énergétique, de stabilité du système et de réponse dynamique du moteur asynchrone et de la pompe.

2 État de l'art

2.1 Historique des onduleurs multiniveaux

L'évolution des onduleurs multiniveaux remonte aux années 1970, lorsque les premières topologies ont été proposées pour répondre à la demande croissante de conversion de puissance de haute qualité dans les systèmes de transmission d'énergie et les applications industrielles. Les onduleurs multiniveaux ont été conçus pour surmonter les limitations des onduleurs traditionnels à deux niveaux, notamment en termes de distorsion harmonique et de tension de sortie.

Années 1970 : Les débuts

Les premiers concepts d'onduleurs multiniveaux ont émergé avec l'introduction des onduleurs à diodes de pincement (Neutral Point Clamped, NPC) par Nabae, Takahashi, et Akagi en 1981. Cette topologie innovante utilisait des diodes de pincement pour diviser la tension d'entrée en plusieurs niveaux, permettant ainsi de produire une sortie de tension plus lisse et de réduire les harmoniques. Le NPC a marqué une avancée significative en fournissant une solution pratique pour les applications de haute tension sans nécessiter de dispositifs de commutation à haute tension.

Années 1980 : Progrès et nouvelles topologies

Dans les années 1980, la recherche s'est intensifiée et de nouvelles topologies ont été développées pour améliorer encore les performances des onduleurs multiniveaux. Parmi celles-ci, l'onduleur à condensateurs flottants (Flying Capacitor, FC) a été proposé par Meynard et Foch en 1992. Cette topologie exploitait des condensateurs flottants pour générer des niveaux de tension supplémentaires, offrant une plus grande flexibilité et une meilleure gestion de la tension. Cependant, la complexité accrue de la gestion des condensateurs flottants et la nécessité de maintenir leur équilibre de charge ont présenté de nouveaux défis techniques.

Années 1990 : Onduleurs à cellules en cascade

Les années 1990 ont vu l'émergence des onduleurs à cellules en cascade (Cascaded H-Bridge, CHB), une topologie modulaire où plusieurs modules d'onduleurs en pont H sont connectés en série pour produire une sortie multiniveau. Cette configuration a été largement adoptée en raison de sa modularité, de sa facilité de mise à l'échelle pour des applications de haute tension et de sa capacité à fonctionner à des fréquences de

commutation plus basses, réduisant ainsi les pertes de commutation. La topologie CHB a également permis une redondance intégrée, améliorant la fiabilité globale du système.

Années 2000 : Améliorations et optimisation

Au début des années 2000, l'optimisation des techniques de modulation a été un domaine de recherche actif pour améliorer les performances des onduleurs multiniveaux. Des techniques avancées de modulation en largeur d'impulsion (PWM), telles que la modulation vectorielle de l'espace (SVPWM) et la modulation multiniveaux (Multilevel PWM), ont été développées pour optimiser la qualité de l'onde de sortie et minimiser la distorsion harmonique. Ces améliorations ont permis une intégration plus efficace des onduleurs multiniveaux dans les applications de conversion d'énergie, y compris les systèmes photovoltaïques et les entraînements de moteurs.

Années 2010 à aujourd'hui : Innovations et nouvelles applications

Les recherches récentes se sont concentrées sur la réduction de la complexité des circuits et l'amélioration de l'efficacité des onduleurs multiniveaux. Des topologies hybrides combinant les avantages des différentes configurations classiques (NPC, FC, CHB) ont été explorées pour maximiser les performances. Parallèlement, l'utilisation de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies de dispositifs, tels que les transistors à large bande interdite (Wide Bandgap, WBG) comme le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN), a permis de réduire les pertes de commutation et d'améliorer la gestion thermique.

Les onduleurs multiniveaux continuent d'évoluer avec des applications croissantes dans les systèmes d'énergie renouvelable, les réseaux intelligents (smart grids), et les systèmes de traction électrique. L'intégration de ces onduleurs dans les systèmes de stockage d'énergie et les infrastructures de recharge des véhicules électriques représente également une avenue prometteuse pour les recherches futures [5].

2.2 Différentes topologies des onduleurs multiniveaux

Les onduleurs multiniveaux se sont diversifiés en plusieurs topologies, chacune avec ses propres caractéristiques, avantages et inconvénients. Ces topologies peuvent être classées en fonction de leur conception et de leur fonctionnement. Voici une revue détaillée des principales topologies d'onduleurs multiniveaux, en se concentrant sur les quatre premières, et en mentionnant brièvement les autres.

Le Neutral Point Clamped (NPC) est l'une des premières et des plus populaires topologies d'onduleurs multiniveaux. Il utilise des diodes de pincement pour créer des niveaux de tension intermédiaires, ce qui permet de réduire la distorsion harmonique et d'améliorer la qualité de l'onde de sortie. Le NPC est largement utilisé dans les applications industrielles de haute puissance en raison de sa robustesse et de sa capacité à gérer des tensions élevées.

La topologie Flying Capacitor (FLC) utilise des condensateurs flottants pour générer des niveaux de tension supplémentaires. Cette topologie offre une grande flexibilité et une meilleure gestion de la tension, mais elle est plus complexe en termes de conception et de contrôle. La nécessité de maintenir l'équilibre de la charge des condensateurs représente un défi technique important [14].

Le Cascaded Multilevel Converter (CMC) est une topologie modulaire où plusieurs modules d'onduleurs en pont H sont connectés en série. Chaque module contribue à un niveau de tension distinct, permettant une modularité et une extensibilité supérieures. Le CMC est particulièrement adapté aux applications nécessitant des tensions élevées et offre une redondance intégrée, améliorant la fiabilité du système [15].

Le Hybrid Multilevel Converter (HMC) combine les caractéristiques de différentes topologies pour maximiser les avantages et minimiser les inconvénients. Par exemple, un onduleur hybride peut utiliser des éléments des topologies NPC et FLC pour améliorer la qualité de l'onde et la gestion de la tension tout en simplifiant la conception du circuit.

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 [5].

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

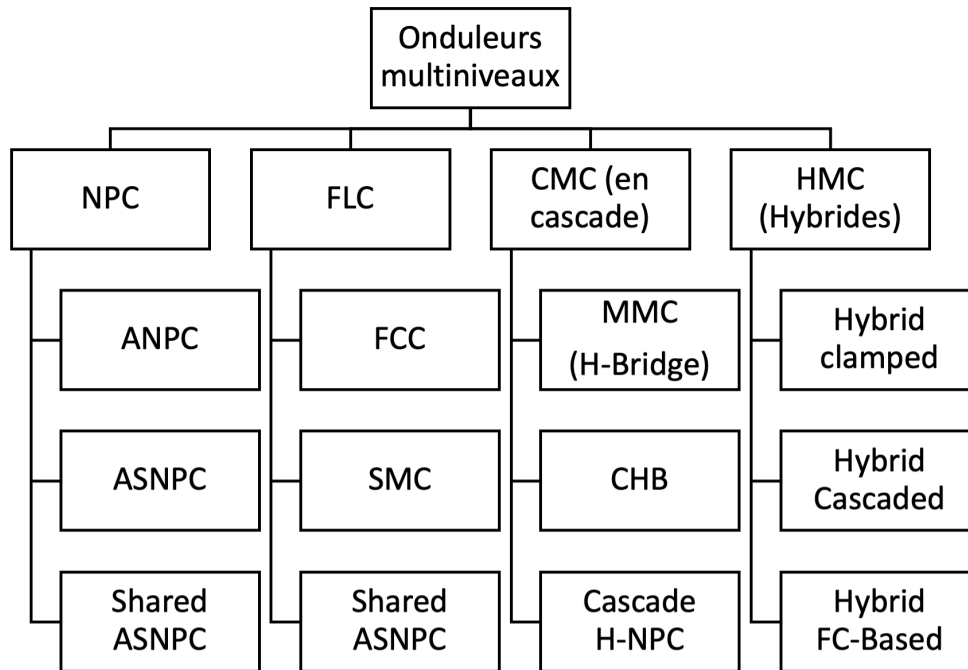


Figure 1.1: Classification des onduleurs multiniveaux [1]

3 Applications des onduleurs multiniveaux

Les onduleurs multiniveaux sont largement utilisés dans divers domaines en raison de leurs avantages significatifs. Voici quelques applications courantes :

3.1 Les onduleurs multiniveaux pour les énergies renouvelables

Les onduleurs multiniveaux jouent un rôle crucial dans l'intégration des sources d'énergie renouvelable, telles que les énergies solaires et éoliennes, dans le réseau électrique. Dans les fermes solaires, les onduleurs multiniveaux convertissent le courant continu généré par les panneaux solaires en courant alternatif pour l'injection dans le réseau électrique. Leur capacité à gérer des puissances élevées et à fournir une tension de sortie de haute qualité est essentielle pour maintenir la stabilité et la fiabilité du réseau. De plus, les onduleurs multiniveaux permettent une meilleure gestion des variations de production d'énergie renouvelable, améliorant ainsi l'efficacité globale du système. Dans les systèmes de pompage photovoltaïque, par exemple, les onduleurs multiniveaux convertissent l'énergie

des panneaux solaires pour alimenter des moteurs asynchrones qui actionnent les pompes à eau, optimisant ainsi l'efficacité de conversion et minimisant les pertes d'énergie [5].

À titre d'exemple, la figure 1.2 représente un schéma d'une alimentation solaire et la disposition de l'onduleur dans ce processus

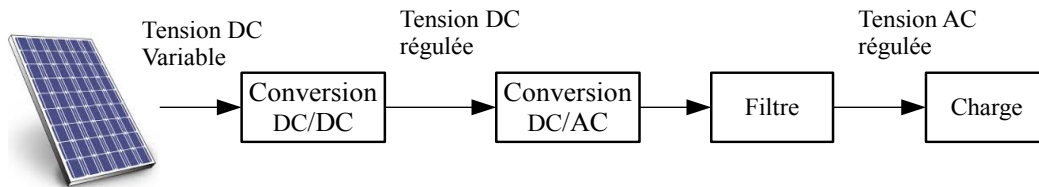


Figure 1.2: Chaîne de conversion d'énergies renouvelables :Alimentation directe d'une charge [1]

3.2 Applications de grande puissance

Dans les applications de grande puissance, les onduleurs multiniveaux offrent des avantages significatifs. Ils réduisent les contraintes dues aux phénomènes électromagnétiques et permettent d'augmenter la puissance en générant des tensions plus élevées. Cela les rend idéaux pour alimenter des charges exigeantes nécessitant une alimentation électrique stable et de haute qualité.

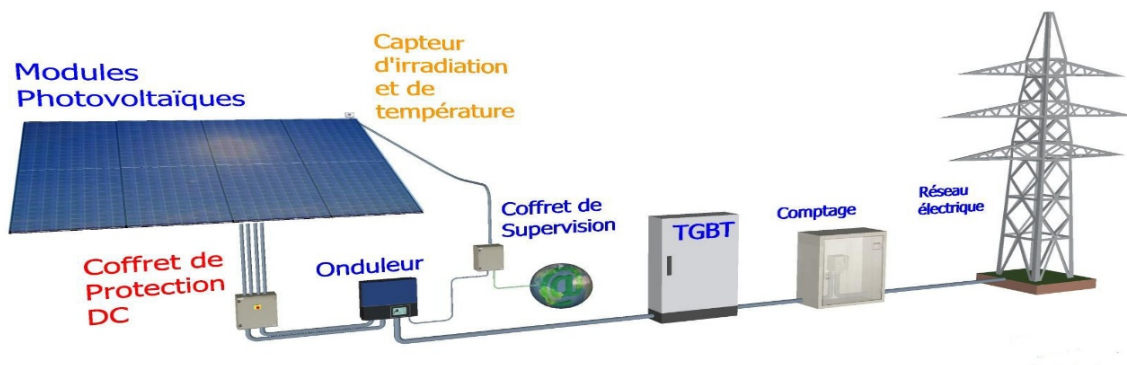


Figure 1.3: Chaîne de conversion d'énergies renouvelables :Raccordement au réseau électrique [2]

3.3 Commande des moteurs à courant alternatif

Les onduleurs multiniveaux sont également utilisés pour alimenter des moteurs à courant alternatif à vitesse variable. Leur capacité à fournir des tensions ou courants de fréquences et d'amplitudes variables est essentielle pour contrôler la vitesse et le fonctionnement de ces moteurs. Les techniques de commande avancées associées aux onduleurs multiniveaux garantissent un fonctionnement efficace et précis des moteurs électriques.

4 Avantages des onduleurs multiniveaux:

les onduleurs multiniveaux présentent bien des avantages par rapport à leurs version initiale à deux niveaux, seul inconvénient, la différence de complexité de structure entre les deux convertisseurs.

4.1 Réduction du taux d'harmoniques

L'un des principaux avantages des onduleurs multiniveaux est leurs capacité à réduire considérablement la distorsion harmonique totale (THD) de la tension de sortie. En produisant plusieurs niveaux de tension, les onduleurs multiniveaux créent une forme d'onde de sortie qui est plus proche d'une sinusoïde pure. Cela réduit les harmoniques de haute fréquence, ce qui améliore la qualité de l'alimentation électrique et diminue les pertes associées aux harmoniques dans les moteurs et autres charges inductives. Une réduction de la THD est essentielle pour augmenter l'efficacité des systèmes électriques et prolonger la durée de vie des équipements connectés [16].

4.2 Réduction des pertes de commutation

Les onduleurs multiniveaux permettent une réduction significative des pertes de commutation par rapport aux onduleurs traditionnels. Dans un onduleur à deux niveaux, les dispositifs de commutation doivent supporter toute la tension d'entrée, ce qui entraîne des pertes de commutation élevées. En revanche, les onduleurs multiniveaux divisent la tension totale entre plusieurs niveaux, ce qui permet de réduire la tension de commutation sur chaque dispositif. De plus, les techniques de modulation avancées utilisées dans les onduleurs multiniveaux, telles que la modulation vectorielle de l'espace (SVPWM), permettent

d'optimiser les instants de commutation pour minimiser les pertes. Cette réduction des pertes de commutation améliore l'efficacité énergétique globale du système et réduit les besoins de dissipation thermique [].

4.3 Capacité à gérer des tensions élevées

Les onduleurs multiniveaux sont particulièrement avantageux pour les applications nécessitant la gestion de tensions élevées. En divisant la tension d'entrée totale en plusieurs niveaux, ces onduleurs permettent l'utilisation de composants de puissance à plus faible tension, réduisant ainsi le stress électrique sur chaque composant. Cela non seulement augmente la fiabilité du système, mais permet aussi de réaliser des conceptions modulaires plus facilement évolutives. Cette capacité à gérer des tensions élevées est cruciale dans les applications de transmission HVDC et les systèmes d'énergie renouvelable, où la stabilité et la performance à haute tension sont essentielles.

En résumé, les onduleurs multiniveaux offrent des avantages techniques notables, notamment la réduction de la distorsion harmonique totale, la diminution des pertes de commutation et la capacité à gérer des tensions élevées. Ces avantages permettent d'améliorer l'efficacité énergétique, la qualité de l'alimentation électrique et la fiabilité des systèmes dans lesquels ils sont intégrés [17].

4.4 Comparaison entre onduleur conventionnel et onduleur multiniveaux

Les onduleurs conventionnels et les onduleurs multiniveaux sont deux types d'équipements utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance, l'objectif de cette comparaison est d'examiner en détail ces deux technologies d'onduleurs afin de comprendre leurs avantages et leurs inconvénients.

Tableau 1.1: Comparatif entre les onduleurs conventionnels et les onduleurs multiniveaux

convertisseur	onduleur conventionnel	onduleur multiniveaux
1	THD élevé en tension de sortie	Faible THD en tension de sortie
2	Contraintes de commutation élevées	Contraintes de commutations réduites
3	Non applicable pour des tensions élevées	Applicable pour des tensions élevées
4	Ne produit pas des tensions élevées	Peut produire des tensions élevées
5	Une fréquence de commutation plus élevée est utilisée	Une faible fréquence de commutation peut être utilisée
6	Les pertes de commutation sont élevées	Réduction des pertes de commutations
7	La structure du bus d'alimentation et les schémas de contrôle sont simples	Complexité de la structure

5 Stratégies de modulation

Les stratégies de modulation des onduleurs multiniveaux sont cruciales pour améliorer la qualité de l'onde de sortie, réduire la distorsion harmonique et augmenter l'efficacité énergétique. Ces stratégies peuvent être classées en deux grandes catégories : les stratégies basées sur les vecteurs spatiaux et les stratégies basées sur les niveaux de tension.

5.1 Stratégies de modulation basées sur les vecteurs spatiaux

Les stratégies de modulation basées sur les vecteurs spatiaux (SVM et SVC) utilisent une approche géométrique pour déterminer les instants de commutation des dispositifs de puissance. La modulation par vecteurs spatiaux (SVM), la plus connue est une technique avancée qui génère des signaux de commande pour les onduleurs en utilisant une représentation vectorielle de la tension de sortie. Cette méthode permet d'obtenir une tension de sortie avec une distorsion harmonique minimale et une meilleure utilisation de la tension d'entrée. La modulation par vecteurs spatiaux pour onduleurs.

5.2 Stratégies de modulation basées sur les niveaux de tension

Les stratégies de modulation basées sur les niveaux de tension sont plus variées et comprennent plusieurs techniques importantes :

5.2.1 NLC (Nearest Level Control)

La modulation par contrôle du niveau le plus proche (NLC) est une technique simple et efficace où la tension de sortie est ajustée pour se rapprocher le plus possible du niveau de tension souhaité. Cette méthode est avantageuse en termes de simplicité de mise en œuvre et de réduction des pertes de commutation, bien qu'elle puisse introduire des distorsions harmoniques à des fréquences spécifiques.

5.2.2 SHE (Selective Harmonic Elimination)

La modulation par élimination sélective des harmoniques (SHE) vise à éliminer spécifiquement certaines harmoniques indésirables de la tension de sortie. En résolvant des équations non linéaires, cette méthode détermine les instants de commutation qui annulent les harmoniques sélectionnées. La SHE est particulièrement efficace pour améliorer la qualité de l'onde de sortie et réduire les pertes dans les charges inductives.

5.2.3 PWM (Pulse Width Modulation)

La modulation en largeur d'impulsion (PWM) fonctionne en commutant les transistors de puissance à haute fréquence pour moduler la largeur des impulsions appliquées à la charge. En ajustant la durée de chaque impulsion, la PWM contrôle efficacement la tension moyenne et la forme de l'onde de sortie, permettant de reproduire une sinusoïde et de réduire la distorsion harmonique. Cette technique optimise également l'efficacité des onduleurs en minimisant les pertes de commutation.

5.3 Modulation hybride

La modulation hybride combine différentes techniques de modulation pour tirer parti des avantages de chacune. Par exemple, elle peut combiner la modulation par contrôle du niveau le plus proche avec la modulation par vecteurs spatiaux pour optimiser la qualité de l'onde de sortie et l'efficacité énergétique. La flexibilité de cette approche permet de l'adapter à diverses applications et configurations d'onduleurs multiniveaux.

Le diagramme suivant résume en détail la classification des techniques de modulation pour les onduleurs multiniveaux ainsi que les sous-stratégies qui peuvent être en tirées:

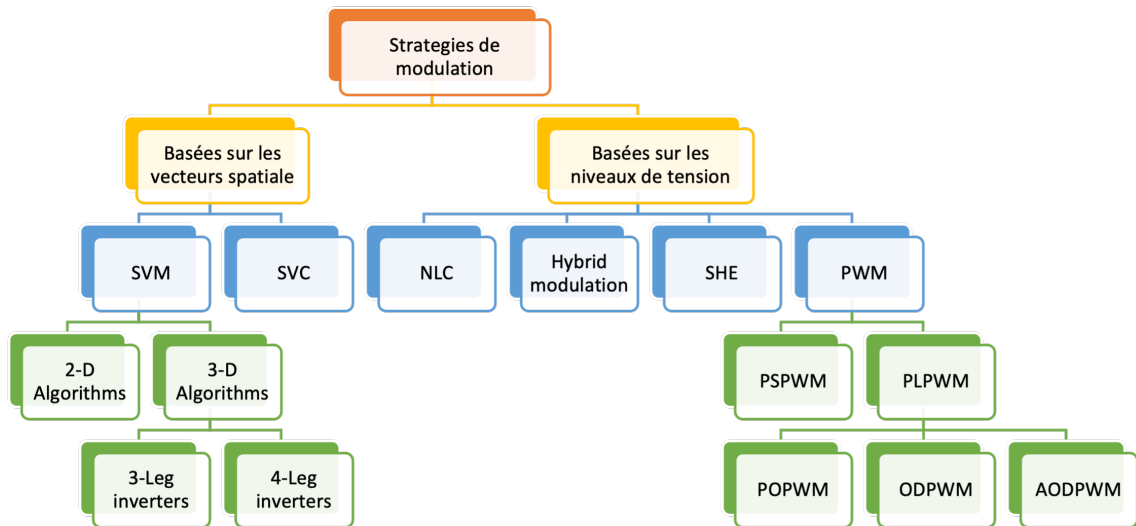


Figure 1.4: Classification des stratégies de modulation [4]

Conclusion

Ce premier chapitre a établi les fondations essentielles de l'étude en offrant une vue d'ensemble exhaustive des onduleurs multiniveaux. Il a commencé par situer le contexte de l'étude, soulignant l'importance croissante de ces dispositifs dans les systèmes de conversion de puissance, où la qualité de l'onde et l'efficacité énergétique sont primordiales. L'état de l'art a retracé l'évolution historique des onduleurs multiniveaux, détaillant les principales topologies comme le NPC, le FLC, le CMC et le HMC, tout en mentionnant brièvement les variantes dérivées.

L'exploration des applications des onduleurs multiniveaux a démontré leur rôle crucial dans divers domaines, tels que les systèmes d'énergies renouvelables et les entraînements de moteurs industriels. Les avantages techniques, comme la réduction du THD, la diminution des pertes de commutation et la capacité à gérer des tensions élevées, ont été mis en avant. Les différentes stratégies de modulation, notamment la PWM et ses variantes, ont également été discutées.

En synthétisant ces divers aspects, ce chapitre a fourni une compréhension approfondie des onduleurs multiniveaux, de leur évolution historique, de leurs applications clés, de leurs avantages techniques et des stratégies de modulation utilisées. Cela établit une base solide pour les analyses comparatives et les études expérimentales des chapitres suivants, visant à optimiser les performances des onduleurs multiniveaux dans des applications spécifiques.

Chapitre 2

Méthodologies et outils

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail les topologies d'onduleurs multiniveaux afin de fournir une compréhension approfondie des différentes approches disponibles. Nous commencerons par une description des topologies Neutral Point Clamped (NPC), Cascaded H-Bridge (CHB), Packed U-cell (PUC) et Reduced Semiconductor Inverter (RSI), en mettant en évidence leurs avantages distincts en termes de performance, de complexité structurelle et de contrôle. Les circuits électriques représentant ces topologies ainsi que les tableaux d'états de commutation seront présentés pour une meilleure visualisation et compréhension.

Ensuite, nous procéderons à une comparaison parallèle des quatre topologies, en analysant leurs configurations, le nombre de commutateurs semi-conducteurs, et la nature des sources de tension. Cette comparaison permettra de mettre en évidence les différences et les similitudes entre les topologies étudiées.

1 La topologie d'onduleur multiniveaux neutral point clamped (NPC)

1.1 Description de la Topologie NPC

La topologie NPC (Neutral Point Clamped) est une famille de convertisseurs multiniveaux caractérisée par l'utilisation de diodes de clamping qui divisent la tension à travers les

commutateurs de puissance. Introduite simultanément par Baker et Nabae et al. En 1981, la topologie NPC reste la plus connue et la plus répandue parmi les convertisseurs multiniveaux. Les diodes de clamping permettent de créer des niveaux de tension intermédiaires, réduisant les contraintes sur les commutateurs et améliorant ainsi la fiabilité et l'efficacité du système [6].

La structure de la topologie NPC est composée de plusieurs étages de commutateurs et de diodes de clamping, organisés de manière à diviser la tension d'entrée en plusieurs niveaux de tension de sortie. Un onduleur NPC typique à trois niveaux, par exemple, comprend deux sources de tension continues, quatre commutateurs (IGBT) et deux diodes de clamping par phase [6].

Les niveaux de tension intermédiaires sont créés en commutant les IGBT de manière appropriée. Par exemple, pour générer une tension de sortie V_{dc} , deux IGBT sont fermés et les autres sont ouverts, permettant ainsi au point de sortie de se connecter à la moitié de la tension d'entrée.

La configuration NPC permet une distribution uniforme des tensions et des courants entre les différents commutateurs et diodes, ce qui réduit les contraintes sur chaque composant. Cela améliore non seulement la fiabilité et la durée de vie des composants, mais également l'efficacité globale du système. La capacité à créer plusieurs niveaux de tension intermédiaires permet également de réduire les harmoniques dans la forme d'onde de sortie, améliorant ainsi la qualité de l'alimentation électrique [7].

1.2 La topologie NPC à 5 Niveaux

1.2.1 Structure de la NPC à 5 niveaux

Pour une topologie NPC à 5 niveaux, la structure typique utilise quatre sources de tension continue (ou un bus continu de condensateurs). La tension de sortie est obtenue en combinant ces sources de manière contrôlée grâce aux huit (8) IGBT présents dans la structure à cinq niveaux, Les diodes seront quant à eux reliées entre deux sources successives, permettant de reproduire les différents niveaux intermédiaires [8].

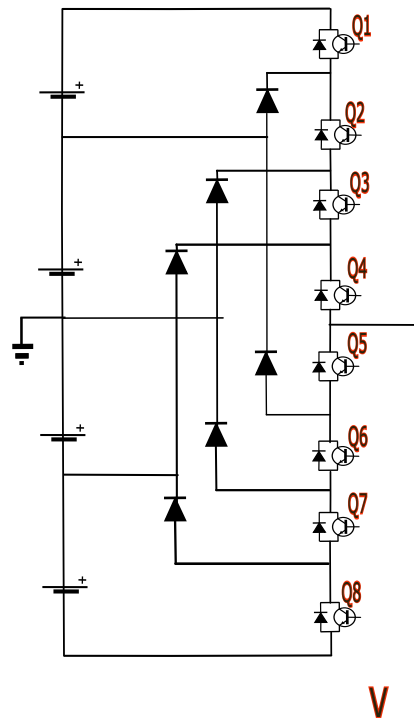


Figure 2.1: Circuit électrique monophasé de la NPC à 5 niveaux

1.2.2 Mode de fonctionnement de la NPC 5 niveaux

La table de commutation 2.1 montre les états des IGBT pour générer chaque niveau de tension .

Tableau 2.1: Table de commutation NPC à 5 niveaux

Niveau de tension	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
$2V_{dc}$	1	1	1	1	0	0	0	0
V_{dc}	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0
$-V_{dc}$	0	0	0	1	1	1	1	0
$-2V_{dc}$	0	0	0	0	1	1	1	1

Le principe de fonctionnement repose sur la gestion des états de ces interrupteurs pour atteindre les niveaux de tension souhaités. Par exemple, pour obtenir une tension de sortie de $2V_{dc}$, les interrupteurs Q1, Q2, Q3 et Q4 sont fermés, permettant au courant de circuler directement à travers les interrupteurs supérieurs, appliquant ainsi la totalité de la tension d'alimentation à la sortie. Les diodes de clamping, dans cette configuration, ne conduisent pas car il n'y a pas de différence de potentiel nécessitant leur intervention.

Pour un niveau de tension de V_{dc} , les interrupteurs Q2, Q3, Q4 et Q5 sont fermés. Le

courant circule alors à travers Q2, Q3 et Q4, puis passe par Q5, divisant ainsi la tension d'alimentation par deux, ce qui produit V_{dc} à la sortie. Les diodes de clamping jouent un rôle crucial dans cette configuration en équilibrant la tension entre les points neutres intermédiaires, assurant une distribution stable de la tension [8].

1.3 Structure triphasée de la NPC 5 niveaux

Pour passer de la structure monophasée à la structure triphasée, il faut dupliquer le circuit monophasé pour chaque phase (Phase A, Phase B, Phase C). Chaque phase utilise la même topologie NPC avec les mêmes niveaux de tension, mais les commutations sont décalées de 120° pour obtenir une forme d'onde triphasée équilibrée [9].

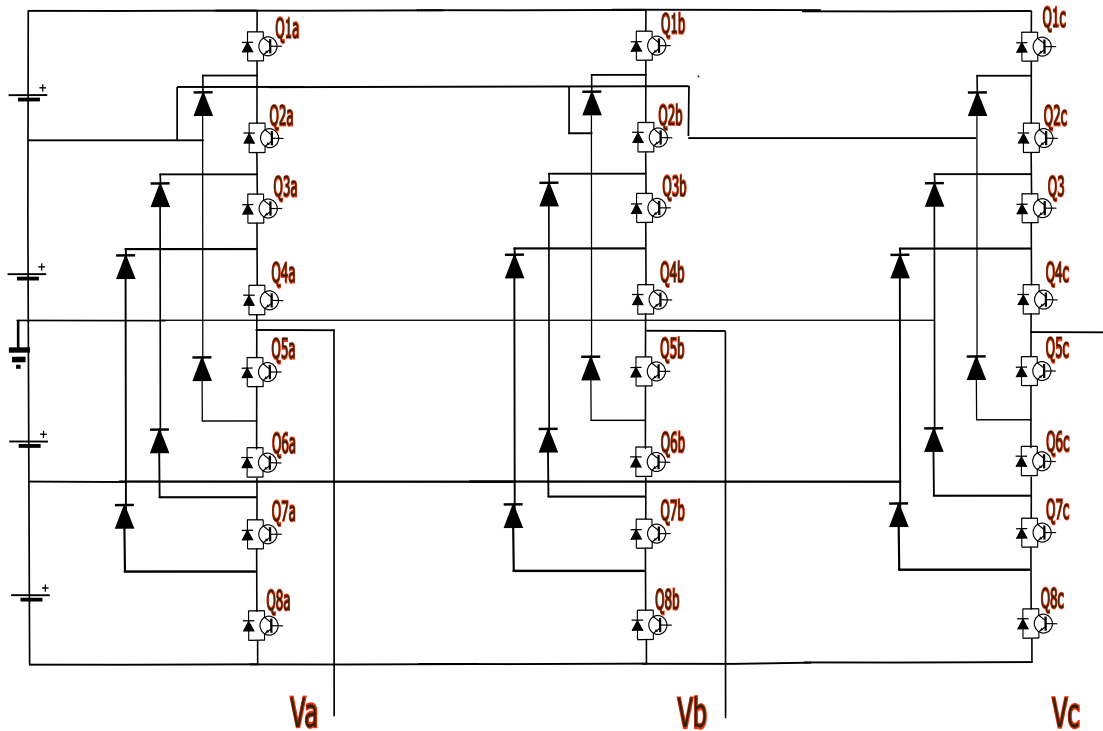


Figure 2.2: Circuit électrique triphasé de la NPC 5 niveaux

Les tensions de ligne (V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}) sont les différences de potentiel entre les phases et non seulement par rapport au neutre. En combinant les niveaux de tension des différentes phases, on peut obtenir plus de niveaux intermédiaires de tension suivant les équations suivantes:

$$V_{AB} = V_A - V_B, V_{BC} = V_B - V_C, V_{CA} = V_C - V_A, \quad (2.1)$$

À titre d'exemple, si les phases A et B sont à V_{dc} et $-2V_{dc}/$ respectivement, alors $V_{AB} = (V_{dc}) - (-2V_{dc}) = V_{dc} + 2V_{dc} = 3V_{dc}$.

Le tableau suivant montre comment sont organisés les commutateurs pour disposer des neufs (9) niveaux pour la tension composée V_{AB} ainsi que les tension simple (V_A et V_B) correspondantes.

Tableau 2.2: Table de commutation pour la structure triphasé NPC

V_{AB}	V_A	V_B	Commutateurs fermés							
$4V_{dc}$	$2V_{dc}$	$-2V_{dc}$	Q_{1a}	Q_{2a}	Q_{3a}	Q_{4a}	Q_{5b}	Q_{6b}	Q_{7b}	Q_{8b}
$3V_{dc}$	$2V_{dc}$	$-V_{dc}$	Q_{1a}	Q_{2a}	Q_{3a}	Q_{4a}	Q_{4b}	Q_{5b}	Q_{6b}	Q_{7b}
$2V_{dc}$	$2V_{dc}$	0	Q_{1a}	Q_{2a}	Q_{3a}	Q_{4a}	Q_{3b}	Q_{4b}	Q_{5b}	Q_{6b}
V_{dc}	$2V_{dc}$	V_{dc}	Q_{1a}	Q_{2a}	Q_{3a}	Q_{4a}	Q_{2b}	Q_{3b}	Q_{4b}	Q_{5b}
0	0	0	Q_{3a}	Q_{4a}	Q_{5a}	Q_{6a}	Q_{1b}	Q_{2b}	Q_{7b}	Q_{8b}
$-V_{dc}$	V_{dc}	$2V_{dc}$	Q_{2a}	Q_{3a}	Q_{4a}	Q_{5a}	Q_{1b}	Q_{2b}	Q_{3b}	Q_{4b}
$-2V_{dc}$	0	$2V_{dc}$	Q_{3a}	Q_{4a}	Q_{5a}	Q_{6a}	Q_{1b}	Q_{2b}	Q_{3b}	Q_{4b}
$-3V_{dc}$	$-V_{dc}$	$2V_{dc}$	Q_{4a}	Q_{5a}	Q_{6a}	Q_{7a}	Q_{1b}	Q_{2b}	Q_{3b}	Q_{4b}
$-4V_{dc}$	$-2V_{dc}$	$2V_{dc}$	Q_{5a}	Q_{6a}	Q_{7a}	Q_{8a}	Q_{1b}	Q_{2b}	Q_{3b}	Q_{4b}

2 La topologie d'onduleur multiniveaux Cascaded H-Bridge (CHB)

2.1 Description de la topologie CHB

La topologie CHB (Cascaded H-Bridge) est une configuration modulaire et flexible largement utilisée dans les applications de haute puissance et de haute tension.

Cette configuration d'onduleurs multiniveaux est constituée de plusieurs modules H-bridge connectés en série. Chaque pont en H est composé de quatre interrupteurs (généralement des transistors) disposés en deux branches, formant un pont en H. En alternant les états des interrupteurs, cette configuration permet de contrôler la tension de sortie avec précision. Chaque module en pont H peut générer trois niveaux de tension de sortie, et le nombre de niveaux de sortie est égal à $2n + 1$, où n est le nombre de sources DC pour un onduleur multiniveaux en cascade.

2.2 La topologie CHB à 5 niveaux

2.2.1 Structure de la CHB à 5 niveaux

La structure typique d'un onduleur CHB (figure 2.3) à 5 niveaux utilise deux modules en pont H connectés en série. Chaque module en pont H est composé de quatre interrupteurs

(Q1, Q2, Q3, Q4 pour le premier module et Q5, Q6, Q7, Q8 pour le second module). La tension de sortie est obtenue en combinant les tensions générées par chaque module de manière contrôlée.

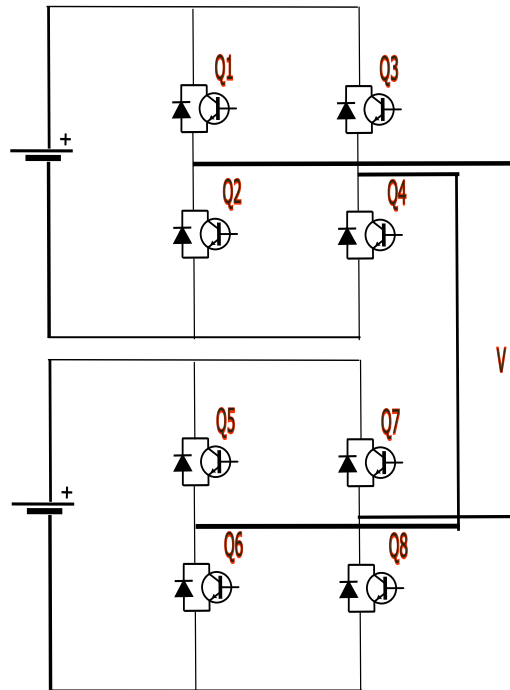


Figure 2.3: Circuit électrique monophasé de la CHB à 5 niveaux

2.2.2 Mode de fonctionnement de la CHB 5 niveaux

La table de commutation 2.3 montre les états des IGBT pour générer chaque niveau de tension .

Tableau 2.3: Table de commutation de la CHB à 5 niveaux

Niveau de tension	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
$2V_{dc}$	1	0	0	1	1	0	0	1
V_{dc}	1	0	0	1	0	1	0	1
0	0	1	0	1	0	1	0	1
$-V_{dc}$	0	1	1	0	0	1	0	1
$-2V_{dc}$	0	1	1	0	0	1	0	1

Ce convertisseur fonctionne en combinant les sorties de deux modules en pont H, chacun étant capable de produire trois niveaux de tension : V_{dc} , 0, et $-V_{dc}$. La modulation de la tension de sortie s'effectue en contrôlant précisément les interrupteurs de chaque module, permettant ainsi d'additionner ou de soustraire les tensions des modules pour

obtenir le niveau souhaité. Par exemple, pour générer une tension de $2V_{dc}$, les interrupteurs Q1 et Q4 du premier module en pont H, ainsi que Q5 et Q8 du second module en pont H, sont fermés. Chaque module produit alors V_{dc} , et la combinaison des deux modules en série résulte en une tension totale de $2V_{dc}$.

Pour obtenir une tension de V_{dc} , un seul module H-Bridge est activé pour produire V_{dc} tandis que l'autre module est configuré pour produire 0V. Par exemple, les interrupteurs Q1 et Q4 du premier module sont fermés pour générer V_{dc} , tandis que les interrupteurs Q5 et Q6 du second module sont fermés pour produire 0V, donnant ainsi une tension de sortie totale de V_{dc} [10].

2.3 Structure triphasée de la CHB à 5 niveaux

Pour passer de la structure monophasée à la structure triphasée, il suffit de dupliquer le circuit monophasé pour chaque phase (Phase A, Phase B, Phase C), ce qui nous fera un total de six (6) ponts en 'H'. Les commutations de chaque phase sont naturellement décalées de 120° pour obtenir une forme d'onde triphasée équilibrée [10].

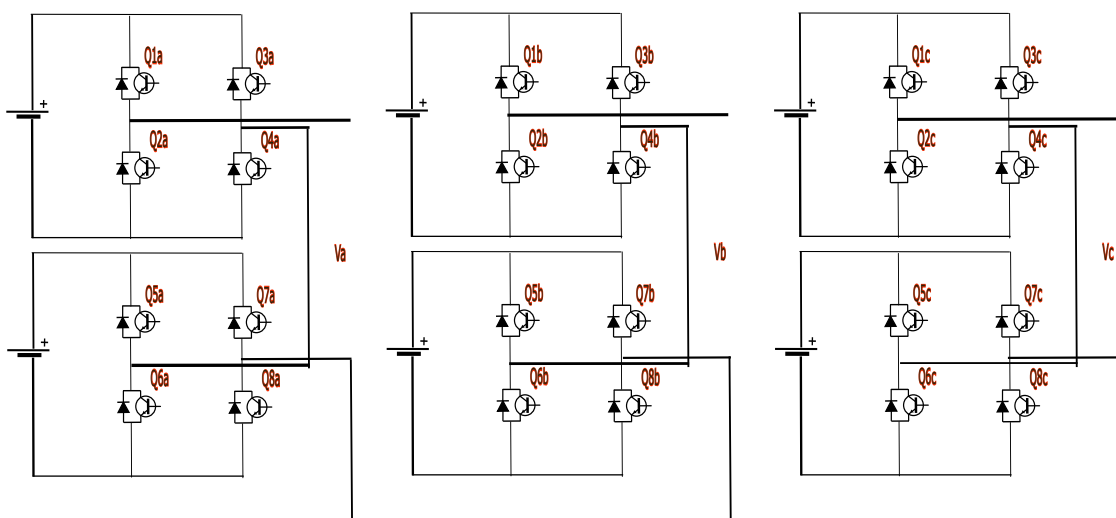


Figure 2.4: Circuit électrique triphasé de la CHB 5 niveaux

Les neuf (9) niveaux de tensions a la a sortie d'une phase composées pour la structure triphasé de la CHB seront générés sur les mêmes bases que pour la NPC (comme pour toutes les configurations). L'agencement des états des IGBT pour l'obtention des niveaux correspondants au tensions composées peuvent être tiré en analysant la structure de la topologie en triphasé 2.4 et en adoptant l'équation 1.3

malgré le même nombre de commutateurs (8) que pour la NPC, la différence réside dans l'organisation et la coordination de l'état (fermé/ouvert) des interrupteurs, la structure des deux topologie étant différentes.

A titre de comparaison, pour obtenir le niveaux de tension $-4V_{dc}$ ce n'est plus cette disposition de commutateurs fermé (qui est celle de la NPC) : $Q_{5a} Q_{6a} Q_{7a} Q_{8a} Q_{1b} Q_{2b} Q_{3b} Q_{4b}$ mais plutôt celle ci : $Q_{2a} Q_{3a} Q_{6a} Q_{7a} Q_{1b} Q_{4b} Q_{5b} Q_{8b}$.

3 La topologie d'onduleurs multiniveaux Packed U-cell (PUC)

3.1 Description de la topologie PUC

La topologie PUC (Packed U-Cell) est une approche avancée pour les onduleurs multiniveaux. Elle combine les avantages des topologies traditionnelles tout en réduisant le nombre de composants requis, ce qui simplifie la conception et améliore l'efficacité globale du système [11].

La topologie PUC utilise des cellules U compactes (Packed U-Cells) pour générer des niveaux de tension multiniveaux. Chaque cellule U est composée de deux IGBT, permettant de produire plusieurs niveaux de tension avec un nombre réduit de composants in introduit dans la structure. Les principes de fonctionnement, les avantages et les inconvénients sont similaires à ceux des topologies NPC et CHB, mais avec des améliorations en termes de réduction des composants et donc de complexité, a noter que les sources de tensions pour cette topologie sont asymétrique :

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

3.2 La topologie PUC à 5 Niveaux

3.2.1 Structure de la PUC à 5 niveaux

Pour une topologie PUC à 5 niveaux, la structure utilise deux cellules U compactes connectées en série [11] comme illustré sur la figure 2.5. La tension de sortie est obtenue en combinant les deux tensions V_a et V_b ou $V_a = 2 * V_{DC}$ et $V_b = V_{dc}$ donc $V_a = 2 * V_b$.

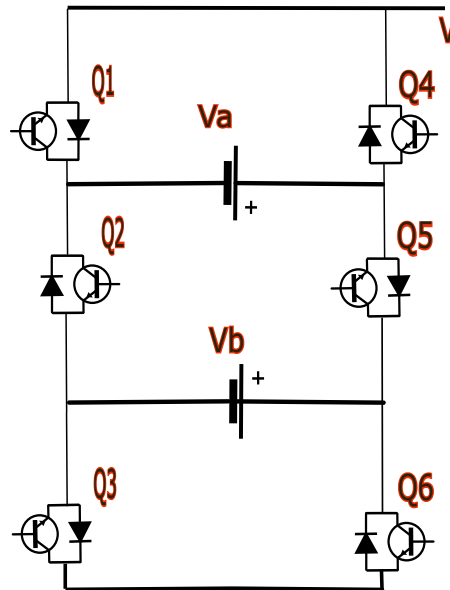


Figure 2.5: Circuit électrique monophasé de la PUC 5 niveaux

3.2.2 Mode de fonctionnement de la PUC à 5 niveaux

La table de commutation suivante montre les états des commutateurs pour générer chaque niveau de tension :

Tableau 2.4: All Possible Switching States of PUC Inverter

Tension de sortie	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
$V_a = +2V_{dc}$	1	0	0	0	1	1
$V_b = +V_{dc}$	1	1	0	0	0	1
0	1	1	1	0	0	0
$-V_b = -V_{dc}$	0	0	1	1	1	0
$-V_a = -2V_{dc}$	0	1	1	1	0	0

La topologie PUC (Packed U Cell) à cinq niveaux fonctionne en utilisant des combinaisons spécifiques d'interrupteurs ainsi que sa caractéristique de tension asymétriques pour générer différentes tensions de sortie. Voici quelques exemples de niveaux de tension de sortie et leurs combinaisons d'interrupteurs à l'état fermé :

Pour obtenir $+2V_{dc}$:

Les interrupteurs Q_1 , Q_5 , et Q_6 sont fermés. Les interrupteurs Q_2 , Q_3 , et Q_4 sont ouverts.

Pour obtenir $+V_{dc}$:

Les interrupteurs Q_1 , Q_2 , et Q_6 sont fermés. Les interrupteurs Q_3 , Q_4 , et Q_5 sont ouverts.

Pour obtenir 0V :

Les interrupteurs Q_1 , Q_2 , et Q_3 sont fermés. Les interrupteurs Q_4 , Q_5 , et Q_6 sont ouverts. En outre, l'asymétrie des tensions dans cette structure est notable (V_a est égale à V_{dc} et V_b est égale à la moitié de V_a , soit $\frac{V_{dc}}{2}$), Cette disparité des deux sources de tensions nécessite une gestion appropriée des états des commutateurs pour maintenir la tension de sortie à la valeur souhaitée.

3.3 Structure triphasée de la PUC à 5 niveaux

En reproduisant le circuit monophasé a trois reprises, neuf (9) cellules en U seront donc nécessaires pour la structure de la topologie en triphasé, avec cette configuration, la PUC reste bien moins complexe à réaliser que la NPC et la CHB, Chaque phase suit la même topologie en monophasé avec les mêmes niveaux de tension et les commutations sont la aussi, bien évidemment, décalée de 120° [11].

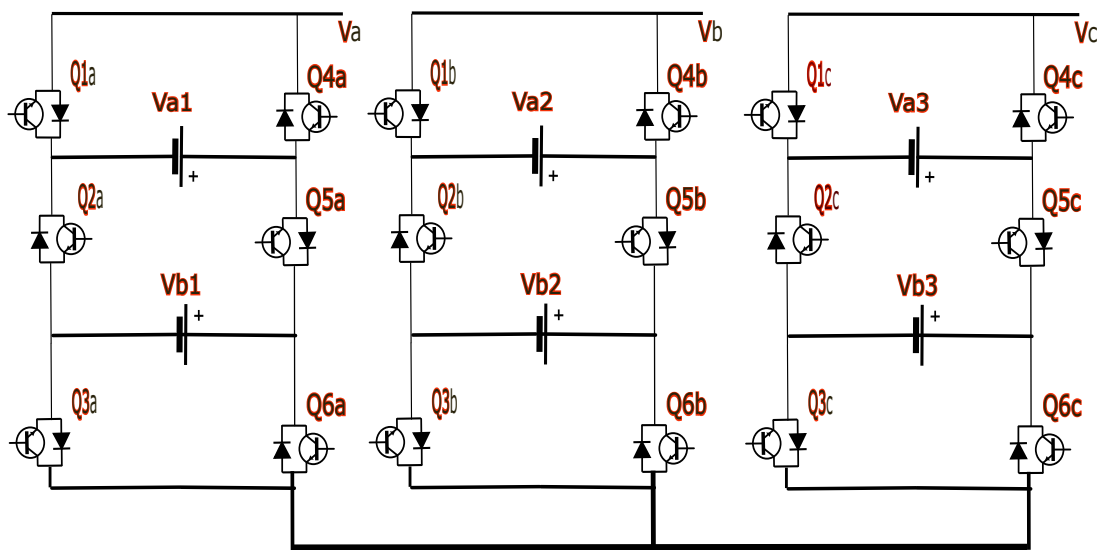


Figure 2.6: Circuit électrique triphasé de la PUC 5 niveaux

La matrice de commutation pour l'apparition des niveaux des tensions composées suit elle aussi le même principe que celui des autres topologies et en appliquant l'équation 1.3, mais pour la 'PUC', moins de composants IGBT signifierait, comme dans le fonctionnement en monophasé, moins de commutations, et donc, contrairement aux topologies NPC et CHB ou huit (8) commutateurs sont nécessaires pour avoir les neuf (9) étages de tensions, pour la PUC seul 6 commutateurs (trois dans chaque phase) seulement sont sollicités, par

exemple, pour avoir la tension la plus élevée avec une valeur de $4V_{dc}$ pour la phase V_{AB} , seuls les interrupteurs Q_{1a} , Q_{2a} , Q_{6a} , Q_{3b} , Q_{4b} et Q_{5b} sont à l'état fermé

4 La topologie Reduced semi-conductor inverter (RSI)

4.1 Description de la topologie RSI

L'onduleur RSI (Reduced Semiconductor Inverter) est une variante innovante de la topologie H-bridge, en la modifiant et en ajoutant un autre circuit auxiliaire au pont 'H'. Cette topologie propose une approche pour réduire le nombre de commutateurs tout en maintenant un nombre significatif de niveaux de tension de sortie [3].

4.2 La topologie RSI à 5 Niveaux

4.2.1 Structure de la RSI à 5 niveaux

Pour une topologie RSI à 5 niveaux, la structure utilise un pont en H avec un circuit auxiliaire composé de quatre diodes et d'un IGBT supplémentaire. La tension de sortie est obtenue en combinant les tensions produites par le pont en H et le circuit auxiliaire, Ce circuit est relié au point central du bus de l'alimentation continu permettant d'obtenir un niveaux intermédiaire de tension [3].

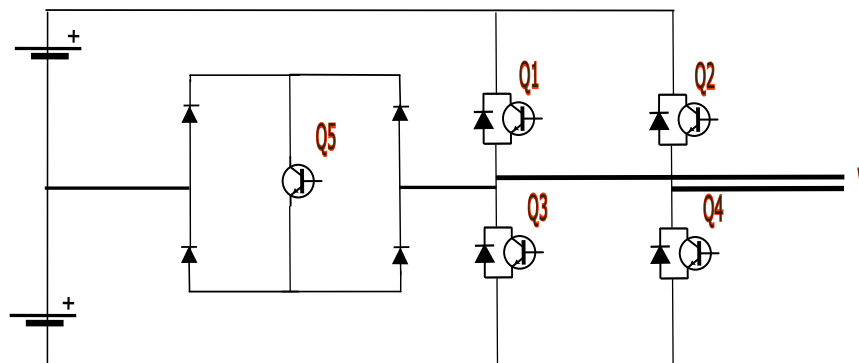


Figure 2.7: Circuit électrique monophasé de la RSI à 5 niveaux

4.2.2 Mode de fonctionnement de la RSI à 5 niveaux

Pour obtenir une tension de sortie de $2V_{dc}$, les interrupteurs $Q1$ et $Q4$ sont activés (fermés) comme représenté dans le tableau 2.5. Dans cette configuration, le courant circule

directement à travers les interrupteurs Q1 et Q4, ce qui permet d'appliquer la totalité de la tension d'alimentation ($2V_{dc}$) à la sortie. Les autres interrupteurs (Q2, Q3, Q5) sont désactivés (ouverts).

Pour générer une tension de V_{dc} , les interrupteurs Q1 et Q5 sont activés. Le courant traverse alors Q1 et passe par le circuit auxiliaire impliquant Q5, ce qui permet de diviser la tension en V_{dc} . Le circuit auxiliaire, avec Q5 et les diodes associées, joue un rôle crucial en créant un chemin alternatif pour le courant, reliant ainsi la sortie à la moitié du bus de tension continue (à une seule des deux sources). Les autres interrupteurs (Q2, Q3, Q4) restent ouverts, empêchant toute autre circulation de courant.

Tableau 2.5: Table de commutation RSI à 5 niveaux

Niveau de tension	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
$2V_{dc}$	1	0	0	1	0
V_{dc}	0	1	0	0	1
0	1	1	0	0	0
$-V_{dc}$	0	0	0	1	1
$-2V_{dc}$	0	1	1	0	0

4.3 Structure triphasée de la RSI 5 niveaux

Le nombre de composants étant moins importants en monophasé, il sera de même pour la structure triphasé, avec nombre de trois ponts en 'H' et 3 circuits auxiliaire, le nombre d'interrupteurs sera largement diminué.

Bien évidemment, c'est toujours le même principe et la même équation 1.3 qui sont adoptés ici pour avoir les neuf (9) niveaux de la tension composé, Pour la PUC, le nombre de commutateurs sollicités (6) était moins important que pour la CHB et la NPC (8), pour la RSI, ce nombre va encore diminuer, en ne comptant cette fois que quatre (4) IGBT, par exemple, le niveau $4V_{dc}$ pour la phase V_{AB} , cela implique la fermeture des commutateurs Q_{1a} , Q_{4a} , Q_{2b} , Q_{3b} .

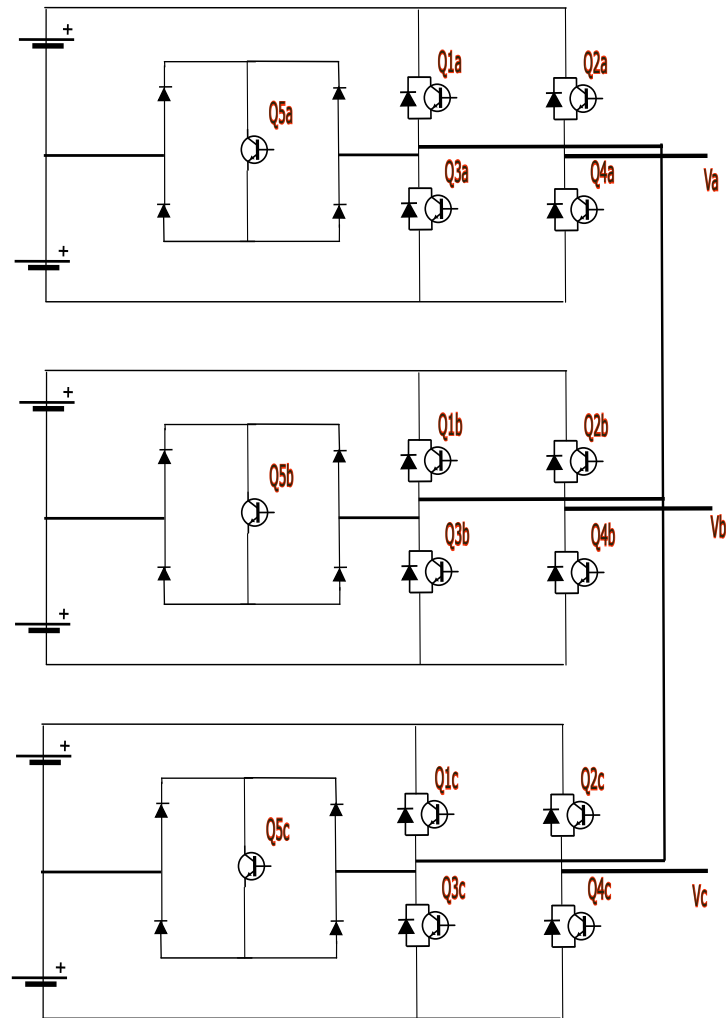


Figure 2.8: Circuit électrique triphasé de la RSI 5 niveaux

5 Présentation Parallèle des Architectures des Onduleurs multiniveaux

Il est question dans cette partie, d'une mise en parallèle les structures des topologies choisies ainsi que l'organisation et l'arrangement des composants électroniques qui les constituent : les sources d'alimentation continues, leur nature (symétrique, asymétrique), le nombre de commutateurs semi-conducteurs, et leurs configurations. Le tableau 2.6 résume parfaitement cette mise en parallèle. Ceci nous nous facilitera bien vivement l'appréhension des présentations des résultats de chaque topologie.

- **Source de tension CC** : Il existe deux manières principales de créer des formes d'onde à plusieurs niveaux dans les onduleurs multiniveaux. La première méthode consiste à diviser le bus continu en plusieurs sections à l'aide de condensateurs pour

former une source de tension multiniveau. Cette technique est souvent utilisée dans les topologies NPC (Neutral Point Clamped), où les condensateurs sont configurés pour maintenir des niveaux de tension intermédiaires constants.

La deuxième méthode consiste à utiliser des sources de tension isolées directement. Cette approche est couramment adoptée dans les topologies telles que les CHB (Cascaded H-Bridge) et les PUC (Packed U-Cell), où chaque module ou cellule est alimenté par une source de tension distincte et isolée. Si toutes les sources de tension sont égales, l'onduleur est considéré comme symétrique, indépendamment de la forme d'onde de sortie. En revanche, si les valeurs des sources de tension diffèrent, l'onduleur est dit asymétrique. L'asymétrie permet d'atteindre un grand nombre de niveaux de tension en optimisant le nombre de sources de tension nécessaires. Cette technique est particulièrement avantageuse pour certaines applications spécifiques mais peut être limitée par la complexité de la gestion et de l'intégration des différentes sources de tension.

- **Commutateurs semi-conducteurs** : Les commutateurs semi-conducteurs, tels que les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) et les MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors), sont essentiels dans les onduleurs multiniveaux. Un interrupteur semi-conducteur fonctionne comme un interrupteur mécanique : il présente une faible résistance lorsqu'il est fermé (en conduction) et une résistance très élevée lorsqu'il est ouvert (en blocage). La faible tension présente à ses bornes lorsqu'il est fermé est appelée chute de tension directe, tandis que le faible courant qui le traverse lorsqu'il est ouvert est appelé courant de fuite.

L'augmentation du nombre de commutateurs dans une topologie entraîne des pertes supplémentaires, à la fois de conduction et de commutation. Les pertes de conduction sont proportionnelles à la chute de tension directe et au courant traversant le commutateur, tandis que les pertes de commutation sont liées à la vitesse de commutation du dispositif et à l'énergie dissipée lors de chaque transition entre les états de conduction et de blocage. La performance et l'efficacité du système sont fortement influencées par les caractéristiques des commutateurs utilisés, y compris leur vitesse de commutation et leurs pertes par commutation.

- **configuration de la structure** La configuration de la topologie indique la manière

dont les composants sont disposés et révèle le niveau de complexité de la mise en œuvre d'une structure donnée. Une configuration bien pensée permet de simplifier le contrôle et la gestion des composants, tout en assurant une répartition équilibrée des tensions et des courants. La disposition des commutateurs, des diodes, des condensateurs et des sources de tension doit être optimisée pour minimiser les pertes et maximiser l'efficacité du système. Chaque topologie présente des défis uniques en termes de configuration, nécessitant des approches spécifiques pour l'optimisation et la mise en œuvre donnée.

Tableau 2.6: Tableau comparatif entre les structures des quatre (4) topologies adoptées

Critère Onduleur	Alimentation DC	Symétrie / asymétrie	Nombre des IGBT	Nombre de diodes	Nombre total de composants semi-conducteurs	Configuration
NPC	4 Sources DC / une source DC avec 4 condensateurs en série	Symétrique	8	14 (6 diodes de blocages)	22	Demi-ponts en série
CHB	2 Sources DC isolées	Symétrique	8	8	16	Ponts 'H' cascades (en série)
PUC	2 sources DC / une source DC avec un condensateur	Asymétrique	6	6	12	Ponts en 'U' en série
RSI	2 Sources DC séparé par un circuit auxiliaire	Symétrique	5	9	14	Cellule en 'H' + circuit auxiliaire

Pour l'alimentation en courant continu, la topologie NPC se distingue par l'utilisation de quatre sources DC. Cette topologie est également capable de remplacer ces sources par un bus continu divisé en quatre condensateurs connectés. En revanche, les topologies CHB, PUC et RSI nécessitent uniquement deux sources d'alimentation.

Une caractéristique importante, visible dans le tableau, est que toutes les sources DC des topologies étudiées, à l'exception de la PUC, sont symétriques. En effet, une asymétrie dans les générateurs de tension entraînerait des modifications indésirables de la sortie de l'onduleur, produisant des niveaux de tension non uniformes et non désirés. La topologie PUC, cependant, utilise des sources asymétriques pour optimiser le nombre de niveaux de tension de sortie.

En termes de composants semi-conducteurs, la structure PUC est la plus économique, ne contenant que six IGBT et six diodes en anti-parallèle. Cependant, bien que la topologie RSI comporte un nombre total plus élevé de composants en raison des quatre diodes supplémentaires dans le circuit auxiliaire, elle utilise un commutateur de moins par rapport à la PUC.

Quant aux deux autres topologies, NPC et CHB, elles incluent un nombre plus élevé d'IGBT, ce qui se traduit par des pertes de commutation plus importantes. L'augmentation du nombre de commutateurs implique également une complexité accrue et des défis supplémentaires en termes de gestion de la dissipation thermique et de l'efficacité énergétique.

6 Choix de la stratégie de modulation

6.1 Pulse width Modulation (PWM)

Pour une étude plus efficace, une stratégie de modulation identique a été appliquée pour les quatre topologies, et c'est la technique **PWM** qui a été privilégiée dans notre travail.

Notre choix s'est porté sur cette stratégie pour sa simplicité d'élaboration, étant la technique de modulation la plus répandue et la plus connue, c'est aussi la stratégie à laquelle nous avons été le plus tôt le plus souvent confrontés, en plus d'offrir généralement d'excellents résultats, elle représente un très bon point de départ pour nous.

La modulation à largeur d'impulsion **PWM**, déjà citée dans le premier chapitre (5.2.3), Cette méthode consiste à générer des impulsions de largeur variable pour contrôler l'ouverture et la fermeture des commutateurs de l'onduleur selon des séquences prédéfini. Bien qu'offrant une flexibilité dans la génération de la tension de sortie, la PWM peut engendrer des distorsions harmoniques indésirables. convertissant une tension en une série de créneaux d'amplitude et de largeur variables.

Elle peut être réalisée en comparant une onde (de référence) modulée à basse fréquence,

généralement une onde sinusoïdale à la fréquence fondamentale, à une porteuse haute fréquence qui est triangulaire ou en forme de dents de scie. Le temps de commutation correspond à l'intersection entre la porteuse et l'élément modulant, et la fréquence de commutation est déterminée par la fréquence de la porteuse. Le PWM détermine la sortie bipolaire, uni-polaire ou évolutive vers des onduleurs multiniveaux via plusieurs porteuses ou multiporteuses

L'élaboration et la conception de la stratégie de modulation MLI (Modulation à largeur d'impulsions en français) ou PWM diffère en fonction du nombre de niveaux de tensions de sortie de l'onduleur. Par exemple, pour un convertisseur classique de 2 niveaux, le nombre d'ondes de porteuses est fixé à 2 signaux complémentaires, pour un onduleur de 5 niveaux, le nombre d'ondes augmente à 4 signaux, et 6 pour un onduleur de 7 niveaux.

On constate alors que le nombre d'ondes porteuses est relié au nombre de niveaux par la relation suivante :

$$N = (N - 1) \text{ porteuses}(\text{Triangulaires}) \quad (2.2)$$

Où N est le nombre de niveaux de l'onduleur.

Pour être plus précis, c'est la stratégie LSPWM (Level Shifted Pulse Width Modulation), qui est une sous technique de la PWM, qui a été choisie et sollicitée pour notre travail.

La figure 3.2 illustre parfaitement l'organisation de cette technique pour un onduleur de cinq niveaux, en effet, en utilisant l'équation 2.2, ce sont quatre (4) signaux de porteuses qui vont être utilisés et comparés avec le signal sinusoïdal de référence.

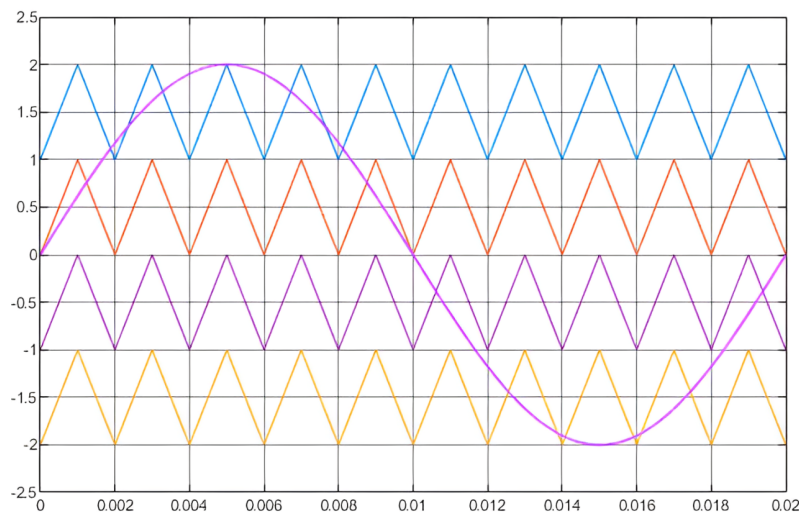


Figure 2.9: Représentation des ondes de référence et de porteuses pour la LSPWM

6.2 L'Indice de modulation

Autre paramètre à prendre en compte dans cette méthode et dont l'importance croît considérablement dans le cas des onduleurs multiniveaux : l'indice de modulation.

L'indice de modulation, noté M , implique en relation la valeur crête du signal de référence sinusoïdal et de la porteuse.

En ajustant l'indice de modulation, on peut contrôler la tension efficace de sortie d'un convertisseur. Cela permet de réguler la puissance fournie au système ou à la charge.

Cet indice permet le contrôle du rapport cyclique des impulsions qui détermine la durée pendant laquelle le signal est à un niveau logique élevé par rapport à la période totale.

Son expression et sa valeur optimale varient eux aussi en fonction du nombre de niveaux de l'onduleur :

pour un onduleur :

À 3 niveaux :

$$M = \frac{V_{\text{ref}}}{V_p}$$

À 5 niveaux :

$$M = \frac{V_{\text{ref}}}{2V_p}$$

À 7 niveaux :

$$M = \frac{V_{\text{ref}}}{3V_p}$$

Où :

- M : Indice de modulation
- V_{ref} : Valeur max de tension de référence
- V_p : valeur crête (ou crête à crête) des signaux de porteuse

Ainsi, le paramètre V_p qui caractérise l'indice de modulation 6.2, pour la stratégie **LSPWM** représente la distance entre deux crêtes max de deux triangulaires successives.

7 Outils de simulation pour onduleurs multiniveaux : MATLAB/Simulink

Matlab Simulink et sa bibliothèque Simscape Electrical, riche en composants d'électronique de puissance, ont été utilisés dans notre travail pour étudier les onduleurs multiniveaux. Avantages de l'utilisation de Matlab Simulink et Simscape Electrical: Facilité d'utilisation: L'interface graphique intuitive de Simulink facilite la création de modèles de circuits complexes. Large gamme de composants: Simscape Electrical offre une large gamme de composants d'électronique de puissance, tels que des diodes, des transistors, des condensateurs et des inductances, ce qui permet de modéliser des onduleurs multiniveaux avec précision. Capacités de simulation puissantes: Simulink permet de simuler les performances des onduleurs multiniveaux dans différents scénarios, y compris les variations de charge et les défauts de réseau. Visualisation des résultats: Simulink offre des outils de visualisation puissants pour analyser les résultats des simulations, tels que des oscillogrammes et des spectrogrammes. Grâce à ses fonctionnalités avancées, Matlab et Simscape Electrical se sont avérés être des outils précieux pour l'étude des onduleurs multiniveaux.

Conclusion

Ce chapitre a analysé les topologies d'onduleurs multiniveaux NPC, CHB, PUC et RSI, en examinant leurs avantages et inconvénients en termes de complexité structurelle. La présentation des circuits et des tableaux de commutation a mis en lumière les différences opérationnelles et les particularités de chaque topologie.

La comparaison a révélé des différences significatives en configuration, nombre de composants et sources de tension. La structure PUC est la plus économique en composants, tandis que la RSI utilise un IGBT de moins malgré un nombre de composants plus élevé. Les topologies NPC et CHB, bien que plus complexes, sont robustes pour des applications nécessitant des niveaux de tension symétriques et des configurations modulaires.

La stratégie LSPWM a été utilisée pour toutes les topologies, assurant une comparaison équitable et un contrôle efficace des commutateurs tout en réduisant les distorsions harmoniques.

Chapitre 3

Résultats et discussions

Introduction

Dans ce chapitre, sera mis en évidence le processus de simulation des structures d'onduleurs multiniveaux en utilisant les logiciels MATLAB/Simulink. L'objectif principal est de comparer les performances des différentes topologies étudiées (NPC, CHB, PUC et RSI) en appliquant une même stratégie de modulation pour garantir une comparaison équitable. Nous présenterons également la simulation de l'intégration de ces onduleurs dans un système de pompage photovoltaïque afin d'évaluer leur comportement en conditions réelles d'application. Enfin, les résultats des simulations seront analysés et interprétés, permettant ainsi de mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chaque topologie. Cette analyse comparative fournira des informations précieuses sur l'efficacité et les performances des différentes structures d'onduleurs dans des applications pratiques.

1 Modèles Simulink des quatre topologies

Pour simuler les différentes topologies d'onduleurs multiniveaux, MATLAB/Simulink a été utilisé en exploitant ses capacités avancées de modélisation et de simulation. Les topologies NPC, CHB, PUC et RSI ont été modélisées en utilisant des composants spécifiques disponibles dans la bibliothèque de Simulink/Simscape, ce qui a permis de reproduire idéalement leurs configurations et caractéristiques électriques.

Nous avons commencé par la création du modèle de chaque topologie en utilisant des blocs de commutation IGBT et de diodes disponibles dans Simulink. Les IGBT ont été

configurés pour représenter les caractéristiques de commutation spécifiques de chaque topologie. Des sources de tension DC ont été intégrées pour alimenter les circuits.

Pour la topologie NPC, ce sont quatre sources de tension symétriques qui ont été utilisées, une pour chaque demi pont créant ainsi un des niveaux de tension de sortie. La topologie CHB a été modélisée en connectant plusieurs modules H-Bridge en série, chaque module étant alimenté par une source de tension isolée. La topologie PUC a impliqué l'utilisation des cellules en U imbriquées avec des sources de tension asymétriques pour optimiser les niveaux de tension de sortie. Enfin, la topologie RSI est obtenue en ajoutant un circuit auxiliaire comprenant des diodes supplémentaires pour réduire le nombre total de commutateurs nécessaires.

Les figures suivantes représentent le modèle **SIMULINK** de chaque topologie :

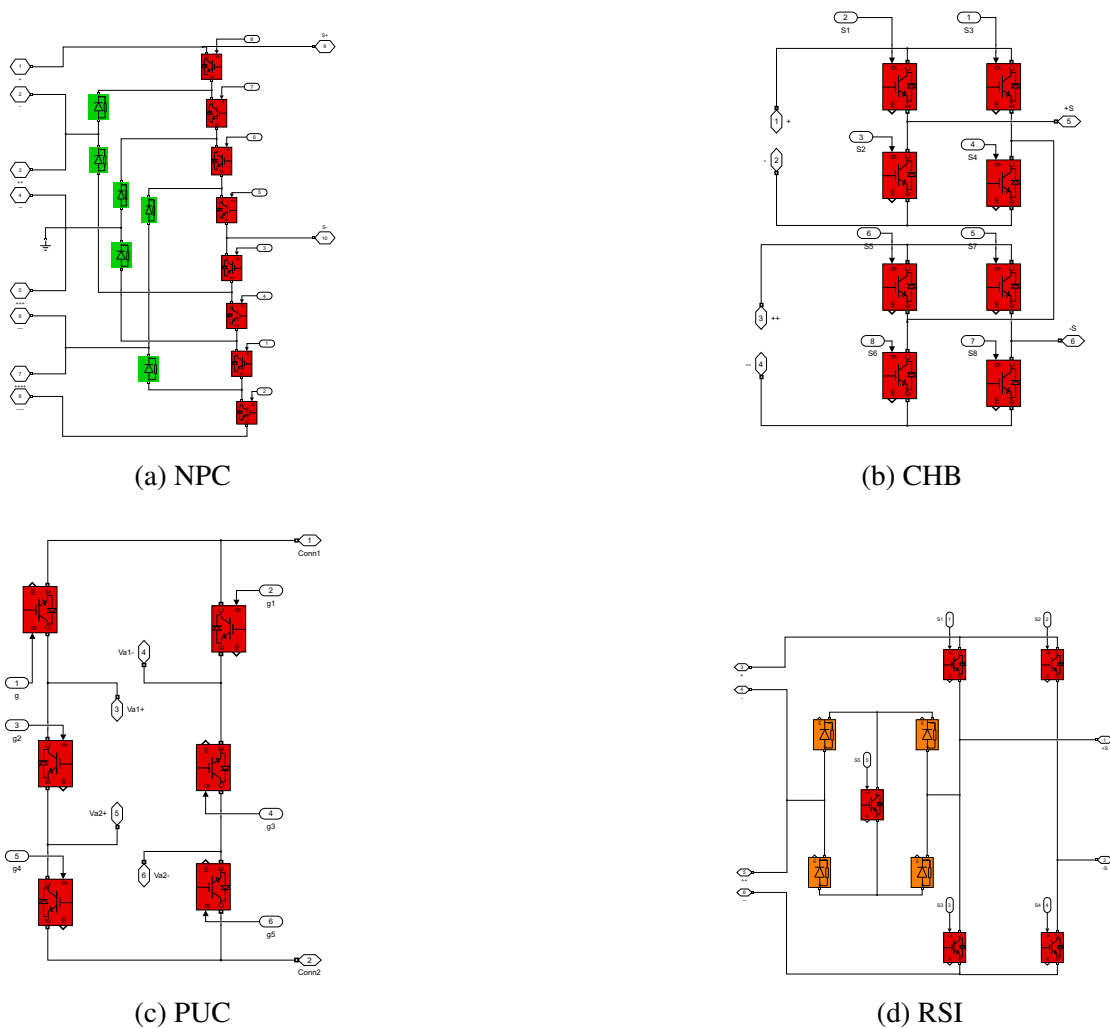


Figure 3.1: Modélisation des topologie avec MATLAB SIMULINK

2 Stratégie de modulation utilisée pour les quatre topologies d'onduleurs à cinq niveaux

Comme indiqué, pour notre travail nous avons opté pour la stratégie de commande dite PWM : LSPWM (6.1). Suivant l'équation 2.2, pour un onduleur à cinq niveaux de tensions, quatre (4) signaux de porteuses sont nécessaires, ces signaux seront comparés à une seule référence sinusoïdale (figure 2.9), les sorties de cette comparaison seront utilisées pour générer les signaux de commande des interrupteurs semi-conducteurs. la figure 3.2 montre l'organisation et le fonctionnement en détail de cette stratégie de modulation que nous avons réalisé dans un modèle SIMULINK.

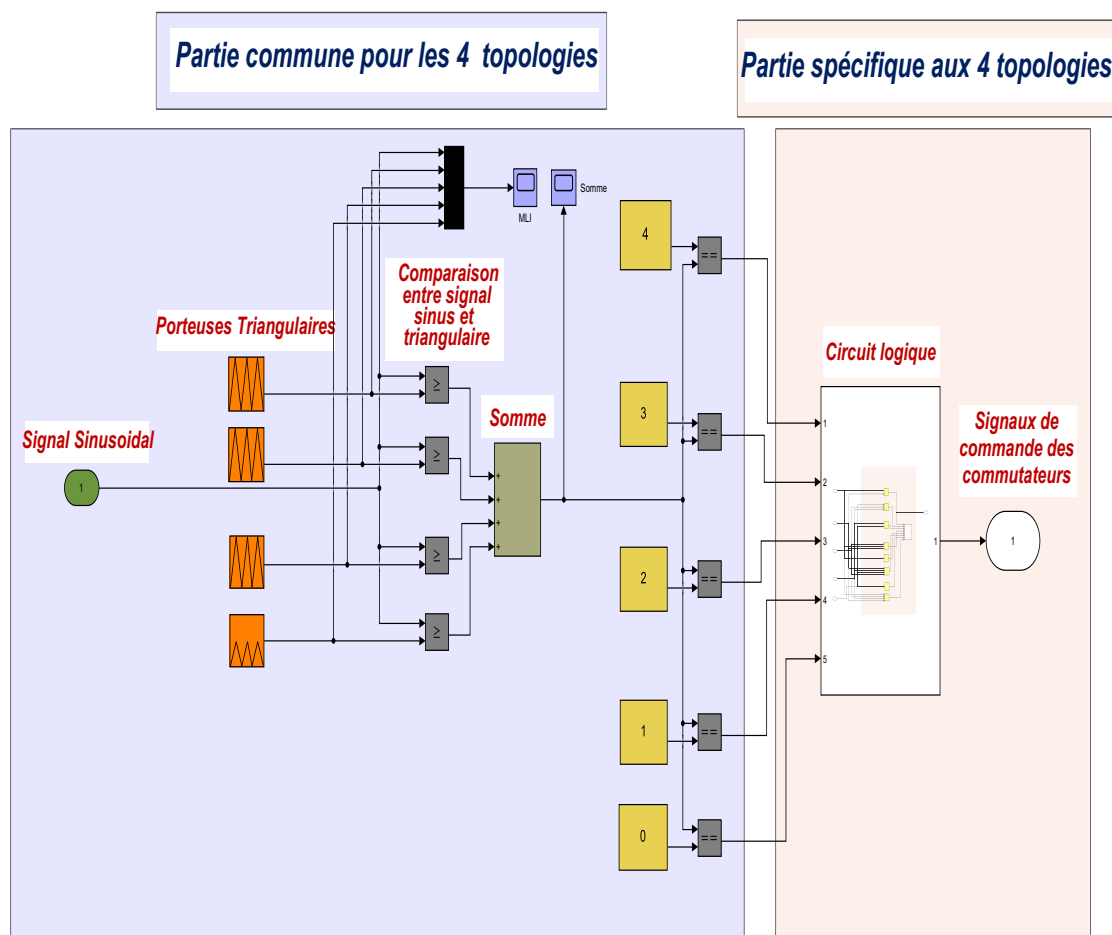


Figure 3.2: Généralisation du Modèle SIMULINK pour les 4 topologies

La comparaison entre le signal de référence et les porteuses est la première étape dans cette modulation, les porteuses représentées par quatre (4) signaux triangulaires (Reapeating sequences), sont alignées de manière superposée comme le montre la figure 3.2, le signal sinusoïdal quant à lui est généré avec une fréquence beaucoup moins importante que celle des porteuses (jusqu'à 200 fois moins). L'amplitude de ces signaux est très importante, parcequ'elle détermine la valeur de l'indice de modulation (6.2) . En effet, la valeur max de la référence peut être soit égal ou inférieure à la valeur crête des signaux triangulaires superposés en premier et en dernier mais jamais supérieure.

L'appréhension de la structuration de ces signaux permet d'anticiper le mécanisme de comparaison entre eux. En effet, tel que présenté sur le modèle (figure ??), des comparateurs de type supérieure ou égal sont utilisé pour le processus de comparaison, ceci permettra d'engendrer des signaux de sorties propres à chacun des quatre signaux triangulaires et a leur comparaison avec l'onde sinusoïdale, ces sorties seront égales à 1 si le signal de référence leur est supérieur et a 0 si le contraire se produit, la figure suivante affiche ces signaux de sorties :

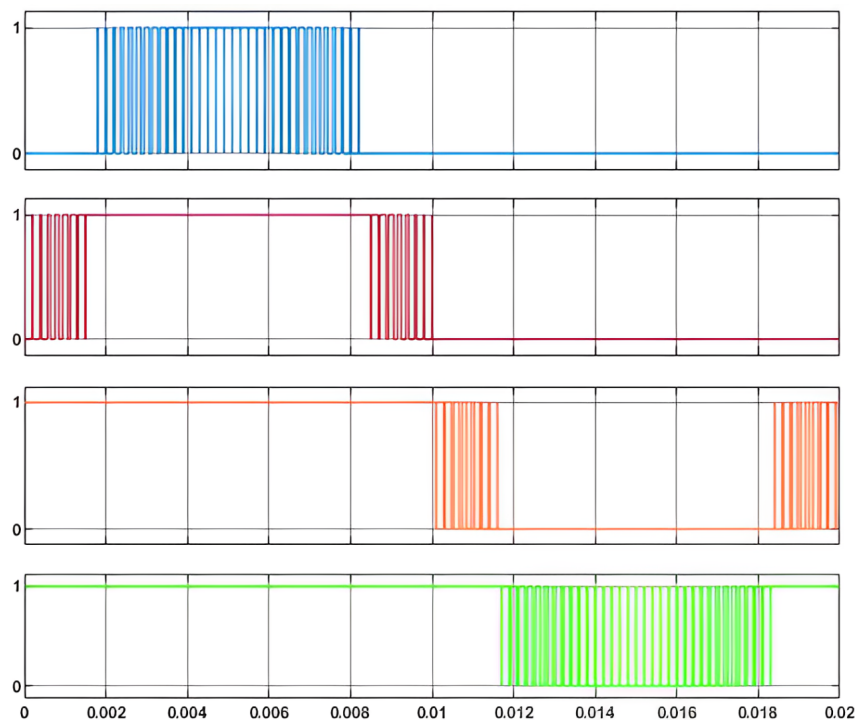


Figure 3.3: Sorties des comparateurs

Le bloc somme permet d'additionner les quatre sorties des comparateurs, la figure 3.3 montre clairement, que si l'on additionnent ces signaux, la forme d'onde résultante correspondra a un signal de cinq (5) niveaux de valeurs : 0, 1, 2, 3 et 4. une physionomie similaire à une sortie de tension d'un onduleur à cinq étages de tensions (figure 3.4).

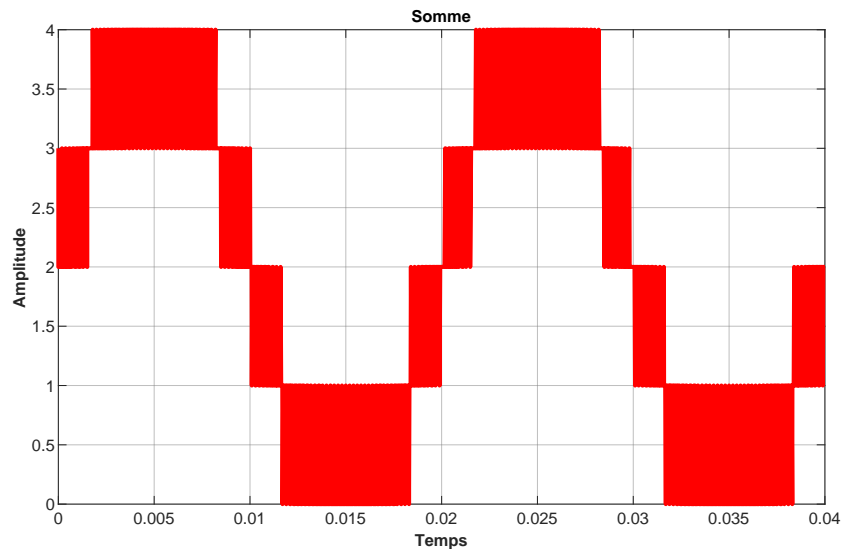


Figure 3.4: Somme des sorties des commutateurs

L'analogie entre la sortie du bloc somme et les signaux de commande des commutateurs

est la dernière phase de notre stratégie de modulation LSPWM, cette analogie est réalisée de façon a ce que les cinq (5) niveaux de sorties du bloc somme sont mis en parallèle de sorte que chaque niveau est assimilé a l'étage de tension correspondant dans la sortie de l'onduleur, cette opération se fait en reliant les niveaux de sorties de l'additionnement au commande des interrupteurs de l'onduleur en suivant la table de commutation de chaque structure.

- Pour la topologie NPC, le circuit logique 3.5 est réalisé en suivant la table de commutation 2.1

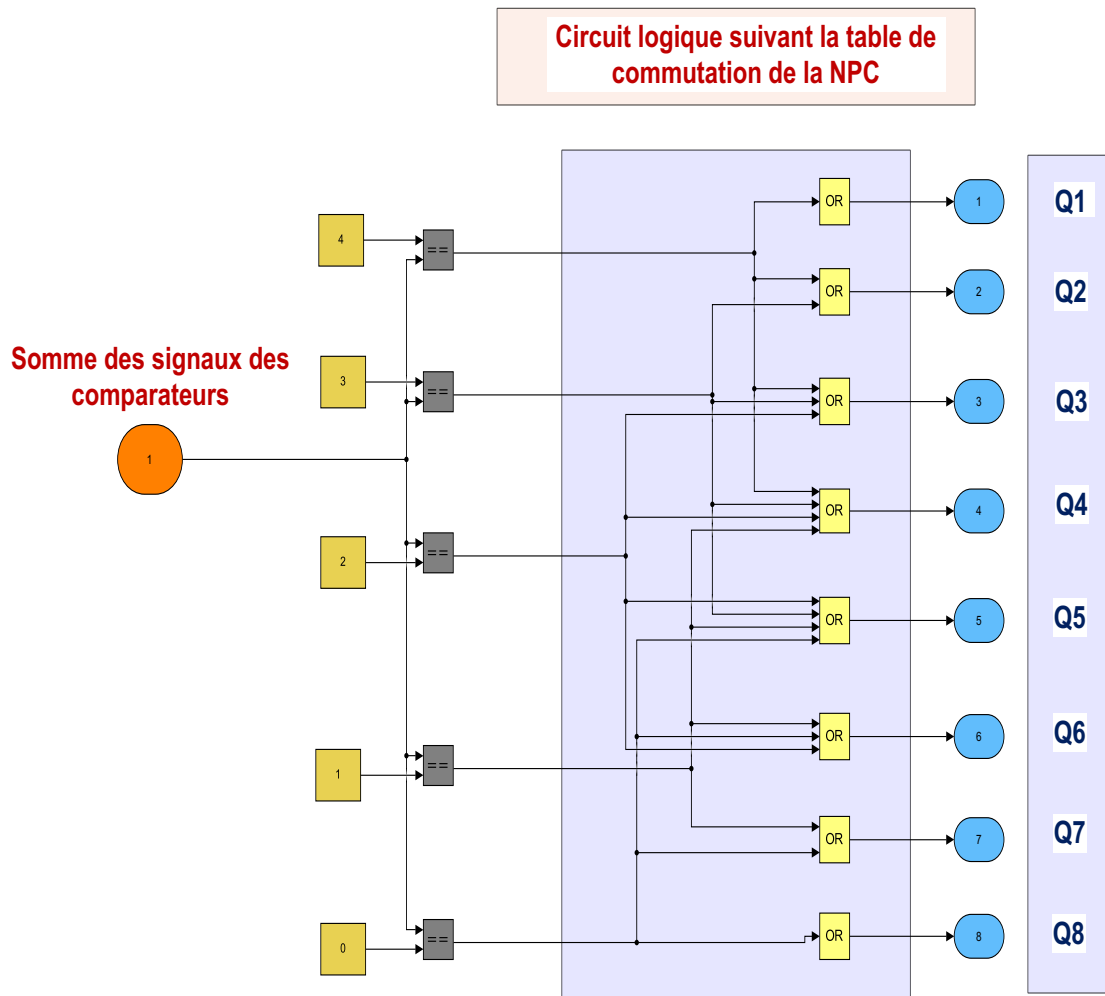


Figure 3.5: Modèle SIMUNLIK du circuit de contrôle de la NPC

Le résultats des signaux de commandes des commutateurs est présenté sur la figure 3.6

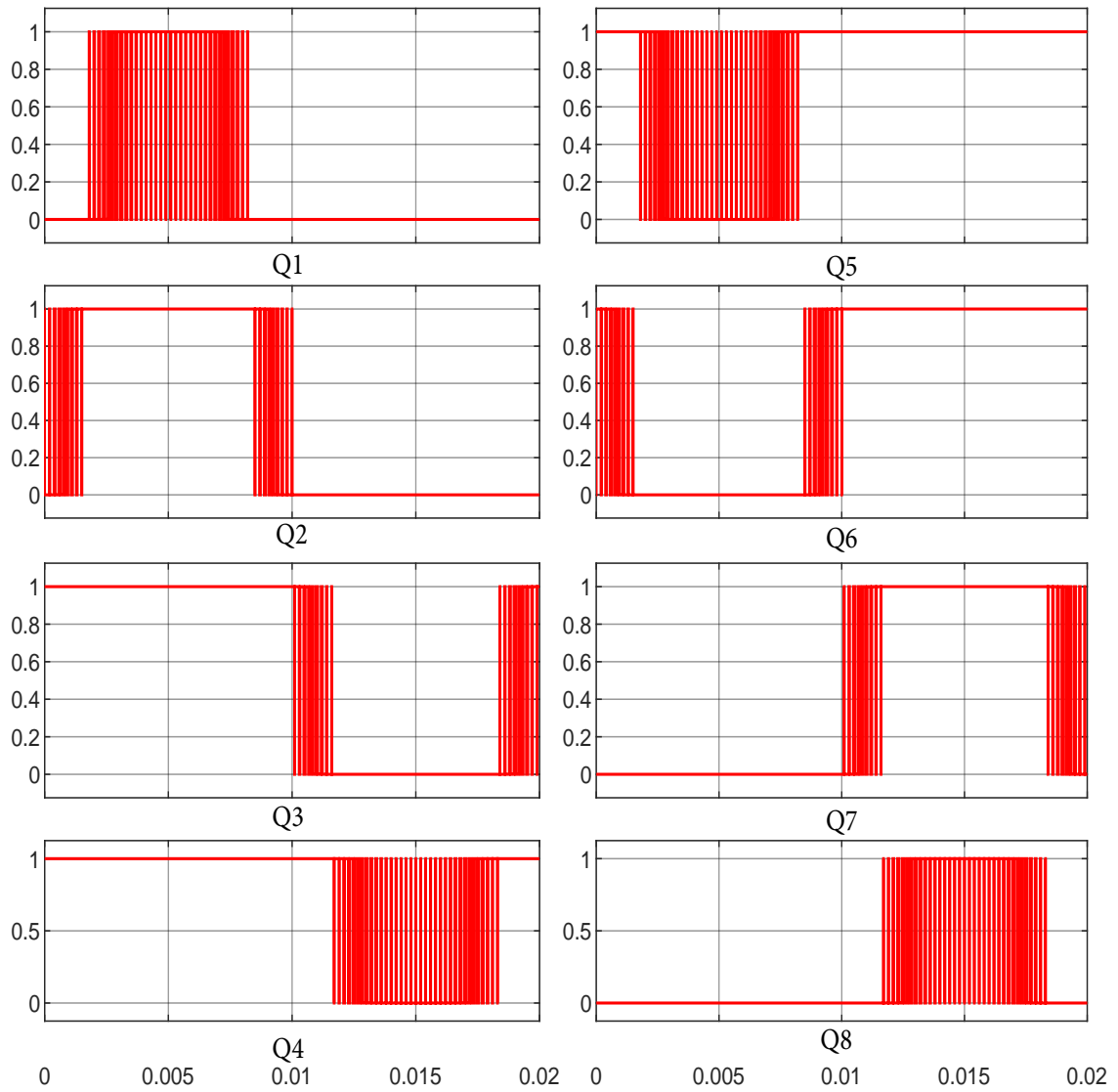


Figure 3.6: Signaux de commande des interrupteurs de la NPC

- Pour la CHB, c'est la table 2.3 qui permet de réaliser le circuit logique 3.7

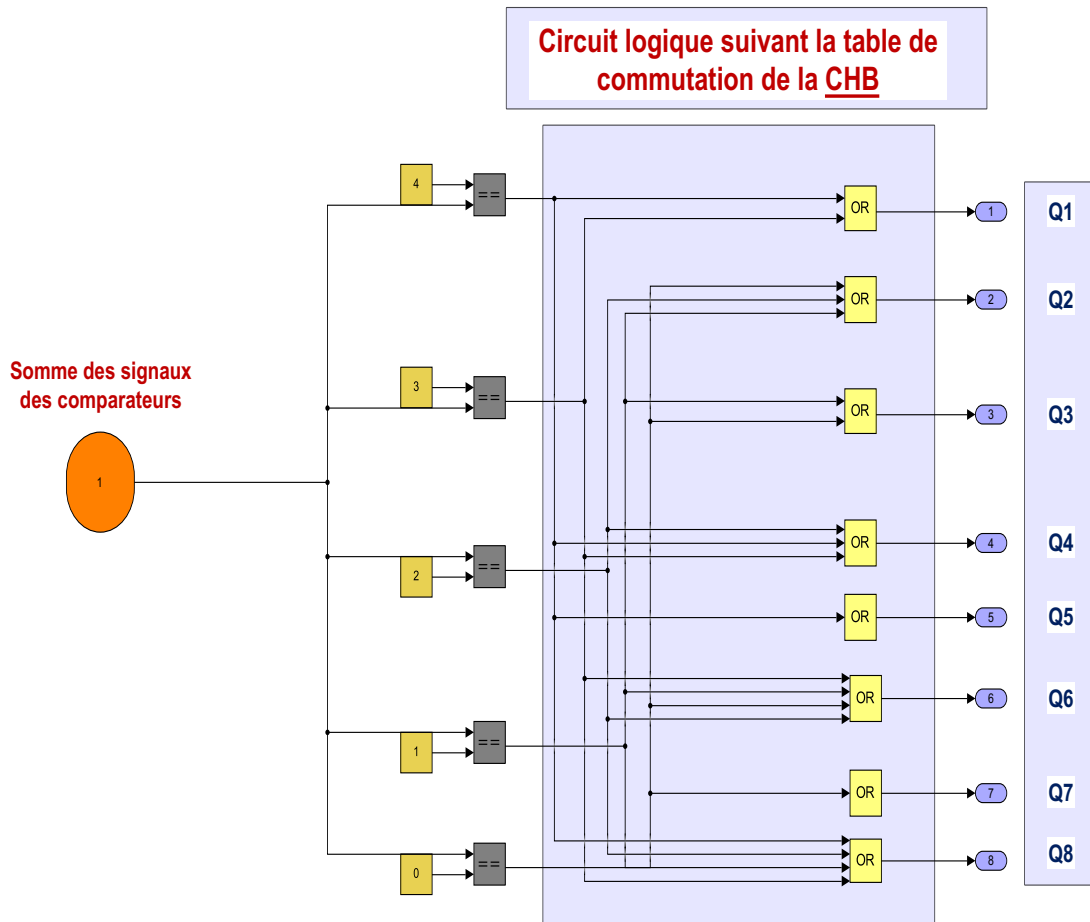


Figure 3.7: Modèle SIMUNLIK du circuit de contrôle de la CHB

Ce circuit permet d'obtenir les commutations des 8 interrupteurs de la CHB 3.8

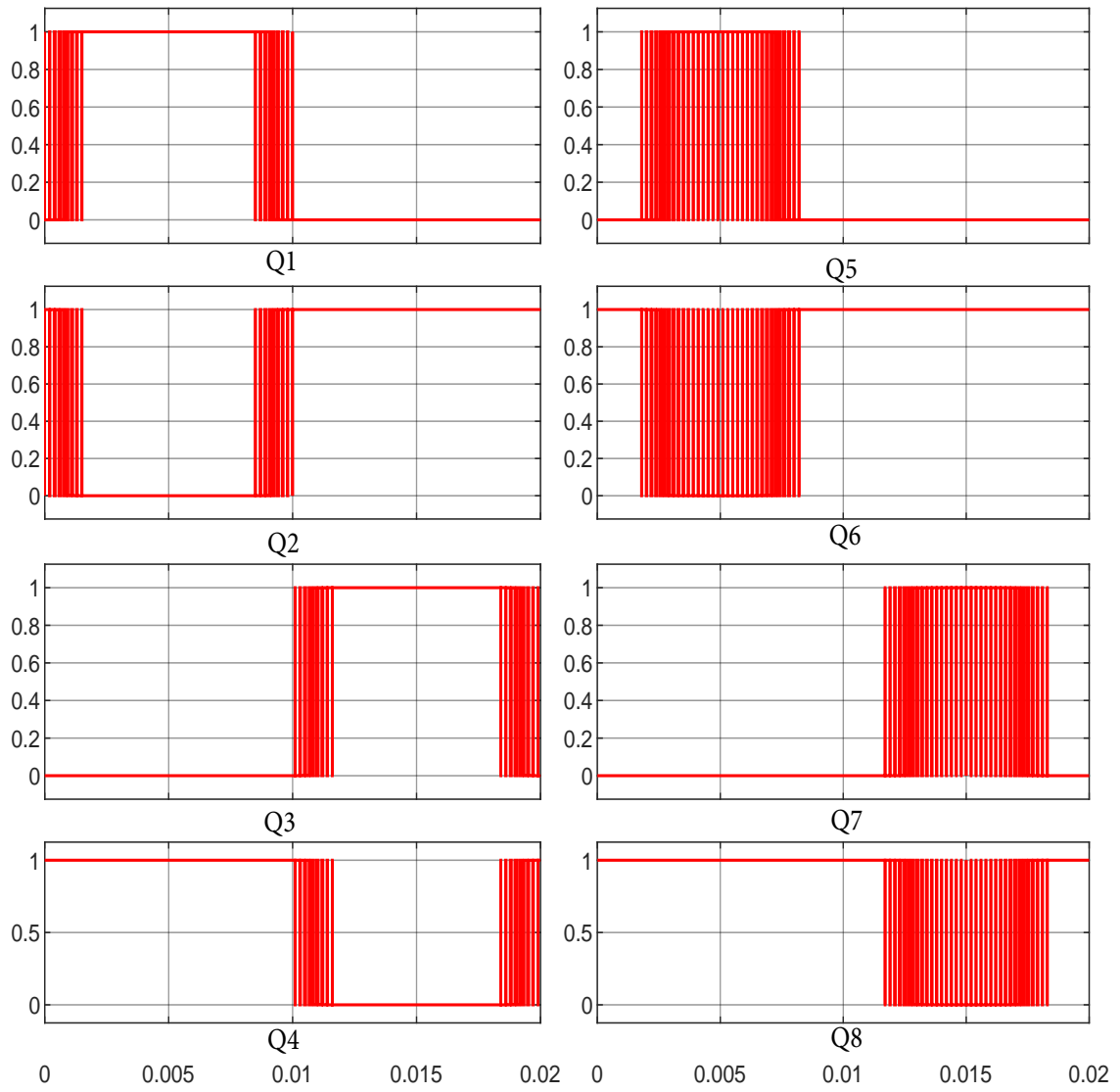


Figure 3.8: Signaux de commande des interrupteurs de la CHB

- quant au circuit 3.9, Il est tiré de la table de commutation de la topologie PUC 2.4

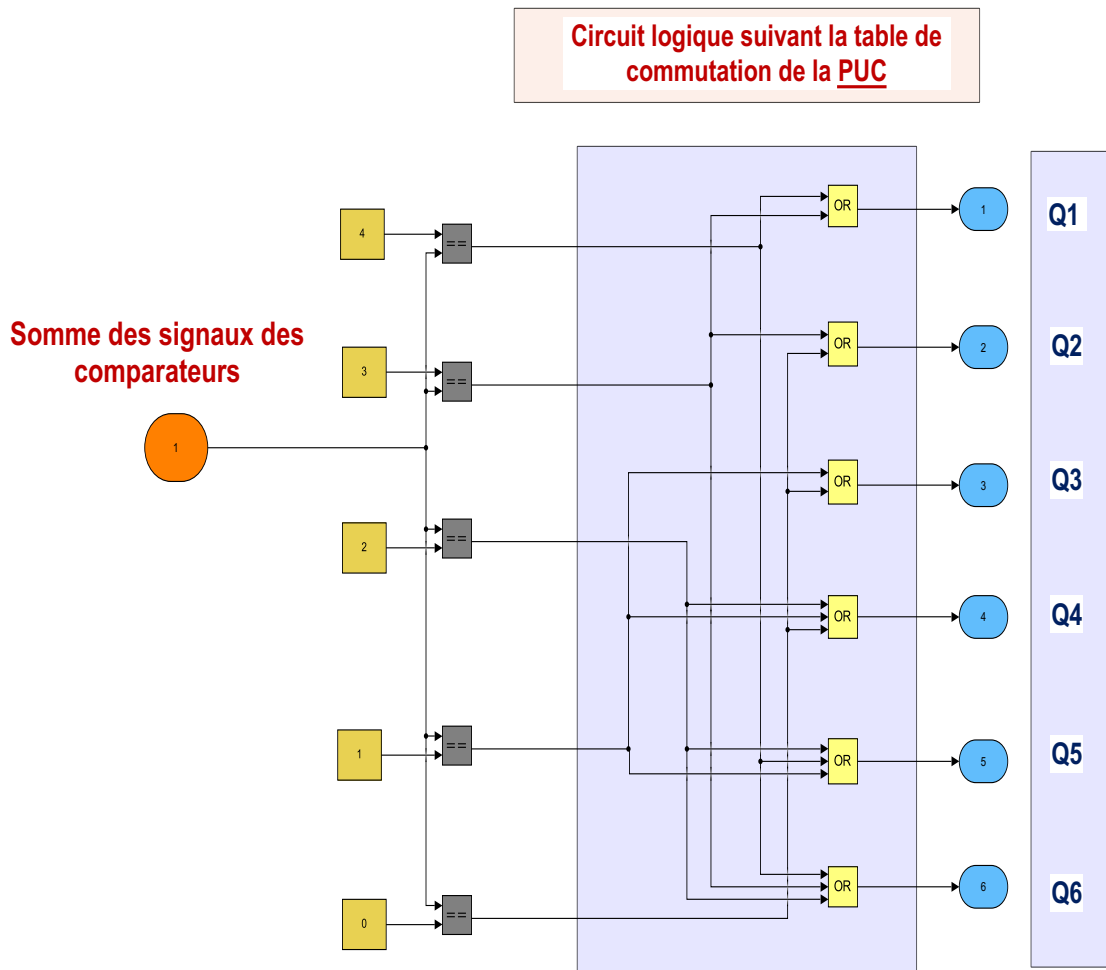


Figure 3.9: Modèle SIMUNLIK du circuit de contrôle de la PUC

Les instants de commandes des interrupteurs de la PUC sont représentés sur la figure3.10.

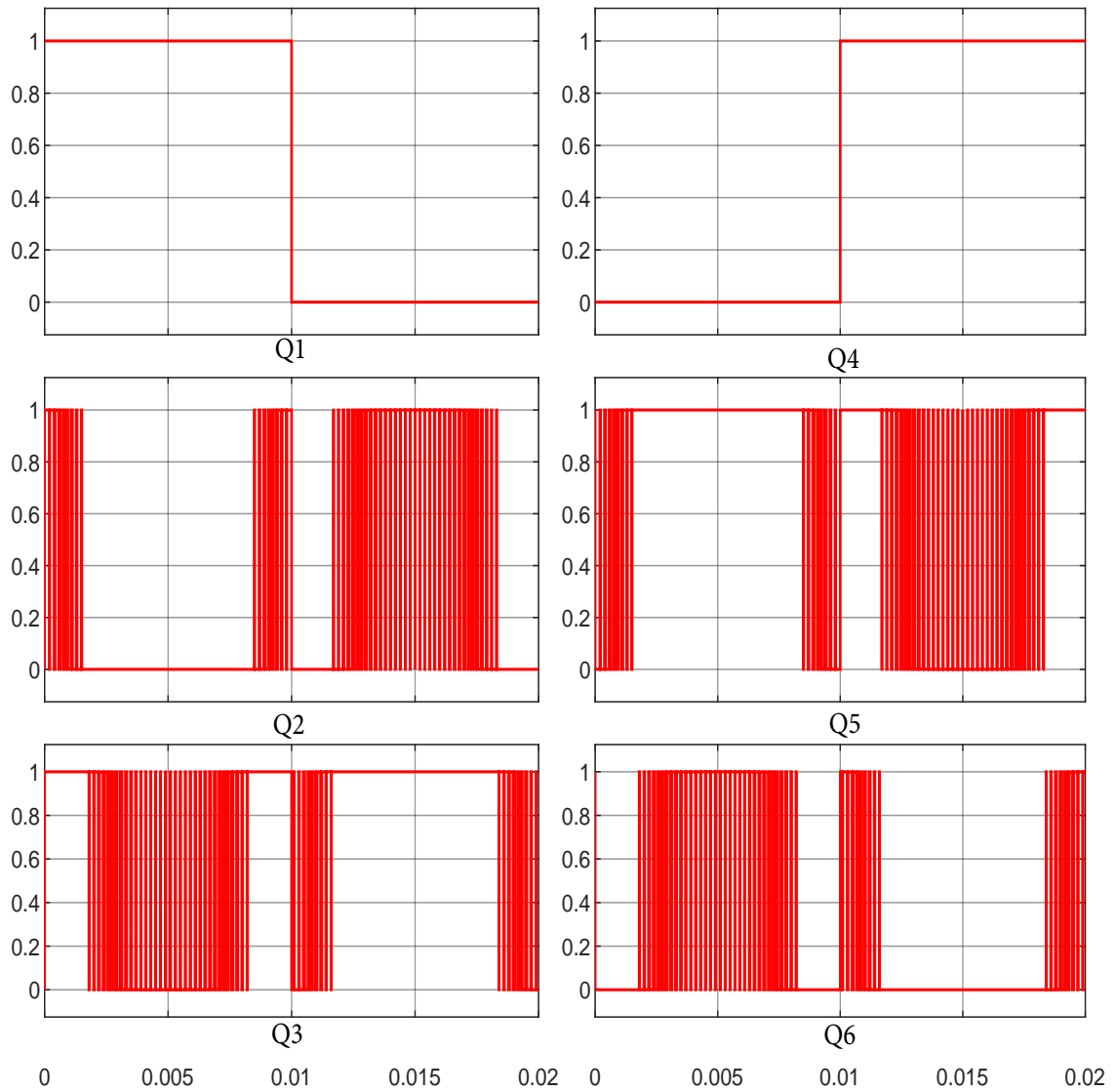


Figure 3.10: Signaux de commande des interrupteurs de la PUC

- Enfin, le système logique pour la RSI correspond au fonctionnement de la table de commutation 2.5

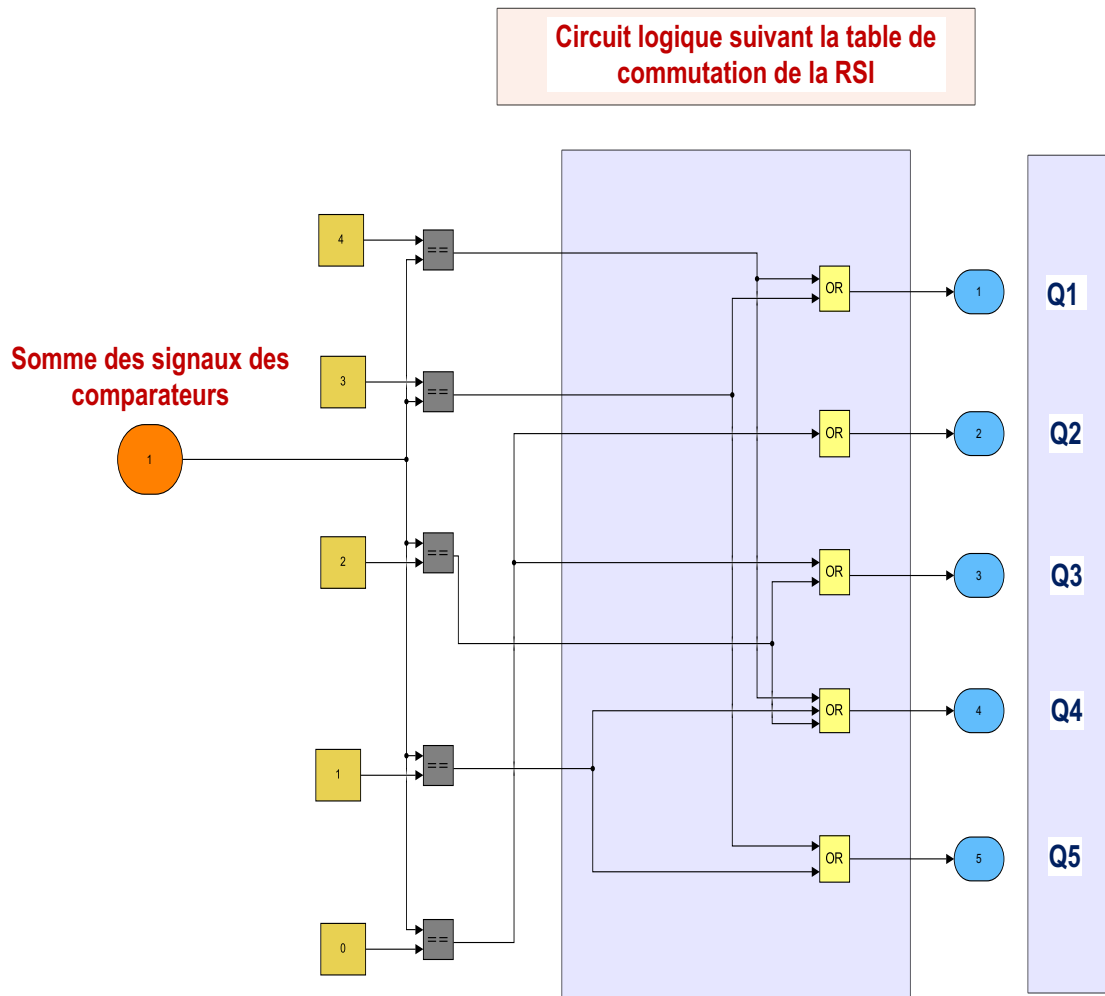


Figure 3.11: Modèle SIMUNLIK du circuit de contrôle de la RSI

Les interrupteurs seront commandés via les signaux représentés sur la figure 3.29

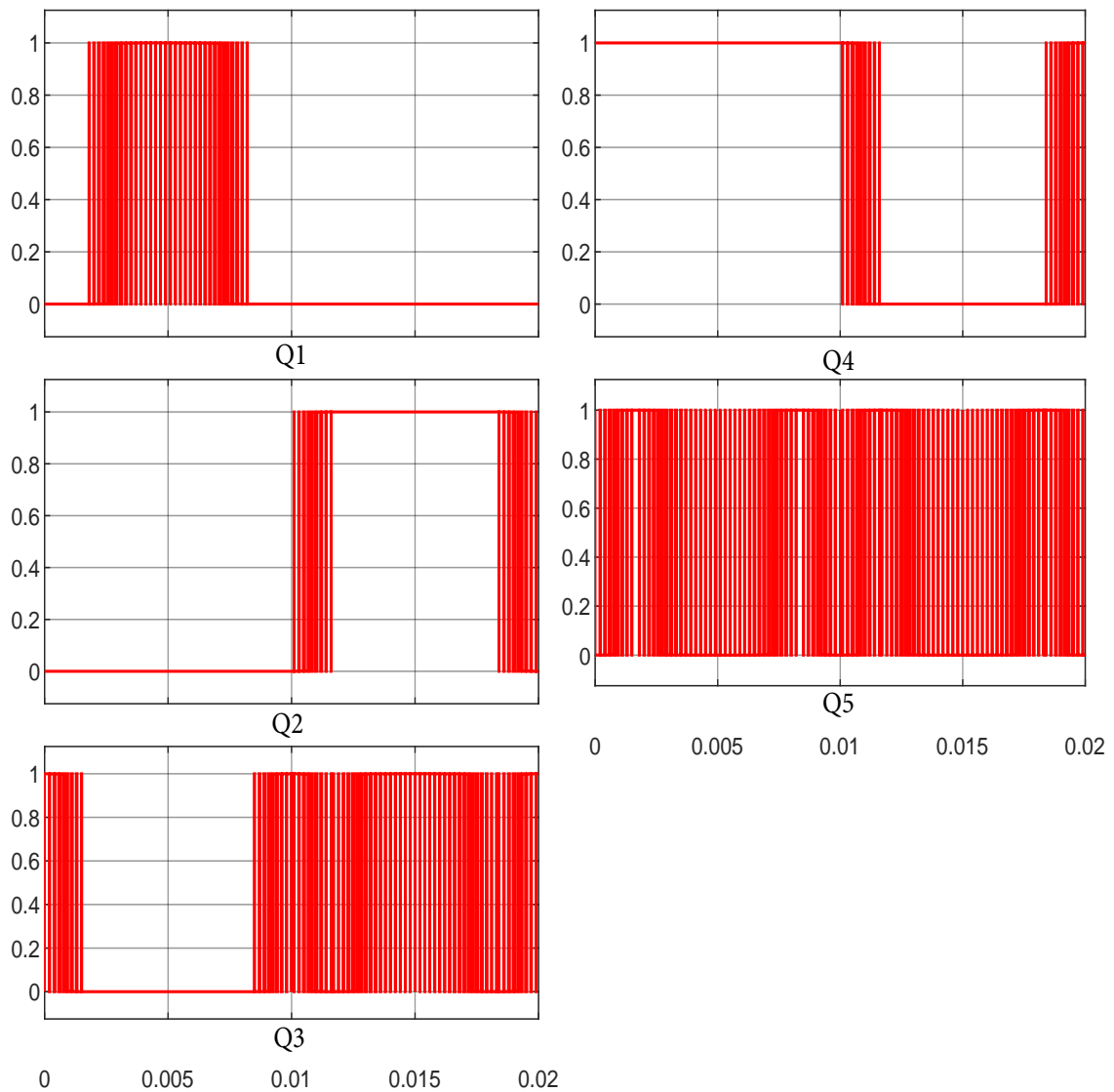


Figure 3.12: Signaux de commande des interrupteurs de la RSI

3 Modélisation des onduleurs multiniveaux dans le système de pompage

Dans cette partie, nous explorerons l'intégration des topologies d'onduleurs multiniveaux dans un système de pompage photo-voltaïque à travers une modélisation dans le logiciel MATLAB/Simulink. Nous décrirons en détail les différentes étapes de cette intégration, en mettant l'accent sur la configuration et le fonctionnement du système. Nous expliquerons comment les onduleurs sont connectés aux panneaux solaires et au moteur de la pompe, ainsi que les interactions entre ces composants. Nous détaillerons également les paramètres spécifiques utilisés pour les simulations, tels que les caractéristiques des panneaux solaires

et les spécifications du moteur de la pompe. En fournissant une explication approfondie de l'architecture et du fonctionnement du système, nous offrirons une compréhension du rôle des onduleurs multiniveaux dans le contexte du pompage photo-voltaïque.

3.1 Modèle généralisé du système de pompage photovoltaïque

Un système de pompage solaire photo-voltaïque comprend généralement des panneaux solaires qui convertissent la lumière solaire en puissance continue. Cette puissance est ensuite optimisée par l'algorithme de commande: Maximum Power Point Tracking (MPPT) pour maximiser la puissance de sortie. Un hacheur boost convertit ensuite cette électricité en une tension appropriée pour alimenter un moteur asynchrone, qui, à son tour, entraîne une pompe à force centrifuge pour le pompage de l'eau.

Dans notre cas, les onduleurs à cinq niveaux peuvent présenter des avantages significatifs dans ce contexte. Tout d'abord, ils assurent une qualité d'énergie plus élevée qu'un onduleur à deux niveaux standard, générant donc une onde plus proche du sinusoïdale mieux adaptée, garantissant ainsi un fonctionnement fluide et fiable du moteur asynchrone.

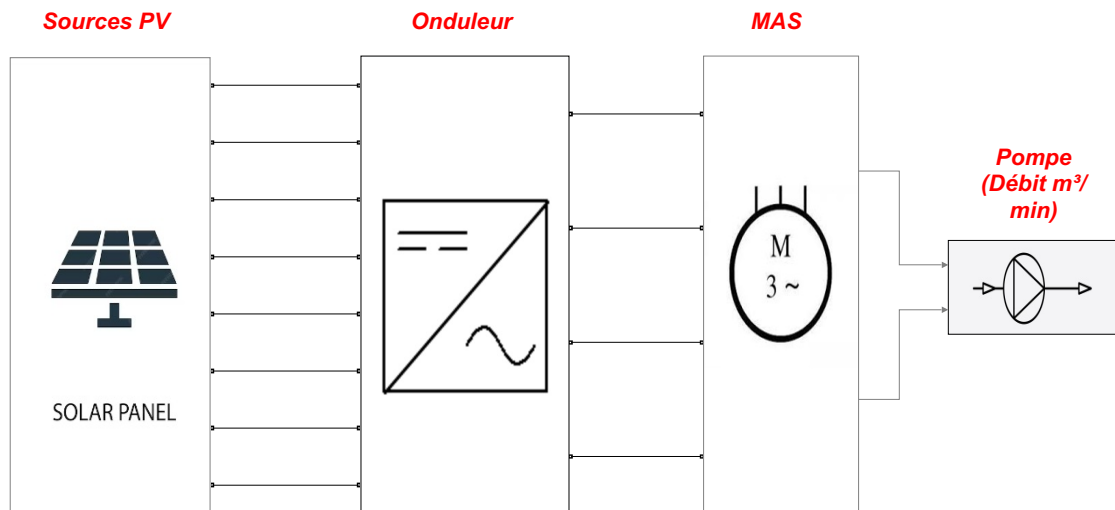


Figure 3.13: Modèle SIMULINK de l'onduleur multiniveaux intégré au système de pompage photo-voltaïque

3.2 Modélisation des modules PV

Pour la modélisation du module PV dans MATLAB/Simulink, un bloc "PV array" a été utilisé. Ce choix a été fait dans l'optique de simplifier le modèle et de s'approcher beaucoup

plus à l'implantation pratique de notre système, compte tenu de la laboriosité de la mise en place des convertisseurs dans le modèle Simulink. L'utilisation de modèles Simscape améliore l'efficacité de notre système en simulant des phénomènes physiques réalistes. Simscape nous permet de simuler notre système avec précision car les modèles MATLAB prédéfinis prennent en compte des phénomènes réels tels que les pertes et les chutes.

La (figure 3.14) montre les caractéristiques du panneau solaire utilisé pour la simulation de notre système:

Module data	
Module:	SunPower SPR-445NX-WHT-D
Maximum Power (W)	444.86
Cells per module (Ncell)	128
Open circuit voltage Voc (V)	90.5
Short-circuit current Isc (A)	6.21
Voltage at maximum power point Vmp (V)	76.7
Current at maximum power point Imp (A)	5.8
Temperature coefficient of Voc (%/deg.C)	-0.291
Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)	0.013301

Figure 3.14: Paramètres du bloc SIMULINK 'PV array'

3.2.1 Maximum power point tracker

Le MPPT est le point où le panneau solaire produit le maximum 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).

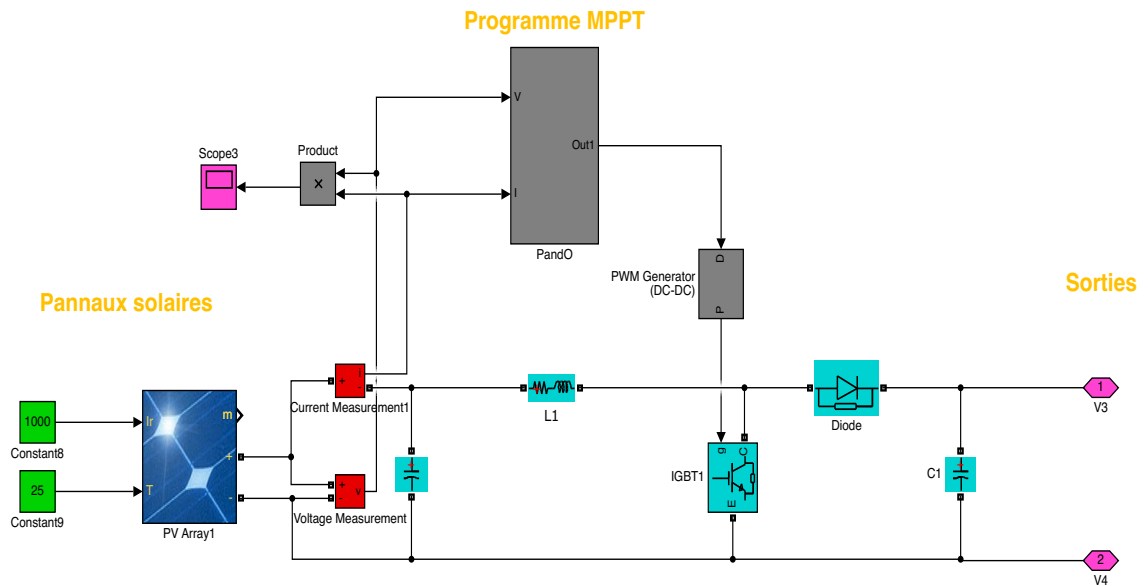


Figure 3.15: Modèle Simulink de l'association Panneaux PV hacheur MPPT

3.3 Modélisation du moteur asynchrone de la moto-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.

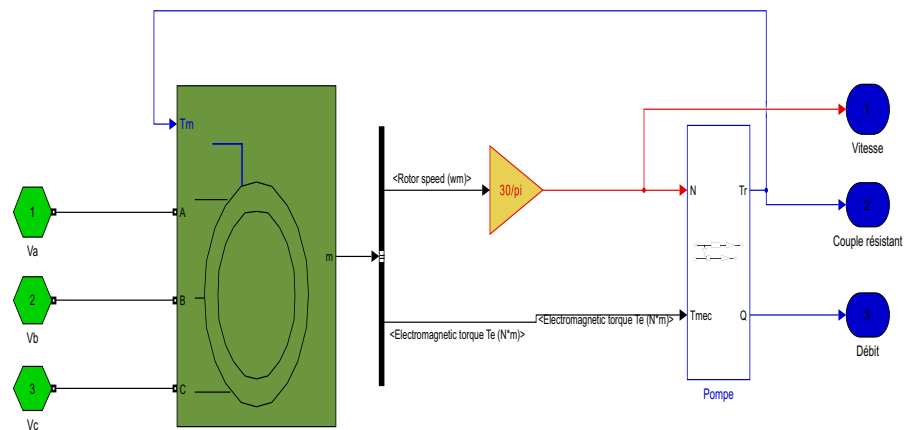


Figure 3.16: Modèle Simulink de l'association MAS-pompe

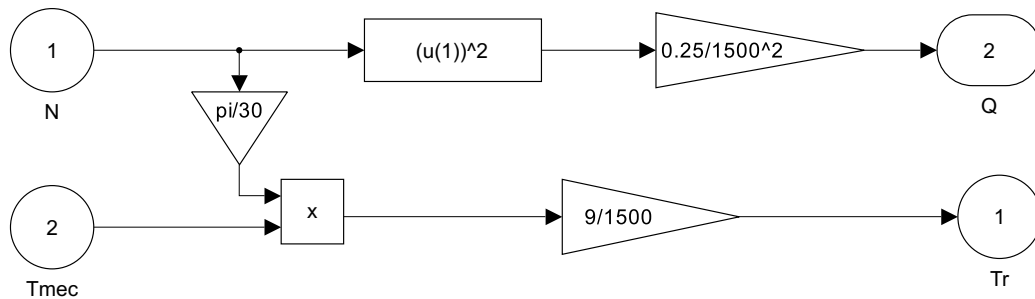


Figure 3.17: Modèle Simulink de la pompe

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).

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

où :

- Tr est le couple résistant appliqué à la pompe.
- $Tmec$ est le couple mécanique appliqué à la pompe.

4 Résultats de simulations

Dans cette section, nous présenterons les résultats obtenus des simulations. Nous commencerons par les performances des onduleurs, en se concentrant sur les tensions de sortie (simples et composées) et les courants de sortie. Ensuite, nous examinerons les performances du moteur asynchrone et de la pompe, en mettant en évidence la vitesse de rotation du moteur et le débit d'eau.

Les tensions de sortie sont dérivées d'un panneau solaire dont les paramètres sont détaillée sur la figure 3.14. Comme expliqué, ces paramètres sont introduit de façon à

ce qu'ils répondent aux conditions de fonctionnement du moteur asynchrone ayant les caractéristiques suivantes :

- **Fréquence** : 50 Hz
- **Puissance nominale** : 4 KW
- **Tension entre phases** : 400 V

4.1 Performances de l'onduleur

La **tension simple** est la tension mesurée entre chaque phase et neutre du circuit électrique.

Pour la NPC, cette tension est représentée par un demi-pont (2.1).

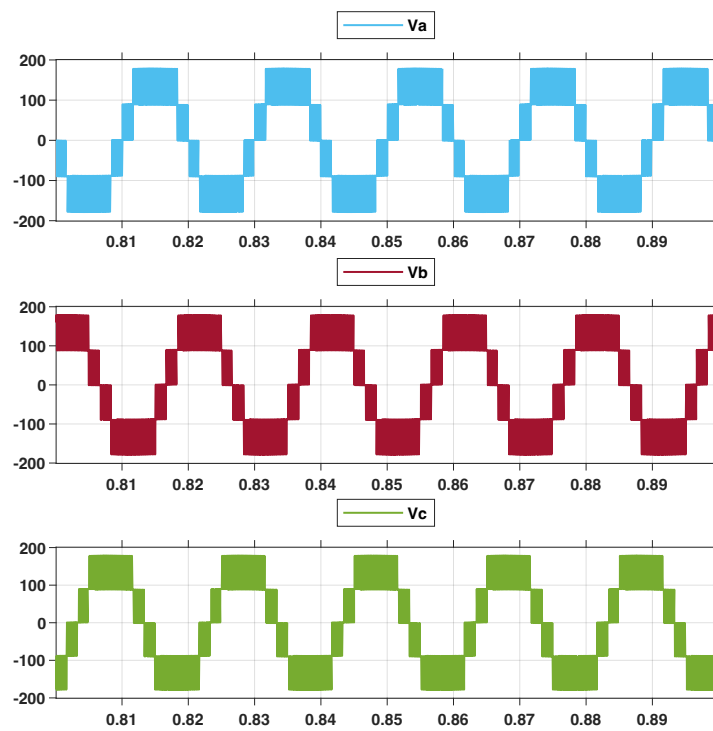


Figure 3.18: Tension simple pour la topologie NPC

Pour la **CHB** par deux ponts 'H' montés connectés en série (2.3).

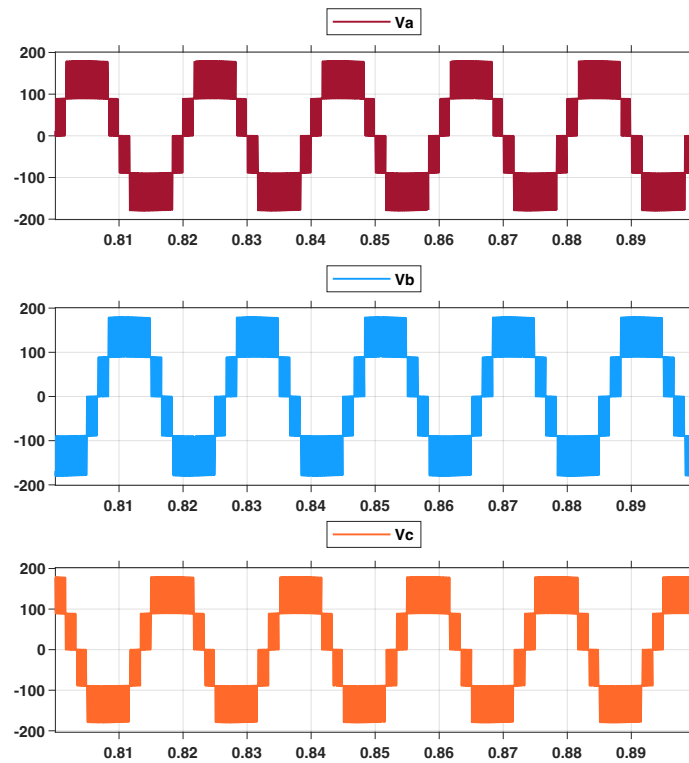


Figure 3.19: Tension simple pour la topologie CHB

Pour la **PUC** par trois cellules en 'U' (2.5).

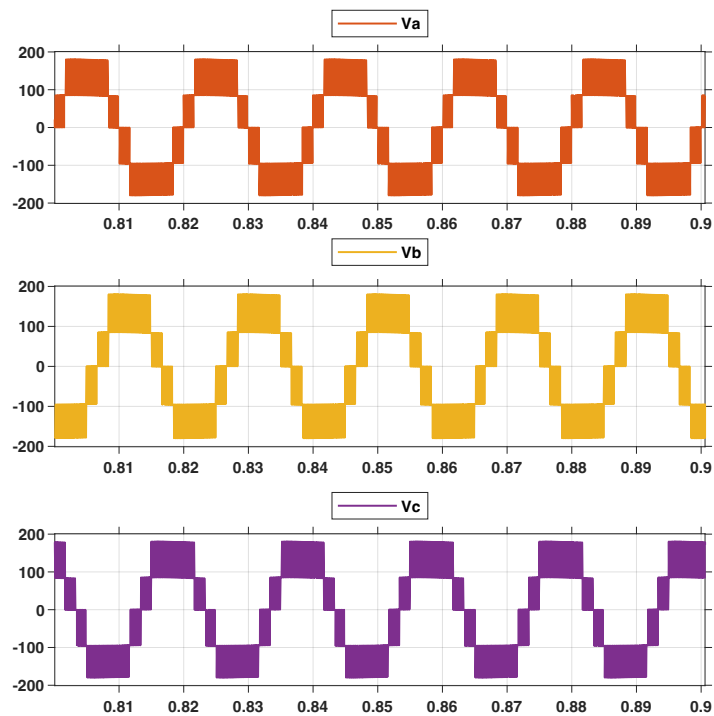


Figure 3.20: Tension simple pour la topologie PUC

Et finalement pour la **RSI** par un pont 'H' incluant un circuit auxiliaire (3.13).

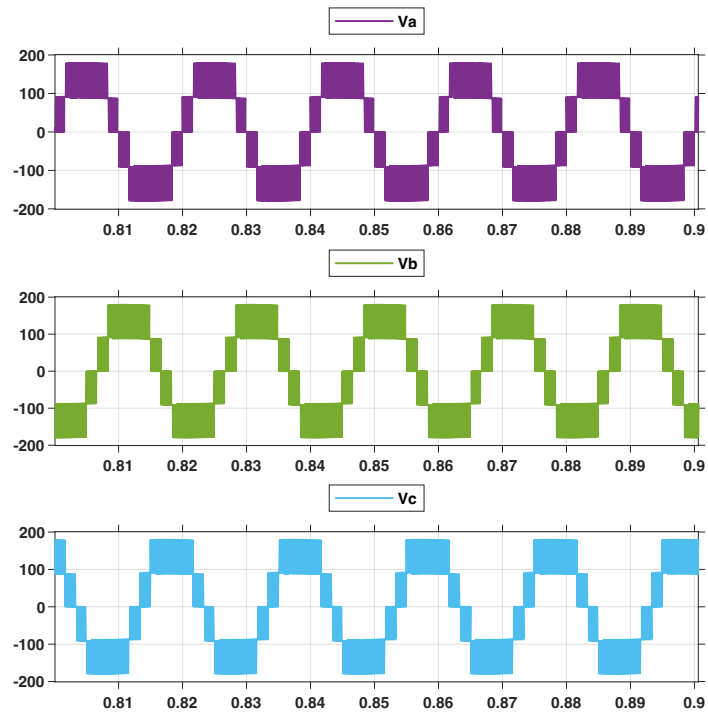


Figure 3.21: Tension simple pour la topologie RSI

La tension composée est la tension de sortie d'une phase, elle est la somme des tensions de sortie :

De huit demi ponts pour la **(NPC)** (2.2) :

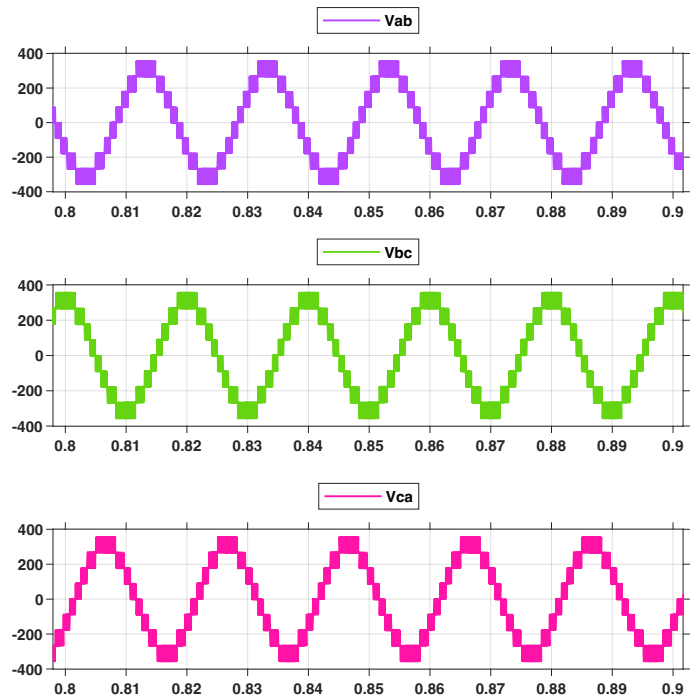


Figure 3.22: Tension composée pour la topologie NPC

De 4 ponts en 'H' pour la (CHB) (2.4) :

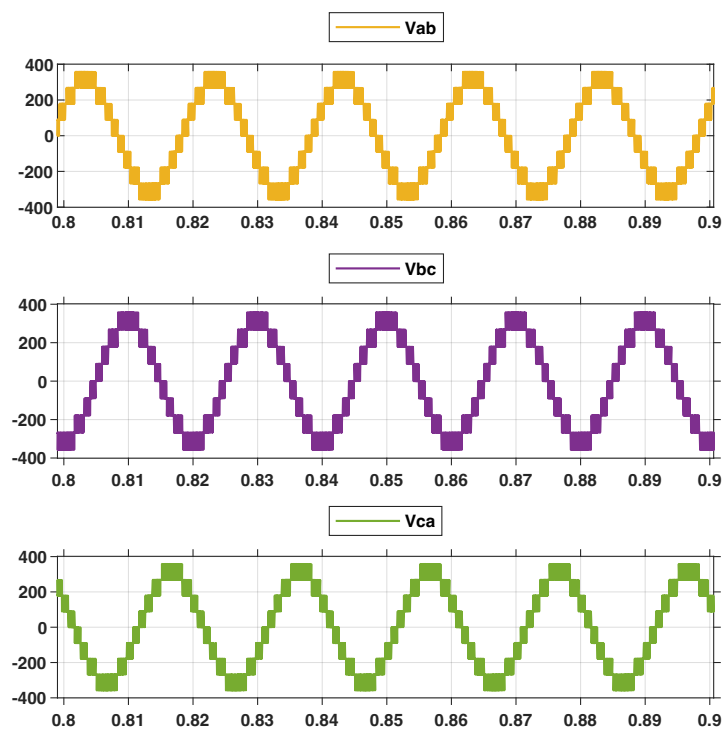


Figure 3.23: Tension composée pour la topologie CHB

De 6 cellules en 'U' pour la **PUC** (2.6) :

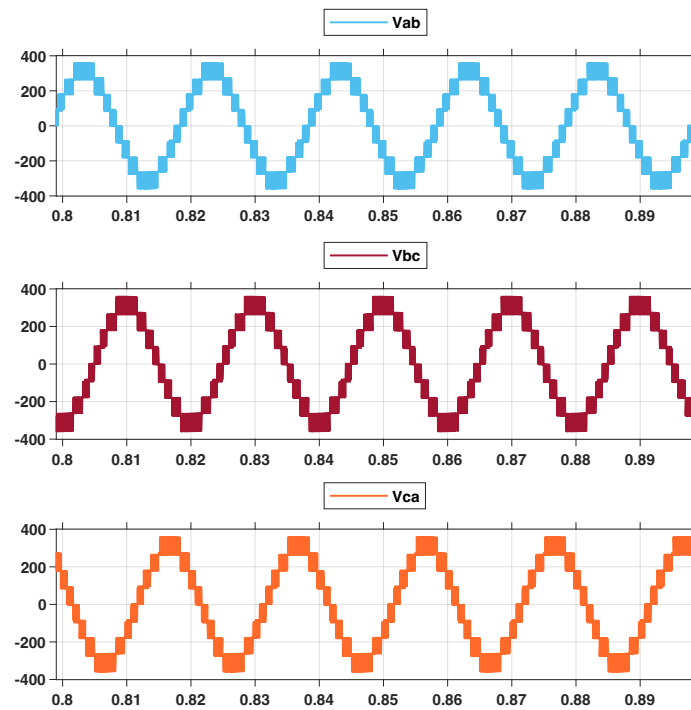


Figure 3.24: Tension composée pour la topologie PUC

Et de 2 ponts en 'H' impliquant un circuit auxiliaire pour la **RSI** (2.8) :

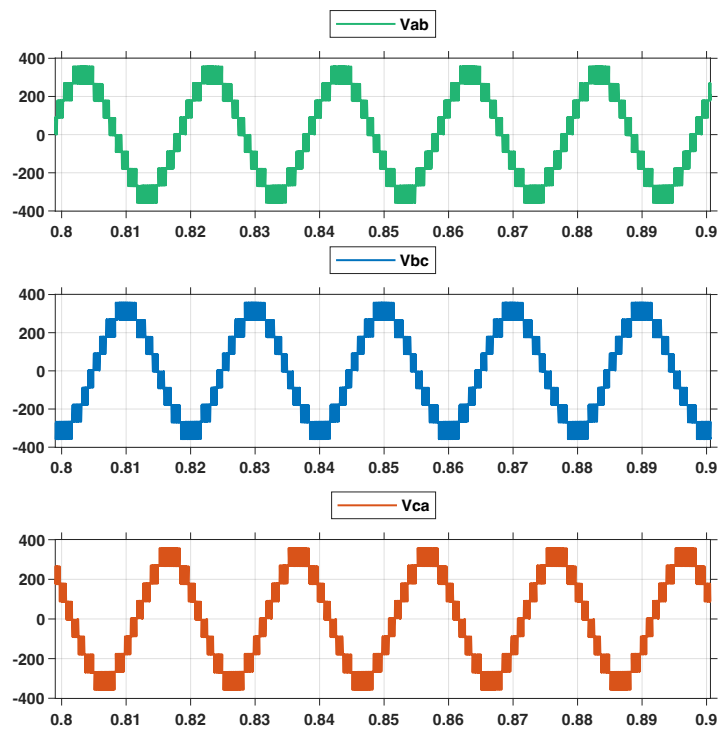


Figure 3.25: Tension composée pour la topologie RSI

Cette tension doit se rapprocher le plus de la tension indiquée dans les paramètres de la

machine (4).

Le courant possède une allure qui suit les niveaux de tensions de sorties, mais cette allure tend à devenir plus lisse à cause de l'effet de l'inductance de la charge et donc du déphasage dû au bobinage du moteur.

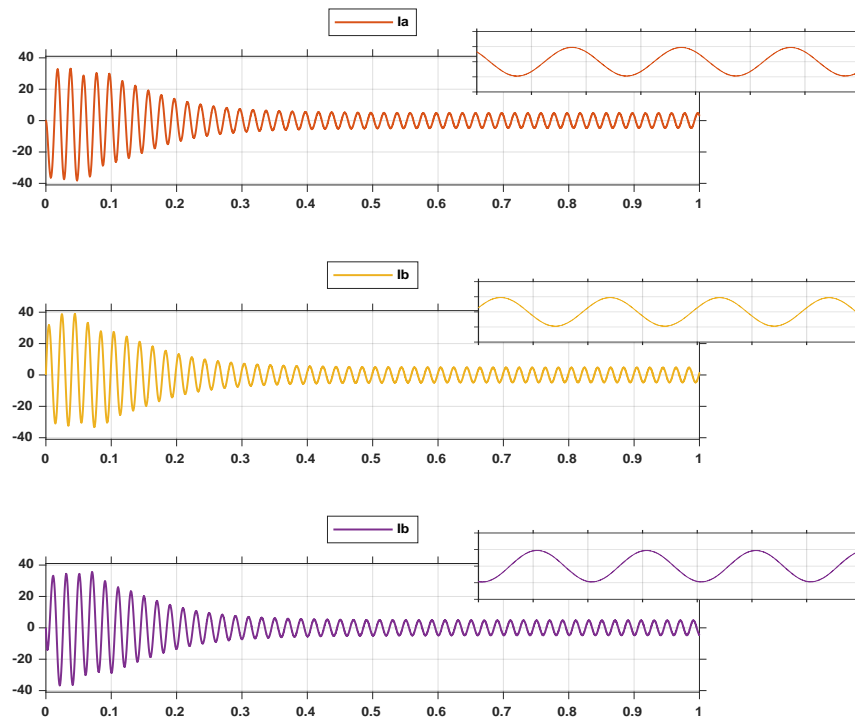


Figure 3.26: Courant de la NPC

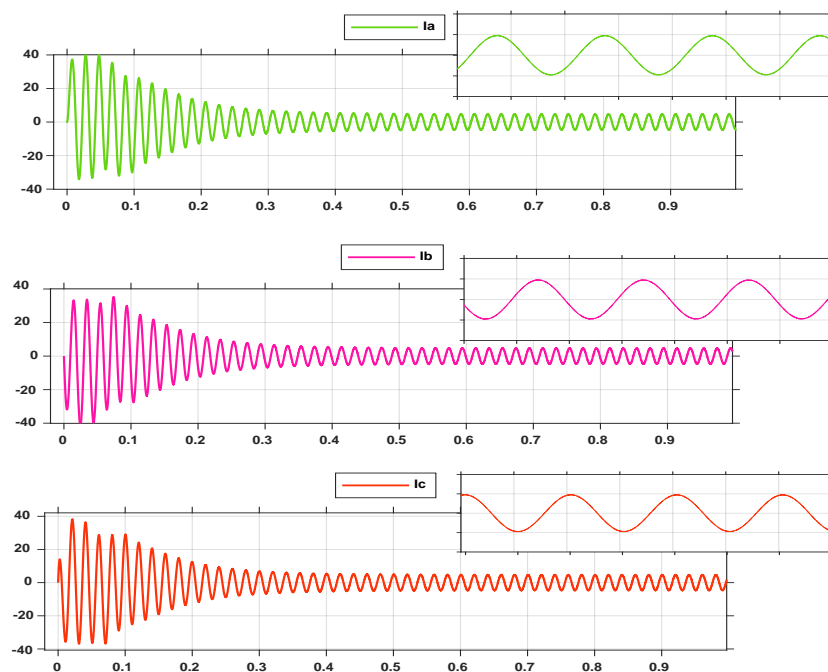


Figure 3.27: Courant de la CHB

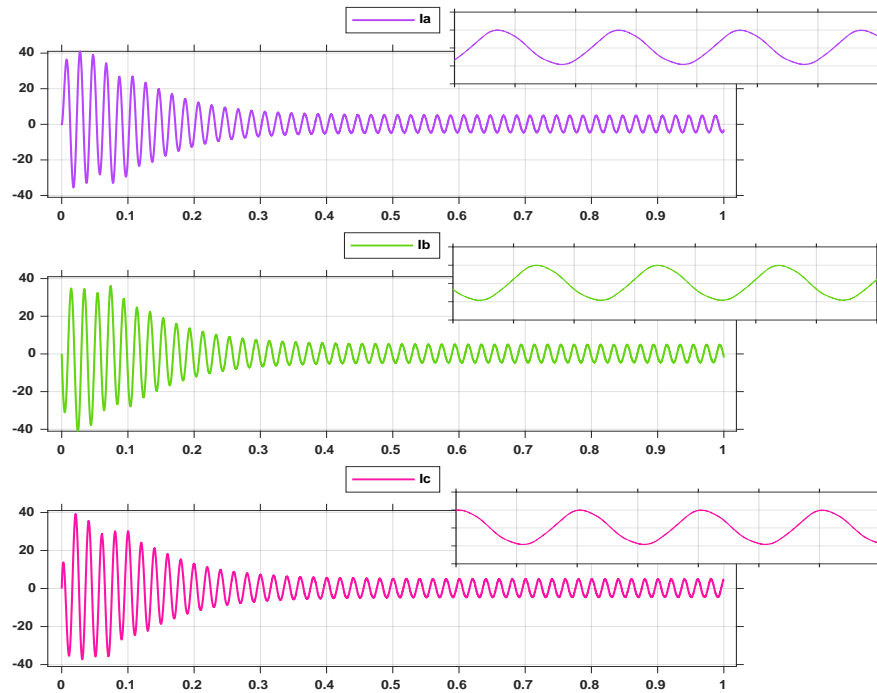


Figure 3.28: Courant de la PUC

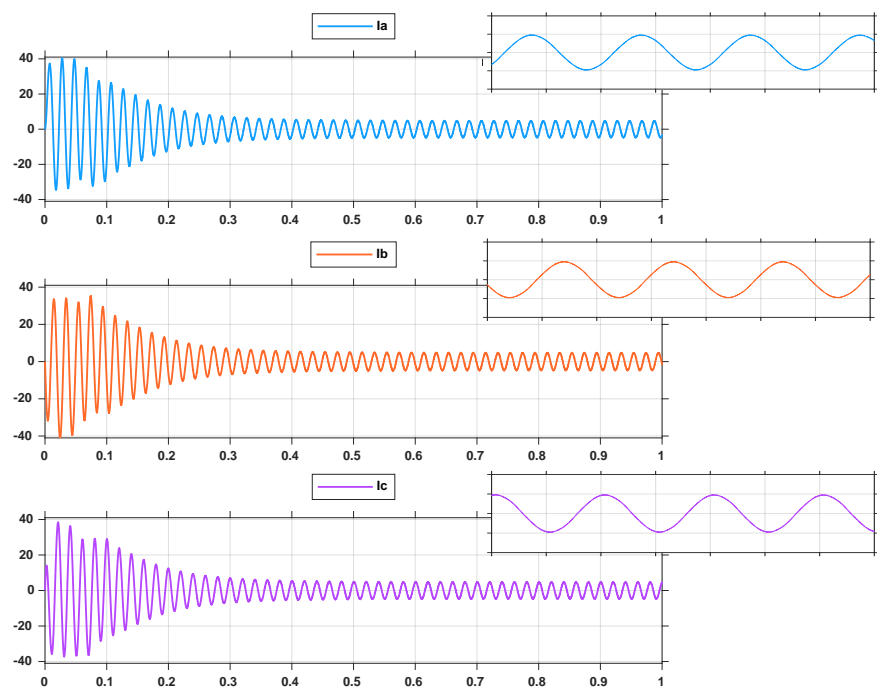


Figure 3.29: Courant de la RSI

4.2 Performances de la charge (MAS-Pompe)

La vitesse du moteur est déterminée par la fréquence du courant électrique alimentant le stator. La vitesse de synchronisme est paramétrée à 1480 tr/min. Cependant, la vitesse réelle du moteur est légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme en raison du

glissement, comme l'indiquent les courbes de vitesse présentées ci-dessous.

Cette vitesse d'entraînement joue un rôle crucial pour assurer un fonctionnement efficace et sûr du système de pompage. En augmentant la vitesse du moteur, le **débit de la pompe** augmente également, et inversement. Cela permet de réguler le volume d'eau ou de fluide pompé à travers le système en fonction des besoins de l'application.

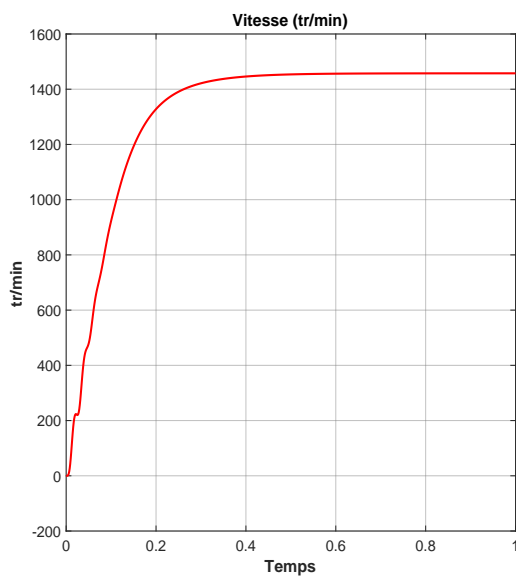


Figure 3.30: Vitesse MAS - NPC

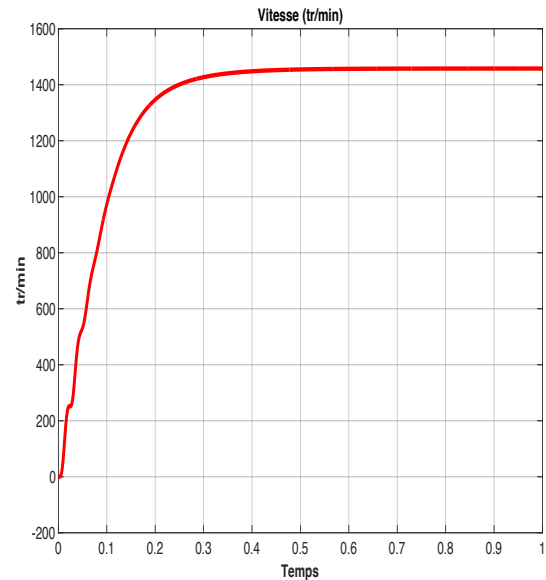


Figure 3.31: Vitesse MAS - CHB

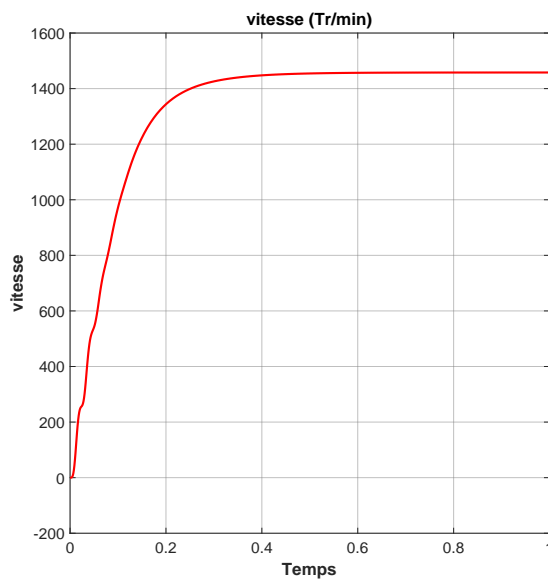


Figure 3.32: Vitesse MAS - PUC

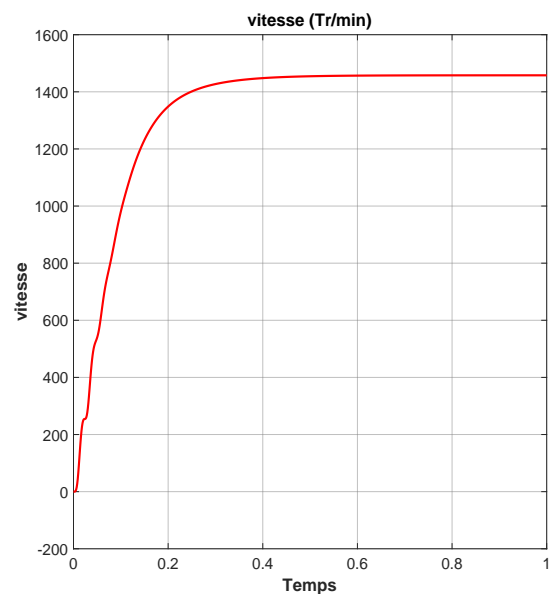


Figure 3.33: Vitesse MAS - RSI

Figure 3.34: Vitesse MAS des 4 topologies

Cette vitesse d'entraînement joue un rôle crucial pour assurer un fonctionnement efficace et sûr du système de pompage. En augmentant la vitesse du moteur, le **débit**

de la pompe augmente également, et inversement. Une relation qui peut être facilement assimilée en se penchant sur l'allure des deux figures (figure 3.34 et figure 3.39). Cela permet de réguler le volume d'eau ou de fluide pompé à travers le système en fonction des besoins de l'application.

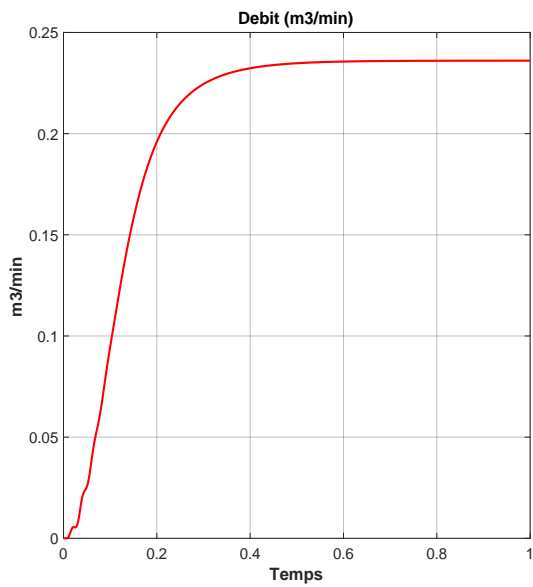


Figure 3.35: Débit d'eau - NPC

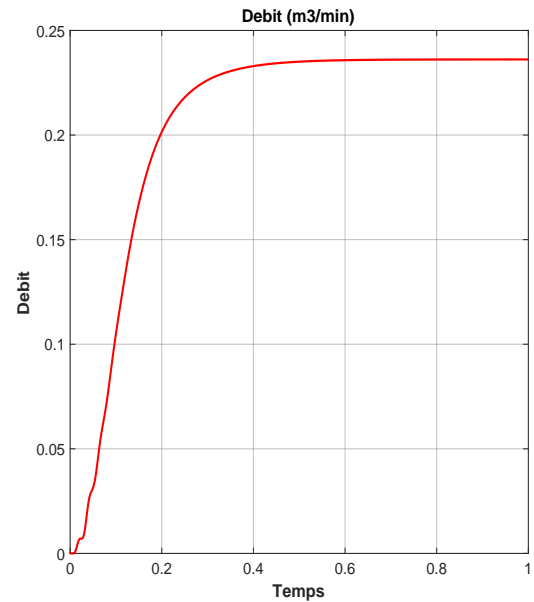


Figure 3.36: Débit d'eau - CHB

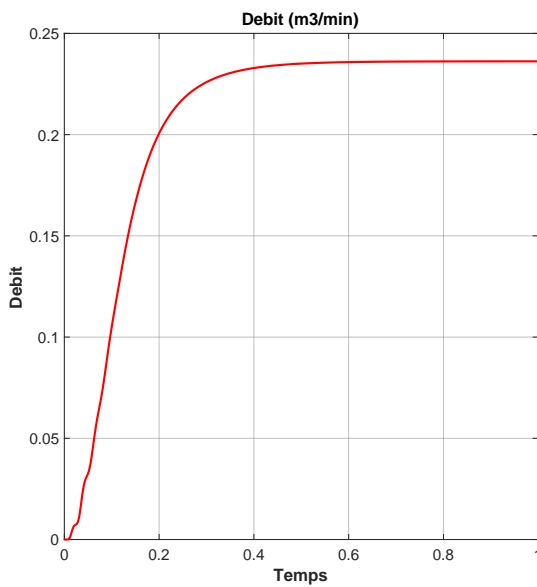


Figure 3.37: Débit d'eau - PUC

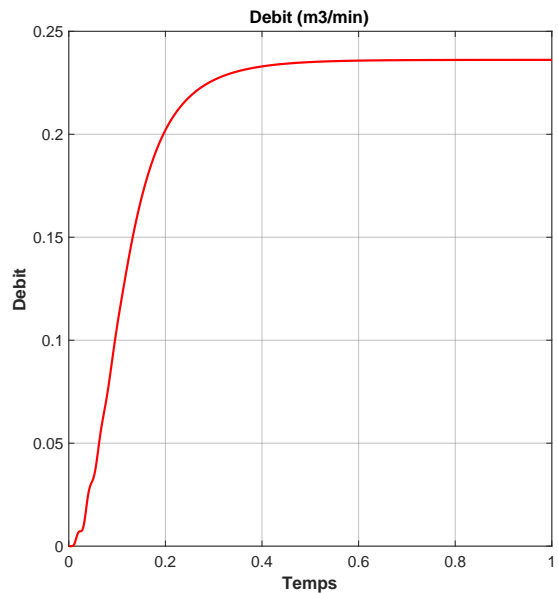


Figure 3.38: Débit d'eau - RSI

Figure 3.39: Débit d'eau des 4 topologies

5 Comparaison entre résultats des topologies

Les résultats des quatre (4) topologies, présentées dans la partie précédente (4), ont tous été obtenus en mettant, d'abord sur la même stratégie de modulation MLI, mais aussi sur le même cadre opérationnel et le même contexte de performance, tel que l'utilisation de panneaux solaires qui sont définis par des paramètres communs (3.14) pour toutes les topologies. La machine asynchrone déployée est elle aussi similaire pour toutes les structures.

Le paramétrage du 'solver' MATLAB SIMULINK pour le processus de simulation est aussi le même pour les quatre (4) modélisations.

5.1 Tensions de sorties

En analysant les tensions de sortie simples des quatre topologies d'onduleurs multiniveaux représentées dans la partie 4 (NPC, CHB, PUC, et RSI), nous constatons que les résultats sont remarquablement similaires. Les courbes de tension pour chacune des topologies montrent des ondes alternatives stables et équilibrées avec des valeurs variant entre $-180V$ et $180V$. Toutes les topologies présentent cinq niveaux de tension distincts : $-180V$, $-90V$, $0V$, $90V$, et $180V$. Bien que chaque configuration ait des caractéristiques structurelles distinctes, les tensions de sortie obtenues montrent une légère différence entre les résultats des quatre topologies. Cela souligne que toutes ces topologies peuvent fournir des performances de haute qualité en termes de tension de sortie, rendant les différences dans leurs résultats globalement insignifiantes. En conséquence, les tensions composées, qui sont dérivées des tensions simples, suivront la même logique, indiquant également une très faible différence entre les différentes topologies. Cela se traduit par une grande similitude des performances des onduleurs multiniveaux, indépendamment des variations mineures observées.

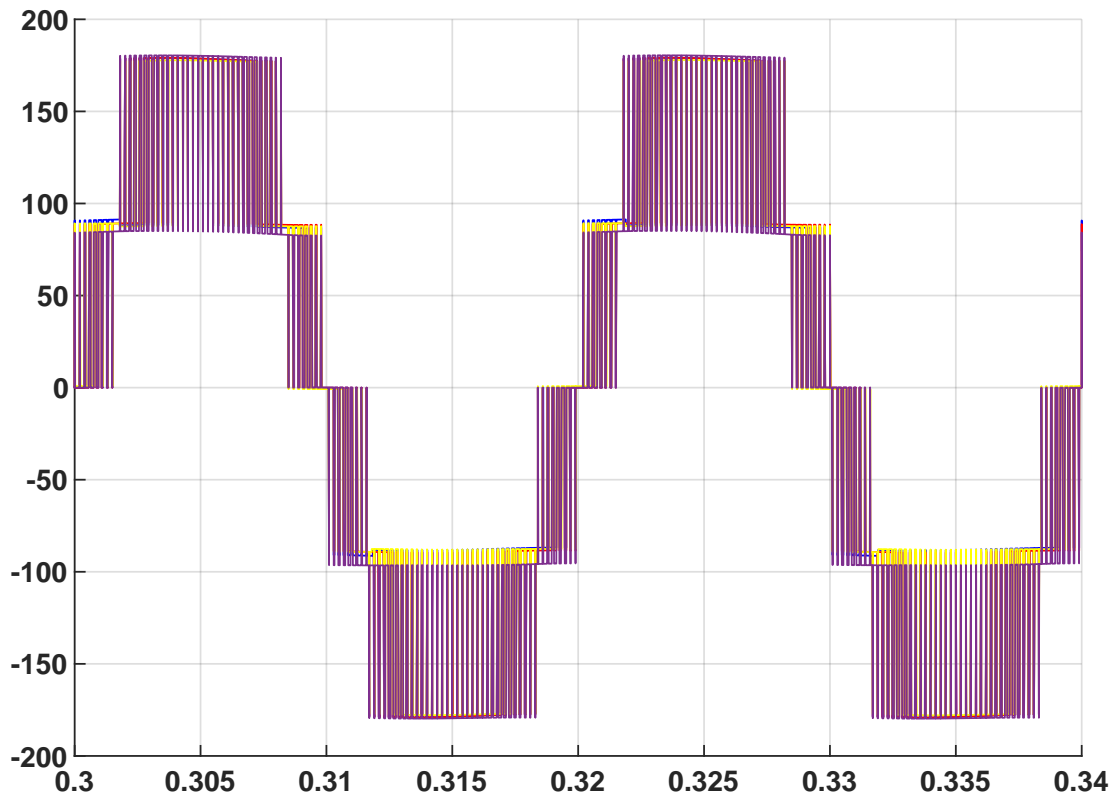


Figure 3.40: Superposition des tensions simples

5.2 Courants de sorties

Comme évoquée précédemment, La forme du courant visualisée (4) possède une allure très proche d'une sinusoïde a cause de la nature la charge, d'où une forme assez lisse.

Aussi, pour l'allure du courant, un phénomène inévitable est bien évidemment observé : Lors du démarrage, le phénomène du courant d'appel se produit, caractérisé par un courant très élevé. Ce courant d'appel peut être plusieurs fois supérieur au courant nominal du moteur comme montré sur les figures.

Ce courant élevé est nécessaire pour produire le couple de démarrage pour vaincre l'inertie du rotor et amener le moteur à sa vitesse de fonctionnement nominale.

Cette augmentation disproportionnée du courant peut entraîner des fluctuations de tension importantes dans le système électrique, ce qui se remarque par une instabilité dans les premiers instants dans l'allure de la tension de sorties des onduleurs.

La figure suivante représente la superposition des courants des quatre structures :

En fin de compte, une comparaison des allures des tensions et des courants, d'après les résultats et les figures présentées (figure3.40 et figure 3.41), nous apprend qu'à l'exception

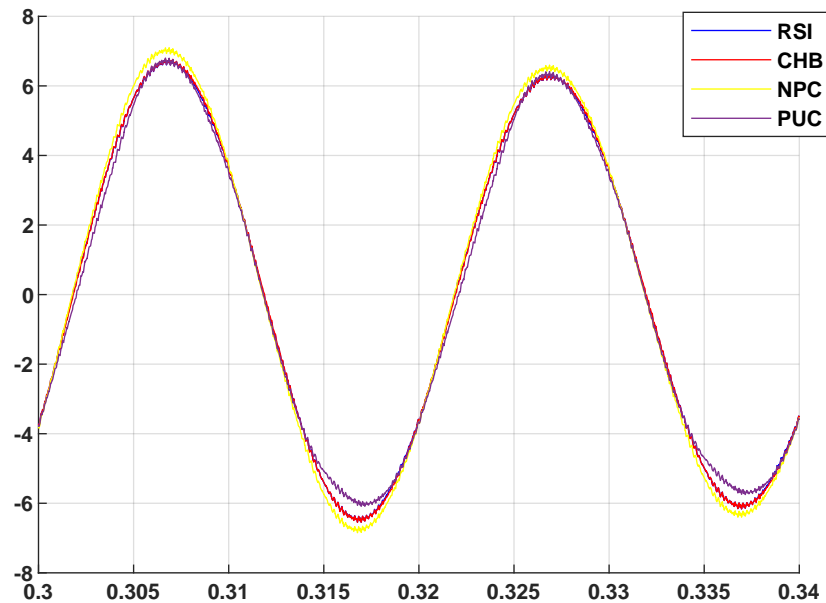


Figure 3.41: Superpositions des courants

de quelques fluctuations ou chutes de tensions/courant assez faible, La différence entre les formes n'est pas aussi importante et flagrante.

les quatre (4) structures répondent parfaitement aux choix des cinq (5) niveaux de tensions sollicités dans la stratégie de modulation utilisée. la stabilisation de la tension ainsi que le chargement adéquat des condensateurs ont approximativement requis le même temps dans tous les cas.

De même pour les allures du courant, une légère distinction de quelques mA peut être notée, mais comme la tension, elles se stabilisent et surmontent la phase du phénomène du courant d'appel en requerront le même laps de temps.

Cette légère distinctions entre les formes des courants et des tensions peut facilement se confirmer en analysant la distorsion harmonique totale THD dans la prochaine partie.

5.3 Taux de distorsion harmonique THD

Pour évaluer et comparer le Total Harmonic Distortion (THD) des tensions et des courants des quatre topologies d'onduleurs multiniveaux (NPC, CHB, PUC, et RSI), nous nous appuyerons sur les résultats de l'analyse spectrale obtenus et représentés sur les figures 3.42, 3.43 et 3.44. Le THD constitue un indicateur clé pour déterminer la qualité des tensions et courants de sortie, mettant particulièrement en évidence l'importance des fréquences des harmoniques éliminées.

En analysant les résultats du THD (figure 3.42) des tensions composées pour les quatre topologies d'onduleurs multiniveaux (NPC, CHB, PUC, et RSI), on remarque que les valeurs de THD sont assez similaires, bien que de légères différences existent. La topologie NPC montre un THD de 17.15%, avec une fréquence fondamentale de 50 Hz et une amplitude de 308.3 V. Les harmoniques se concentrent logiquement autour des multiples de 50 Hz, avec des magnitudes relativement faibles, indiquant une bonne réduction harmonique. La topologie CHB a un THD légèrement inférieur, de 17.04%, avec une fréquence fondamentale de 50 Hz et une amplitude de 309.7 V. Les harmoniques y sont également bien répartis, avec des magnitudes un peu plus basses que celles de la topologie NPC, ce qui montre une meilleure réduction harmonique.

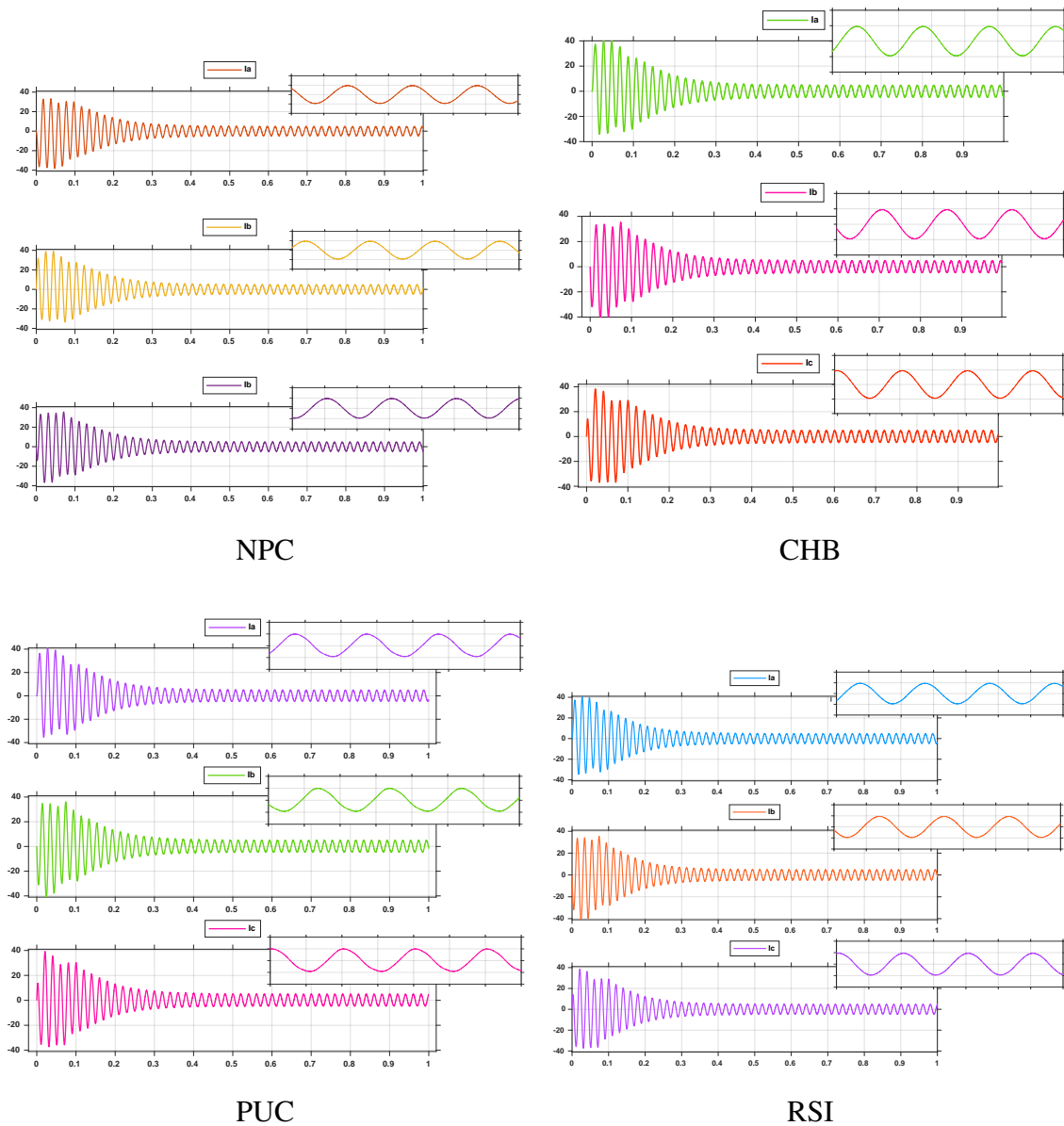


Figure 3.42: THD des tensions composées des topologies

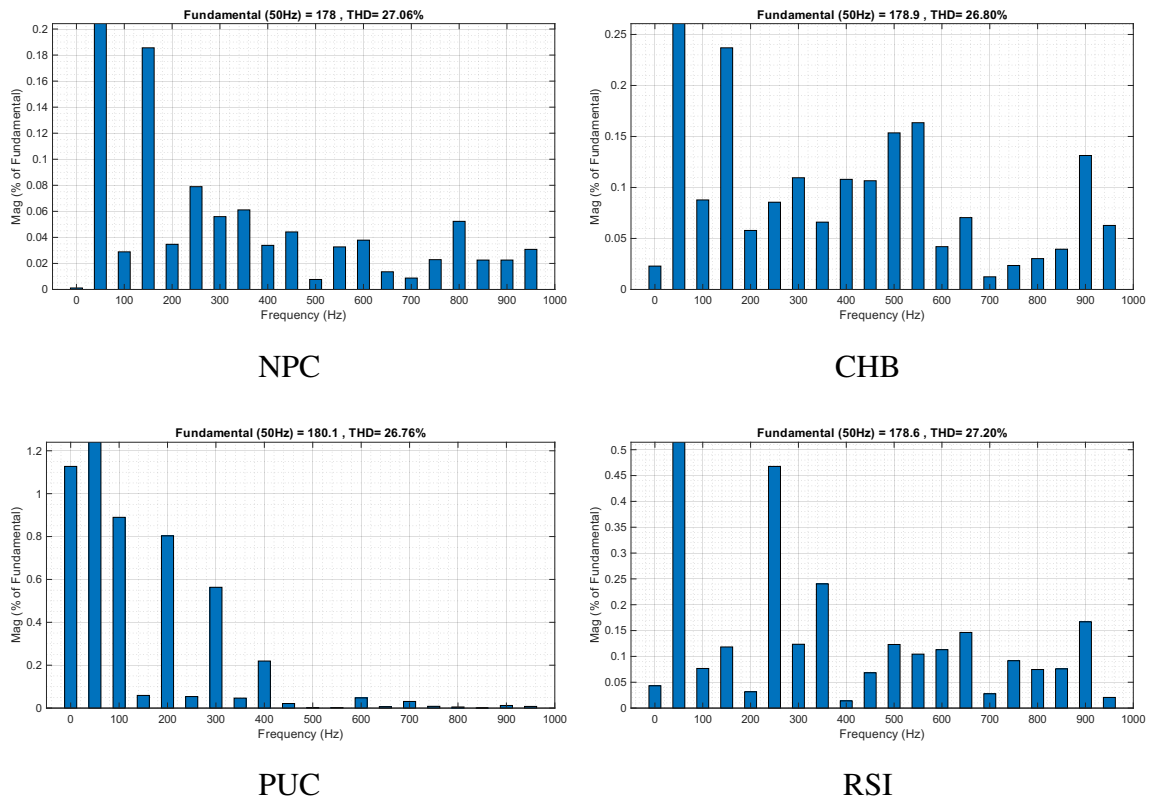


Figure 3.43: THD des tensions simples pour les topologies

Pour la topologie PUC, le THD est de 16.95%, dont l’amplitude du fondamental est de 311.9 V. Les harmoniques présents à des multiples de 50 Hz ont des magnitudes comparables à celles de la topologie CHB, montrant une performance similaire en termes de qualité de tension. La topologie RSI a un THD de 17.15%, avec une amplitude du fondamental de 309.4 V. Les harmoniques y sont plus prononcés, avec des magnitudes plus élevées par rapport aux autres topologies, ce qui peut indiquer une légère baisse de la performance en termes de réduction harmonique.

Ainsi, même si les valeurs de THD montrent de légères variations, toutes les topologies offrent une qualité de tension satisfaisante avec des différences mineures. Les topologies CHB et PUC se distinguent par des performances légèrement meilleures en matière de réduction des harmoniques, tandis que la topologie RSI présente des harmoniques plus marqués, signalant une différence mineure mais notable dans la gestion harmonique. Globalement, ces observations montrent que les quatre topologies d’onduleurs multiniveaux fournissent des résultats comparables en termes de qualité de tension.

Pour le courant, de l’évaluation des résultats du THD pour les quatre topologies (figure 3.44) d’onduleurs multiniveaux (NPC, CHB, PUC, et RSI), on observe des niveaux de THD relativement proches, malgré quelques différences. La topologie NPC affiche un

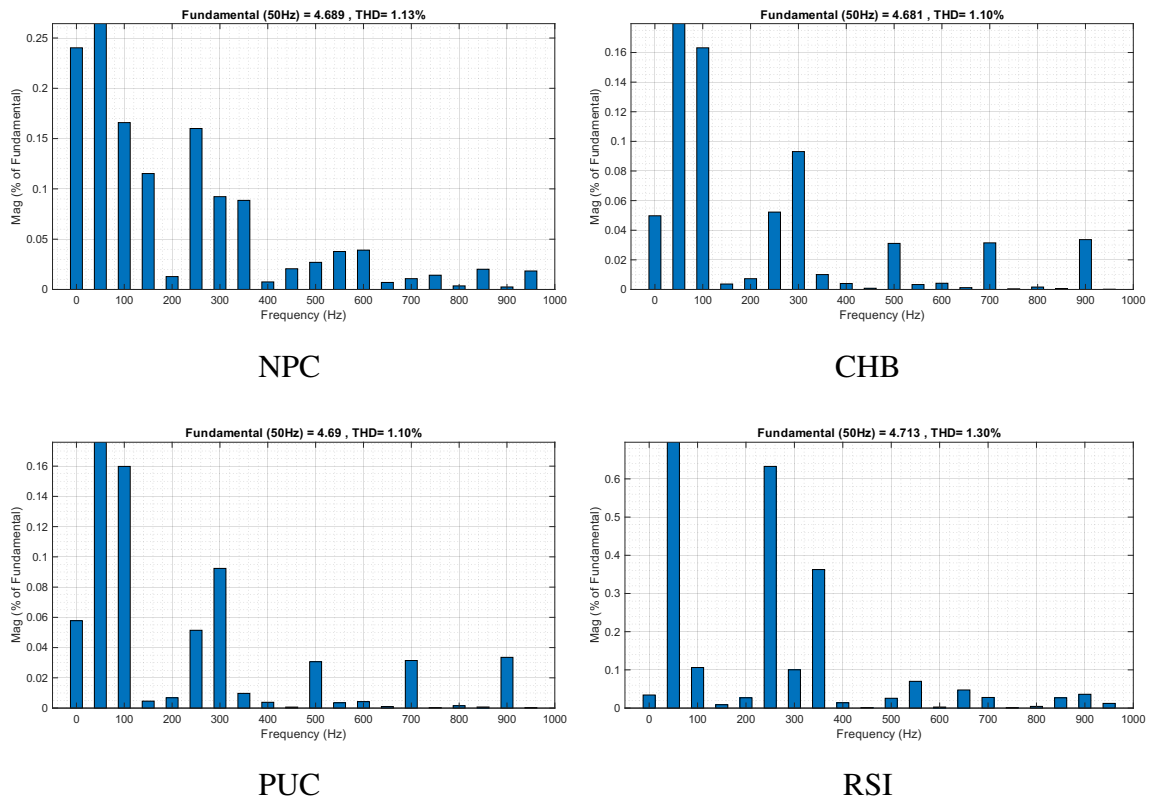


Figure 3.44: THD des courants pour les 4 topologies

THD de 1.13% avec une amplitude de 4.689 et des harmoniques concentrées autour des multiples de la fréquence fondamentale, ce qui démontre une bonne réduction harmonique. La topologie CHB présente un THD légèrement inférieur de 1.10% avec une amplitude de 4.681. Les harmoniques y sont bien répartis et légèrement moins marqués que dans la topologie NPC, indiquant une meilleure performance globale.

Quant à la topologie PUC, le THD est également de 1.10%, avec une amplitude de 4.69. Les harmoniques, bien présents à des multiples de la fréquence fondamentale, montrent des magnitudes similaires à celles de la topologie CHB, soulignant une performance comparable en matière de qualité du courant. En revanche, la topologie RSI affiche un THD légèrement supérieur de 1.30% avec une amplitude de 4.713. Les harmoniques y sont plus prononcés, avec des magnitudes plus élevées que dans les autres topologies, ce qui peut indiquer une légère diminution de la performance harmonique.

Bien que les valeurs de THD varient légèrement, toutes les topologies offrent une qualité de courant acceptable avec des différences minimales. Les topologies CHB et PUC se démarquent par une meilleure réduction des harmoniques, tandis que la topologie RSI présente des harmoniques plus marqués, reflétant une différence notable mais mineure dans

la gestion harmonique. Les quatre topologies d'onduleurs multiniveaux fournissent des résultats comparables en termes de qualité de courant, avec des variations principalement autour des multiples de la fréquence fondamentale.

5.4 Vitesse et débit MAS/Pompe

Notre analyse de la performance de la MAS s'est concentrée sur la vitesse de rotation du rotor de la machine, un paramètre crucial dans le rendement de la pompe et du système.

Quant à la pompe, c'est le débit d'eau qui a été évalué, une donnée qui nous permettra d'observer le résultat final et global de notre système de pompage solaire.

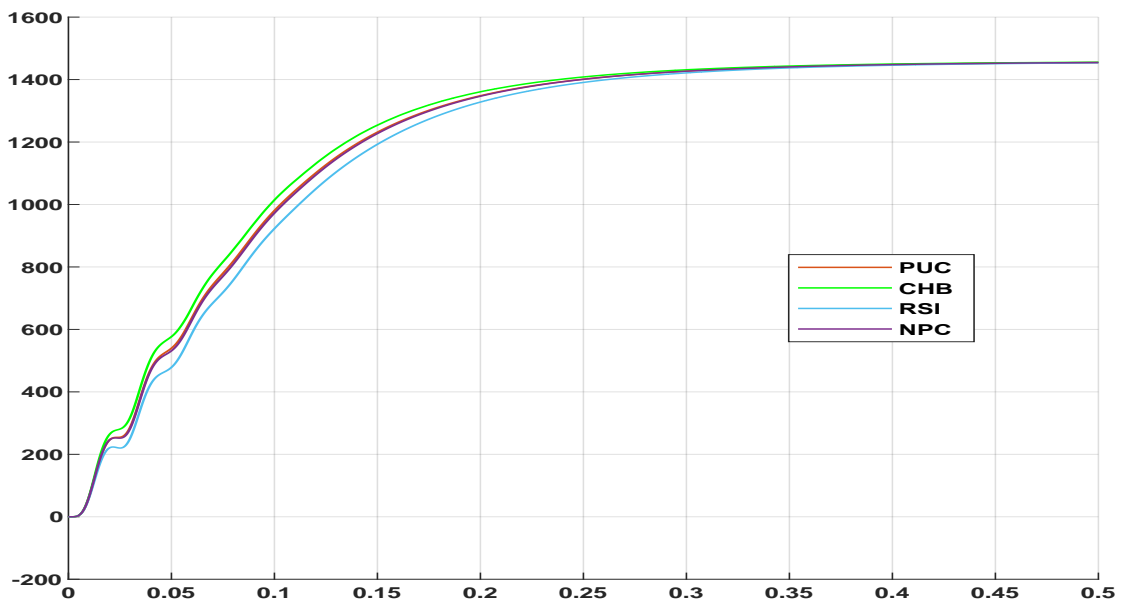


Figure 3.45: Superposition des vitesses

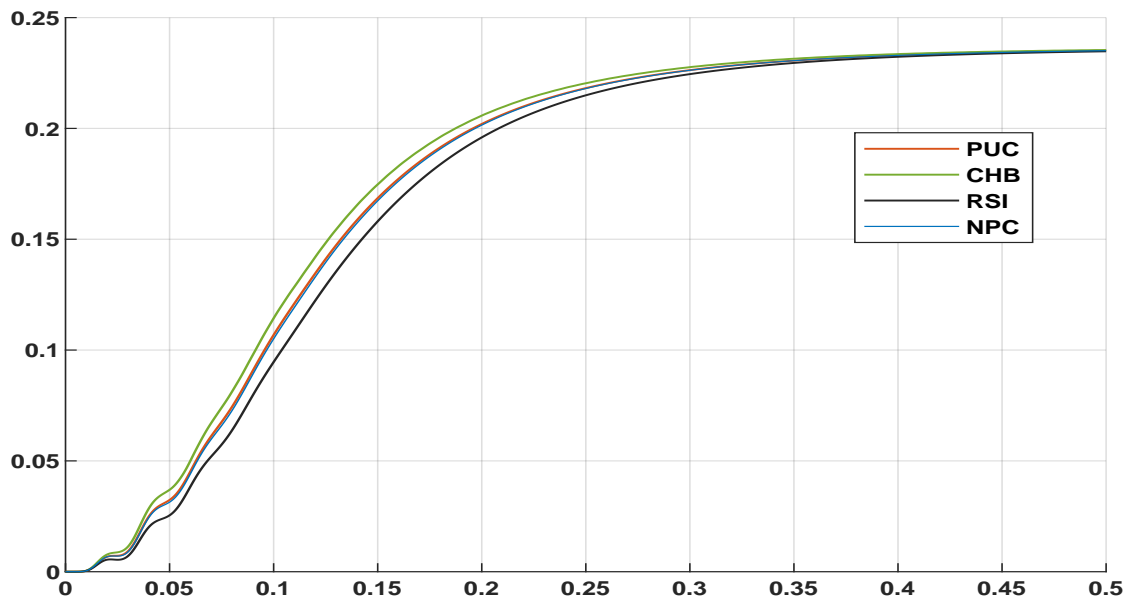


Figure 3.46: Superposition de débits

La figure 3.45 expose le résultat d'un empilage des vitesses de rotations de la MAS des quatre (4) topologies. nous remarquons que ce sont les structures **CHB** et **RSI**, qui représentent respectivement la vitesse la plus rapide et la moins rapide à atteindre "la vitesse synchrone", les deux autres structures **PUC** et **NPC** possèdent à peu près la même rapidité avec un léger avantage pour la **PUC**.

La pompe étant entraînée par le moteur, le débit Q , suit conséquemment l'évolution ainsi que l'allure de la vitesse de rotation de la MAS, les observations et interprétations des résultats de la vitesse peuvent facilement être extrapolés pour les conclusions qui concernent le débit d'eau de la pompe 3.46.

Finalement, comme remarquée sur les figures 3.45 et 3.46, et après un certain temps, toutes les topologies arrivent à faire tourner le moteur à une vitesse stable similaire, entraînant un débit d'eau équivalent dans tous les cas.

5.5 Effet de l'indice de modulation

L'analyse de l'effet de l'indice de modulation sur le THD (Total Harmonic Distortion) montre une relation claire entre ces deux paramètres. L'indice de modulation, qui varie de 0.6 à 1, a un impact significatif sur le THD des onduleurs. À un indice de modulation de 0.6, les valeurs de THD sont relativement élevées, indiquant une présence significative d'harmoniques dans la tension de sortie. Cependant, à mesure que l'indice

de modulation augmente, les valeurs de THD diminuent progressivement. Cela signifie que l'augmentation de l'indice de modulation améliore la qualité de la tension de sortie en réduisant les composantes harmoniques.

Lorsque l'indice de modulation atteint des valeurs plus élevées, proches de 0.95 ou plus, le THD atteint généralement ses valeurs les plus basses. Cela s'explique par le fait qu'un indice de modulation plus élevé permet à l'onduleur de fonctionner plus près de sa tension nominale, réduisant ainsi les distorsions harmoniques.

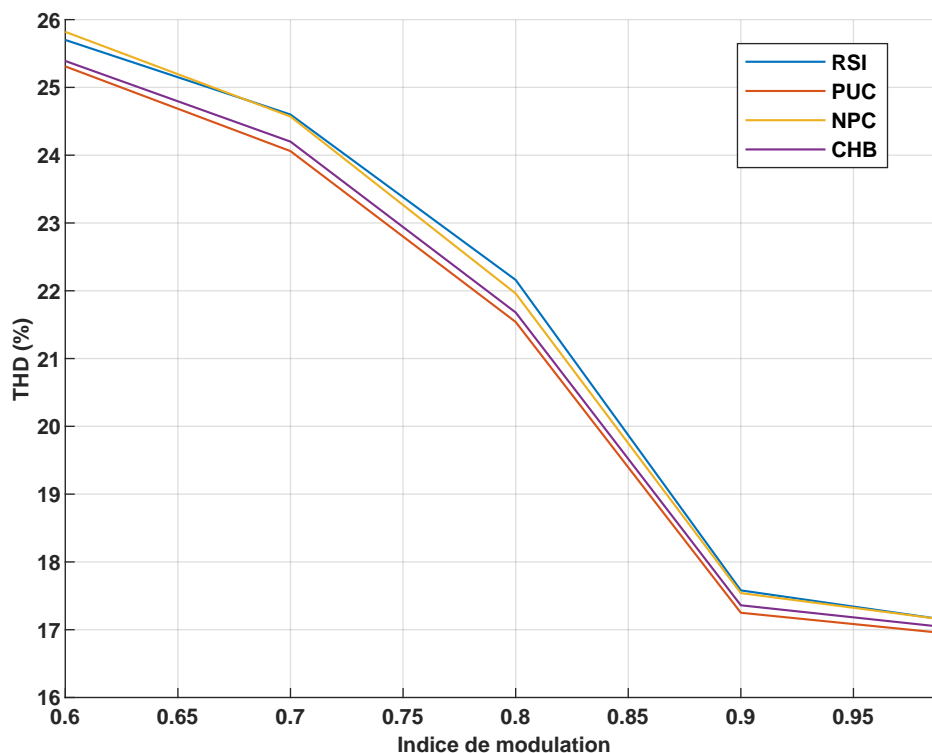


Figure 3.47: Effet de l'indice de modulation sur le THD

Conclusion

Ce chapitre a fourni une modélisation détaillée de notre système de pompage photovoltaïque utilisant diverses topologies d'onduleurs multiniveaux, ainsi que des simulations effectuées à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. Nous avons exploré la configuration et l'implémentation de chaque topologie, en mettant en évidence leurs structures spécifiques et les composants utilisés. Les résultats de simulation ont été interprétés et comparés pour les tensions/courants de sortie, et l'analyse spectrale des tensions composées, en tenant compte du Total Harmonic Distortion (THD) et des fréquences des harmoniques éliminées.

Les analyses et interprétations ont montré que toutes les topologies étudiées (NPC, CHB, PUC, et RSI) offrent des performances de haute qualité avec des différences très négligeables. Les ondes sinusoïdales produites par ces topologies sont stables et précises, minimisant les distorsions et assurant une performance optimale des systèmes alimentés. En particulier, la topologie PUC a présenté le THD le plus bas, tandis que les topologies CHB et NPC ont également démontré une excellente performance harmonique.

En outre, l'effet de l'indice de modulation sur le THD a été examiné, soulignant l'importance de ce paramètre dans l'optimisation des performances des onduleurs multiniveaux. La compréhension et le contrôle de l'indice de modulation permettent de réduire davantage les distorsions harmoniques et d'améliorer l'efficacité globale du système.

Conclusion Générale

Cette étude comparative sur quatre topologies d'onduleurs 5 niveaux (NPC, CHB, PUC et RSI) intégrées à un système de pompage photovoltaïque a permis de répondre aux objectifs définis, en apportant une vision claire et détaillée des performances techniques et des implications pratiques de chaque configuration.

Le premier chapitre a posé les fondations de cette recherche en offrant une vue d'ensemble exhaustive des onduleurs multiniveaux. Nous avons exploré leur évolution historique, leurs applications variées et les différentes stratégies de modulation utilisées. Cette mise en contexte a souligné l'importance croissante des onduleurs multiniveaux dans les systèmes de conversion de puissance, en mettant en avant leurs avantages techniques comme la réduction du THD (Total Harmonic Distortion) et leur capacité à gérer efficacement des tensions élevées.

Le deuxième chapitre a approfondi l'analyse en comparant les différentes topologies d'onduleurs. Chaque configuration, de la NPC à la CHB en passant par la PUC et la RSI, a été examinée en détail pour en comprendre les avantages et inconvénients. Nos résultats ont révélé que la topologie PUC est la plus économique en termes de composants, tandis que la RSI, bien que simplifiée, maintient des performances élevées grâce à un circuit auxiliaire ingénieux. Les topologies NPC et CHB, bien que plus complexes, offrent des solutions robustes pour des applications nécessitant des configurations modulaires et des niveaux de tension symétriques. L'utilisation de la modulation LSPWM pour toutes les topologies a permis de garantir une comparaison équitable, démontrant son efficacité à minimiser les distorsions harmoniques.

Le troisième chapitre a présenté la modélisation et les simulations de notre système de pompage photovoltaïque, mettant en lumière les spécificités de chaque topologie. Les simulations ont montré que toutes les configurations étudiées fournissent des performances de haute qualité, avec des différences très minimes. Notamment, la topologie PUC a

affiché le THD le plus bas, tandis que les topologies CHB et NPC ont également démontré d'excellentes performances en termes d'harmoniques. Nous avons aussi examiné l'impact de l'indice de modulation sur le THD, soulignant combien ce paramètre est crucial pour optimiser les performances des onduleurs multiniveaux.

En conclusion, cette étude a permis d'identifier les configurations d'onduleurs les plus efficaces et les plus fiables pour les systèmes de pompage photovoltaïque. La topologie PUC s'est distinguée par sa simplicité et son efficacité, offrant un excellent compromis entre la complexité du circuit et la qualité de l'onde de sortie. Les topologies NPC et CHB ont prouvé leur robustesse et leur adaptabilité pour des applications spécifiques nécessitant des configurations modulaires. La topologie RSI, avec sa réduction significative du nombre de commutateurs, représente une solution attrayante pour les systèmes où la minimisation des composants est cruciale.

Toutefois, la comparaison des topologies d'onduleurs n'est pas suffisante pour une évaluation complète. Il est essentiel de prendre en compte les stratégies de modulation utilisées. Une analyse approfondie des différentes stratégies de modulation, telles que le PWM traditionnel, le SHEPWM, le SVPWM et la NLC, pourrait offrir des perspectives supplémentaires pour optimiser les performances globales du système. Ces stratégies influencent significativement la qualité de l'onde de sortie, la réduction des pertes et la gestion des harmoniques.

Ainsi, les résultats de cette étude fournissent des indications précieuses pour la sélection et l'implémentation des onduleurs multiniveaux dans les systèmes de pompage photovoltaïque. Ils contribuent à optimiser le rendement énergétique, la stabilité du système, et la réponse dynamique du moteur et de la pompe, assurant ainsi des performances optimales et fiables pour des applications spécifiques.

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] S. T. et YAHIAOUI Oussama, “Alimentation d’une pompe par une source d’énergie renouvelable, mémoire de master,” *Université Larbi Tebessi – Tébessa*, 2021/2022.
- [3] I. F.-S. K. M. I. M. H. L. S. M. I. Sung-Jun Park, Member and I. Cheul-U Kim, Member, “A new single-phase five-level pwm inverter employing a deadbeat control scheme,” *EEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 18, NO. 3, MAY 2003*.
- [4] 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*.
- [5] T. Soulef, “Commande et réalisation d’un convertisseur multiniveaux (mldc), mémoire de master,” *Université Saad Dahlab Blida 1, Faculté de technologie. Département des énergies renouvelables*, 2019/2020.
- [6] G. F. François Ledent, “Getting started with an npc converter,” January 3, 2024.
- [7] G. F. François Ledent, “Neutral point clamped inverter (npc),” March 14, 2024.
- [8] C. Salim, “Simple control method for unified power quality based on five-level inverter topologies operating under all voltage disturbances,” *Nuclear Research Centre of Birine · Electrical Engineering.*, March 14, 2024.

-
- [9] G. F. François Ledent, “Space vector modulation of multilevel inverters: a simple and fast method of two-level hexagon’s selection,” January 2017.
- [10] O. O. U. o. Y. I. f. S. A. Olusola Komolafe, Obafemi Awolowo University · Department of Electronic Electrical Engineering, “Gapped alternate phased opposite disposition-pulse width modulation control for multilevel inverters,” August 2015.
- [11] N. A. Ahmet Yuksel, “Three-phase grid-connected five-level packed u-cell (puc-5) inverter design,” *2022 11th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, 2022.
- [12] W. P. R. Ned Mohan, Tore M. Undeland, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. John Wiley Sons Inc, 2002.
- [13] P. D. Guy Séguier, Francis Labrique, *Electronique de puissance: Structures, commandes, applications*. DUNOD, 2015.
- [14] A. Krishna R and L. P. Suresh, “A brief review on multi level inverter topologies,” in *2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, pp. 1–6, 2016.
- [15] S. Bashi, N. Mailah, Z. Kadir, and H. Leong, “Generation of triggering signals for multilevel converter,” *European Journal of Education*, vol. 24, pp. 548– 555, 12 2008.
- [16] A. K. Koshti and M. N. Rao, “A brief review on multilevel inverter topologies,” in *2017 International Conference on Data Management, Analytics and Innovation (ICDMAI)*, pp. 187–193, 2017.
- [17] K. K. Gupta, A. Ranjan, P. Bhatnagar, L. K. Sahu, and S. Jain, “Multilevel inverter topologies with reduced device count: A review,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 1, pp. 135–151, 2016.

Résumé

Ce mémoire propose une étude comparative des quatre topologies d'onduleurs multiniveaux dans un système de pompage solaire. L'évolution des onduleurs, leur transition vers des topologies multiniveaux, leurs caractéristiques, méthodes de modulation et applications sont explorées, soulignant des avancées importantes en conception et commande. Les topologies NPC, Cascaded H-Bridge, Packed U-Cell et RSI sont analysées en détail, en évaluant leurs performances électriques, complexité et contrôle. Les résultats sont comparés, mettant en avant l'importance des avancées récentes pour les défis énergétiques actuels, surtout en pompage solaire. Cette étude offre une vision globale des progrès des onduleurs multiniveaux dans les systèmes d'énergie renouvelable.

Mots clés:

Onduleurs multiniveaux; Systèmes de pompage photovoltaïque; Topologies (NPC, Cascaded H-Bridge, Packed U-Cell et RSI); Modulation de largeur d'impulsion (PWM); Efficacité énergétique; Réduction des distorsions harmoniques.

Abstract

This thesis presents a comparative study of four multilevel inverter topologies in a solar pumping system. The evolution of inverters, their transition to multilevel topologies, their characteristics, modulation methods, and applications are explored, highlighting significant advances in design and control. The NPC, Cascaded H-Bridge, Packed U-Cell, and RSI topologies are analyzed in detail, evaluating their electrical performance, complexity, and control. The results are compared, emphasizing the importance of recent advances for current energy challenges, especially in solar pumping. This study provides a comprehensive overview of the progress of multilevel inverters in renewable energy systems.

Key words:

Multilevel inverters; Photovoltaic pumping systems; (NPC, Cascaded H-Bridge, Packed U-Cell and RSI) topologies; Pulse Width Modulation (PWM); Energy efficiency; Harmonic distortion reduction.

ملخص

تقترح هذه الرسالة دراسة مقارنة لأربع طوبولوجيات لمبدلات الجهد المتعددة المستويات في نظام ضخ شمسي. يتم استكشاف تطور المبدلات، انتقالها إلى طوبولوجيات متعددة المستويات، خصائصها، طرق التضمين وتطبيقاتها، مع تسليط الضوء على التقدم الهام في التصميم والتحكم. يتم تحليل طوبولوجيات NPC، Cascaded H-Bridge، Packed U-Cell، و RSI بالتفصيل، وتقييم أدائها الكهربائي، وتعقيدها، والتحكم بها. تتم مقارنة النتائج مع التأكيد على أهمية التقدّمات الحديثة لمواجهة التحديات الحالية في مجال الطاقة، خاصة في الضخ الشمسي. توفر هذه الدراسة رؤية شاملة للتقدم في مبدلات الجهد المتعددة المستويات في أنظمة الطاقة المتجددة.

الكلمات المفتاحية:

مبدلات متعددة المستويات؛ أنظمة الضخ الفوتوفلطية؛ طوبولوجيا NPC، Cascaded H-Bridge، Packed U-Cell، RSI؛ تعديل عرض النبضة PWM كفاءة الطاقة؛ تقليل التشويه التوافقي.