

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Batna 2 Chahid Mostafa BENBOULAD



FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département d'Electrotechnique

THÈSE

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT EN SCIENCES EN ELECTROTECHNIQUE

OPTION : MAÎTRISE DES ENERGIES

Présentée par : **ABOUB HANIA**

Contribution à l'étude des onduleurs neuf niveaux triphasés connectés aux
convertisseurs DC-DC survolteurs multi sorties dans des systèmes

Soutenue le :08/07/2023, devant le jury composé de :

Président :	M. Bendaas M.LOKMANE	Professeur	Université de Batna 2
Directeur :	M. Azoui BOUBEKEUR	Professeur	Université de Batna 2
Co-directeur :	Mrs. Mechouma RABIAA	M.C.A	Université de Batna 2
Examineur :	M.Benalla HOCINE	Professeur	Université de Constantine 1
Examineur :	M. Bara KAMAL	Professeur	Université de O.M.B
Examineur :	M. Betka ACHOUR	Professeur	Université de Biskra

BATNA, ALGERIE. 2023

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

(وَقُلْ رَبِّ زِدْنِيْ عِلْمًا)

صَدَقَ اللّٰهُ العَلِيَّ العَظِیْمَ

سورة طه: من الآیة 114

*"Celui qui ne remercie pas les
gens ne remercie pas Allâh "*

Remerciements

Premièrement et avant tout, je remercie Allah le tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein du laboratoire **LEB** de **Batna2** dirigé par professeur **Rachid ABD ASSEMED**, j'exprime mes vifs remerciements pour les facilités et la mise à disposition des moyens du laboratoire.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur monsieur **Boubakeur AZOUI** professeur au département d'électrotechnique à l'université de Batna2, pour avoir dirigé ce travail, pour l'intérêt, la confiance et la motivation qu'ils ont témoigné tout au long de la réalisation de ce travail.

Je remercie très sincèrement madame **Rabiah MECHOUMA** Maitre de conférences à l'université de Batna 2 pour avoir dirigé ce travail et de m'avoir aidé par ses conseils précieux et ses orientations judicieuses dont les apports ont été très déterminants dans l'aboutissement de ces travaux.

Je voudrais adresser un merci très sincère à monsieur **M.Lokmane BENDAAS** professeur au département d'Electrotechnique à l'université de Batna 2 pour sa gentillesse, sa rigueur scientifique, ainsi d'avoir participé à ma formation de magister. Je suis très sensible à l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury.

Je témoigne ma gratitude à monsieur **Hocine BENALLA** professeur au département d'électrotechnique à l'université de Constantine 1, d'avoir accepté de m'honorer par sa présence dans le jury de soutenance.

Je remercie très vivement à monsieur **Kamal BARA** Professeur au département d'Electrotechnique à l'université d'Oum El Bouaghi, d'avoir répondu à notre invitation et de m'honorer par sa présence dans le jury de soutenance afin d'examiner ce travail.

Ma reconnaissance s'adresse à monsieur **Achour BETKA** professeur au département d'électrotechnique à l'université de Biskra, d'avoir répondu à notre invitation. C'est un grand honneur pour moi qu'il siège dans le jury de ma thèse.

Je tiens à remercier vivement monsieur **Said BENAGGOUNE**, le chef-Adjoint de la Post-Graduation de département d'électrotechnique à université de Batna 2 pour les facilités et ses orientations judicieuses.

Je voudrais aussi remercier très sincèrement à Messieurs :**Dr.Labioud Chouaib** et **Dr. Khechekhouche Abd Errahman**, pour les facilités, leurs orientations judicieuses et ces encouragements continus pour diriger mon travail.

Je remercie vivement mes collègues **Dr.Madiha Maamir,Dr. Sasia Boualem, Dr.Hakima Cherif, Dr.Sabrina Benaicha et Mrs. Malika Bouateli** de m'avoir aidées par leurs conseils précieux, leurs qualités humaines, leurs esprits critiques pour j'ai réussi de terminer ce travail.

Je remercie très sincèrement mon mari ,mes frères, mes souris, mes amis pour leurs encouragements continus sont pour beaucoup dans l'aboutissement de ce travail.

Du fond du cœur, je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ABOUB Hania

Dedicace

Je dédie ce modeste travail :

À la mémoire de mes parents : **Mouloud** et **Djmâa Echine**, que Dieu ait pitié d'eux.

À ma chère mère **Khaira Sahraoui** avec toute mon affection.

À ma chère grand mère **Khadidja Khalfaoui** qui attend depuis longtemps ce moment avec impatience. Que Dieu la protège et bénisse sa vie.

À mon cher mari **Aboub Abd Elghani** avec toute ma reconnaissance.

A mes frères et soeurs et tous leurs enfants qui attendent ce moment avec beaucoup d'enthousiasme et particulièrement ma soeur **Masaouda**.

À tous les membres de la famille de mon mari qui m'ont soutenu autant qu'ils le pouvaient qui attendent avec impatience cette occasion.

À mes chers amis surtout : **Madiha, Hakima, Sasia , Sabrina, Malika**.

À tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation du **Primaire** au **Doctorat**.

À mes grands familles **ABOUB** et **ECHINE**.

À toutes personnes de ma chère ville **TAIBET**.

Abstract

The increase in energy demand is still growing and will undoubtedly be a major challenge in the coming decades. One of the possible solutions is to increase energy production, another way to increase the efficiency of already existing equipment. In this thesis, a contribution to the study of a photovoltaic generator connected to a switched capacitor multilevel inverter connected to the electrical network is made.

In the literature, the study of the three basic topologies of conventional multilevel converters (CMU) shows that, although these inverters make it possible to convert high powers with good energy quality (low THD of current waves and tension), they present the disadvantage of using a high number of components by increasing of the number of levels. To overcome this limitation, for the last two decades, new multilevel switched capacitor inverter topologies based on reduced component count (RCN) have been developed. The main advantage of these proposed inverters is the reducing of the number of isolated direct current sources and replacing them by capacitors.

The rooted tree method of optimization was studied in this work as a method of solving nonlinear systems of equations to determine the initial values of the appropriate carrier angles. This is to improve the energy efficiency, THD of output signals, control strategy, volume and cost of multilevel inverters. To check the efficiency of the RTO algorithm, the simulation results obtained are presented and analysed. The obtained results show the feasibility and efficiency of the proposed control system.

Keywords :

Switched Capacitor Multi-Level Inverter ; Rooted Tree Optimization RTO ; grid-connected PV system ; THD

Résumé

La demande croissante d'énergie électrique est certain qu'elle sera un défi important dans les décennies à venir. Augmentation de la techniques de production d'énergie ou l'amélioration d'efficacité des équipements du système sont les solutions possibles. La présente thèse aborde l'étude d'un générateur photovoltaïque raccordé au réseau électrique par l'association à un onduleur multiniveaux à condensateur commuté.

Selon des études menées sur trois topologies de base de convertisseurs multiniveaux conventionnels (CMU) dans la littérature, ces onduleurs permettent une conversion de puissance élevée tout en offrant une qualité d'énergie élevée.(faible THD des ondes de courant et de tension), L'inconvénient majeur d'avoir plus de niveaux est que plus de composants sont utilisés. Pour surmonter cette limitation, les onduleurs à condensateurs commutés à plusieurs niveaux ont été développés au cours des deux dernières décennies pour réduire le nombre de composants (RNC). L'avantage principal de ces onduleurs proposés est de réduire le nombre de sources de tensions continues et de les remplacer par des condensateurs.

On a proposé dans cette étude la méthode de rooted tree d'optimisation comme une méthode de résolution pour déterminer les optimums valeurs initiaux des angles des porteuses de la technique de modulation MLIS. L'objectif est d'améliorer la performance et l'efficacité énergétique, le THD du signal de sortie, la stratégie de contrôle, le volume et le coût des onduleurs à plusieurs niveaux. Pour tester l'efficacité de l' algorithme de RTO, résultats de simulation obtenus sont analysées et commentées. Les résultats démontrent l'efficacité et la faisabilité du système de contrôle proposé.

Mots clés Onduleur multi-niveaux à condensateur commutée ; Rooted Trée Optimisation RTO ; système PV connecté au réseau ; THD.

ملخص

ان الطلب المتزايد للطاقة الكهربائية سيمثل بلا شك تحديًا كبيرًا في العقود القادمة. أحد الحلول الممكنة هو زيادة كفاءة المعدات الموجودة او البحث عن طاقات بديلة لزيادة إنتاج الطاقة. في هذه الأطروحة ، نقتراح إجراء مساهمة بدراسة المولد الكهروضوئي لتغطية الاحتياجات من جهة و تحسين كفاءة الطاقة الموجهة للشبكة الكهربائية باستعمال العاكس المتعدد المستويات ذو مكثف تبديل من جهة اخرى.

في السنوات الاخيرة السابقة ، تُظهر دراسة الهياكل الأساسية الثلاث للعاكسات متعددة المستويات (CMU) أنه على الرغم من ان هذه العاكسات يمكنها تحويل توترات عالية بجودة ممتازة (THD منخفض بالنسبة للتيار والتوتر) ، الا انها تستخدم عددا كبير من المكونات و القواطع خاصة مع زيادة عدد المستويات. للتغلب على هذا القيد ، على مدار العقدين الماضيين ، تم تطوير طوبولوجيا عاكس جديد متعدد المستويات يعتمد في طريقة عمله على تقنية تبديل المكثف (OMNCC) و الذي يحتاج عدد مكونات و قواطع منخفض (RCN) مقارنة بالعاكس التقليدي. كما تتمثل الميزة الرئيسية لهذه العواكس المقترحة في تقليل عدد مصادر التيار الفردية اللازمة واستبدالها بالمكثفات.

في هذا البحث سنقوم بتحسين كفاءة هذا العاكس وذلك باقتراح استراتيجية جديدة تعتمد على تحديد القيم الأولية لزوايا الاشارات الخاصة بالتحكم بالمخارج باستعمال طريقة جنور الانتشار للتحسين (RTO) المعتمدة لحل أنظمة المعادلات غير الخطية. لاختبار كفاءة خوارزمية RTO تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج الماتلاب MATLAB كفاءة نظام التحكم للعاكس المقترح وجودة هذه التقنية الجديدة.

الكلمات المفتاحية: عاكس متعدد المستويات ذو مكثف تبديل OMNCC؛ طريقة جنور الانتشار للتحسين RTO ؛ نظام الكهروضوئية المتصل بالشبكة PV ؛ معدل التشويه التوافقي THD .

Table des matières

Remerciements	iii
Abstract	vi
Résumé	vii
Table des figures	xviii
Liste des tableaux	xix
Introduction Générale	1
CHAPITRE I : État de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques	8
1 Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques	8
1.1 Introduction	10
1.2 Développement des énergies renouvelables au monde	11
1.3 Développement des énergies renouvelables en l'Algérie	12
1.4 Modes d'exploitation des systèmes photovoltaïques	13
1.5 Architectures du système PV raccordé au réseau	18
1.6 Les composants constitutifs d'un système PV raccordé au réseau	24
1.7 Conclusion	48
CHAPITRE II : Différentes topologies des onduleurs multi- ni-	

Table des matières

veaux	51
2 Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux	51
2.1 Introduction	53
2.2 Les onduleurs multi-niveaux	54
2.3 Différents topologie des onduleurs multi-niveaux	58
2.4 Nouvelles topologies des onduleurs multi-niveaux	67
2.5 Les stratégies de commande des convertisseurs multi niveaux	81
2.6 Conclusion	92
CHAPITRE III : Nouvelle stratégie de minimiser les harmo- niques des onduleurs multi-niveaux	95
3 Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux	95
3.1 Introduction	97
3.2 Les harmoniques dans les réseaux électriques	98
3.3 Différentes techniques de minimiser les harmoniques	103
3.4 Nouvelle technique de Réduction des harmoniques	107
3.5 L'algorithme d'optimisation de RTO	109
3.6 Les stratégies de commande de notre système PV	115
3.7 Conclusion	132
CHAPITRE IV : Résultats de simulation de l'approche propo- sée	135
4 Résultats de simulation de l'approche proposée	135
4.1 Introduction	137
4.2 Dimensionnement du notre système PV	137
4.3 Résultats de simulation de système de commande	141
4.4 Discussions des résultats	168
4.5 Conclusion	171
Conclusion	172
Bibliographie	176

Nomenclature

Nomenclature

D	Rapport cyclique	(-)
i_a, i_b, i_c	Courants triphasé de réseau	(A)
R_p	Résistance parallèle de la cellule solaire	(Ω)
R_s	Résistance série de la cellule solaire	(Ω)
v_a, v_b, v_c	Tensions triphasé de réseau	(V)
ω_e	Pulsation électrique	(rad/s)
A_p	Amplitude de porteuse	(V)
C_{dc}	Condensateur du bus continu	(F)
f	fréquence fondamentale	(Hz)
f_p	fréquence de porteuse	(Hz)
I_{cc}	Courant de court-circuit de cellule PV	(A)
I_{ch}	Courant de la charge	(A)
I_{dc}	Courant du GPV en sortie de l'hacheur	(A)
I_{Id}	Courant d'axe d du réseau électrique	(A)
I_{Iq}	Courant d'axe q du réseau électrique	(A)
I_{op}	Courant optimale de cellule PV	(A)
I_{ph}	Courant de photo-généré de cellule PV	(A)
I_{pv}	Courant du générateur photovoltaïque	(A)

Nomenclature

I_{sa}	Courant de saturation de diode de cellule PV	(A)
N_p	Nombre de cellules en parallèle	(-)
N_s	Nombre de cellule en série	(-)
P	Puissance active du réseau	(W)
P_{ch}	Puissance de la charge	(W)
P_{pv}	Puissance du générateur photovoltaïque	(W)
P_{ref}	Puissance active de référence du réseau	(W)
Q	Puissance reactive du réseau	(W)
Q_{ref}	Puissance reactive de référence du réseau	(W)
T_s	Période de commutation	(s)
V_{co}	Tension de circuit ouvert de cellule PV	(V)
V_{dc-ref}	Tension de référence du bus continu	(V)
V_{th}	Tension thermique de cellule PV	(V)

Acronyms

$P\&O$	Perturbation et observation.
ADOP	Alternative Phase Opposition Disposition
CHB	Onduleur en pont H Cascade(Cascade H-Bridge : CHB)
DOP	Phase Opposition Disposition
FC	Condensateur Flottant (Flying Capacitors)
FFT	Fast Fourier Transformer
GPV	Générateur photovoltaïque
IPD	Inverted Phase Disposition
LS-PWM	MLI décalé en niveau
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
MLIS	Modulation de largeur d'impulsion sinusoidale
MPPT	Suivi du Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point Tracking)c

Nomenclature

NPC	Neutre Point Clamped
OCC	Onduleur à Condensateur Commuté
OMN	Onduleur Multi-Niveaux
ONNCC	Onduleur à Neuf Niveaux à Condensateur Commuté
PD	Phase Disposition
PI	Proportionnel-intégral
PLL	Boucle A Verrouillage De Phase
PS-PWM	MLI déphasé
PV	Photovoltaïque
Rc	Root continue
RLF	Régulateur par logique floue
Rn	Root Nearest
Rr	Root random
RTO	Rooted Tree Optimization
SPV	Système Photovoltaïque
THD	Total Harmonic Distortion
WD	Witness Degree

Table des figures

1.1	Évolution du coûts des modules photovoltaïques [46]	10
1.2	Prévisions de la croissance des énergies renouvelables dans le monde [54]	11
1.3	Pénétration des EnR dans la production nationale en TWh	12
1.4	Estimation de l'évolution du parc national de production électrique [56]	13
1.5	Le système de pompage photovoltaïque	15
1.6	Un système PV autonome avec stockage	16
1.7	Exemple de la structure d'un système PV hybride	17
1.8	Un système PV connecté au réseau	18
1.9	Configurations des onduleurs PV connectés au réseau [54]	19
1.10	Système PV raccordé au réseau grâce à un système de conversion de puissance	21
1.11	Structure à connexion simple à convertisseur unique	21
1.12	Structure à connexion simple avec transformateur	22
1.13	Structure avec un bus DC intermédiaire sans transformateur	23
1.14	Structure avec un bus DC intermédiaire et un transformateur	24
1.15	Différents architectures du système PV connecté au réseau électrique	24
1.16	Synoptique d'un système PV connecté au réseau de distribution électrique	25
1.17	Structure de base d'une cellule photovoltaïque	25
1.18	Model équivalent d'une cellule photovoltaïque : (a) avec une seule diode, (b) avec deux diodes	26
1.19	Exemple d'un panneau photovoltaïque	28
1.20	Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	30
1.21	Effet de la température sur la caractéristique I-V et P-V	31
1.22	Effet de la variation d'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V	31
1.23	Schéma d'un système PV adapté par un régulateur de puissance MPPT	32
1.24	Recherche du point de puissance maximale : a) Changement d'ensoleillement, b) Changement de la charge c) Changement du température	33

Table des figures

1.25 Schéma de principe des convertisseurs DC-DC couramment utilisés : (a) boost,(b) buck, (c) buck-boost, (d) Cuk et (e) Sepic	37
1.26 Développement du rapport de la tension d'après le type de convertisseur.	37
1.27 Schéma de raccordement du hacheur boost avec le générateur photovoltaïque	38
1.28 (a). Modèle énergétique du Boost, (b) Modèle équivalent de Boost pour calculer les pertes	39
1.29 Ratio de conversion de convertisseur Boost et son rendement en fonction du rapport cyclique	40
1.30 Exemples de multi niveaux DC/DC topologies : (a) de [124, 126], (b) de[128] , (c) de[129] et (d) de [130]	42
1.31 Les ondes de tensions d'un onduleur : (a) classique, (b) multi-niveaux ,c) tension du réseau	43
1.32 Un système PV connecté au réseau avec un onduleur à deux niveaux	44
1.33 Topologies des filtres passifs.	46
1.34 La relation entre la fréquence de commutation , les pertes de commutation et la taille d'inductance	47
2.1 Ondes de tension correspondantes à : (a) une entrée continue, (b) Onduleur deux niveaux, (c) Onduleur trois niveaux et (d) Onduleur multi niveau	55
2.2 Histogramme de l'évolution des composants de puissance	57
2.3 Classification des différents commutateurs de puissance	57
2.4 Différents topologies des onduleurs multi-niveaux conventionnels	58
2.5 Schéma de l'onduleur NPC triphasé à N niveaux	59
2.6 Interrupteur semi-conducteur " Transistor–Diode	60
2.7 Structure d'une phase d'un onduleur NPC à neuf niveaux	61
2.8 Structure d'onduleur triphasée à cinq niveaux à condensateurs flottants	63
2.9 Structure d'un onduleur triphasé à neuf niveaux en cascade	64
2.10 Comparaison des trois topologies conventionnelles	66
2.11 Classification des topologies d'onduleurs multi niveaux à condensateur commutée	70
2.12 Exemples des topologies des onduleurs multiniveaux à condensateurs commutés	71
2.13 La topologie du circuit de l'OMNCC proposé	73
2.14 (a) Unité de base de la cellule $C - C$ du série/parallèle conversion, (b) Mode de décharge du condensateur, (c) mode de charge du condensateur	74
2.15 Topologie d'une phase d'un l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté	77
2.16 Flux de courant : (a) premier niveau généré; (b) deuxième niveau généré (c) troisième niveau généré (d) quatrième niveau généré	79
2.17 Classification de la modulation de l'onduleur multi-niveaux niveaux	83

Table des figures

2.18	différents signaux de Porteuses : (a) triangulaire, (b) dents de scie , (c) sinusoïdale unipolaire, (d) sinusoïdale	85
2.19	Principe de la MLI triangulo-sinusoïdal à 8 porteuses	87
2.20	Modélisation MLI triangulo-sinusoïdal à 8 porteuses : (a)PD, (b)IPD, (c)POD, (d)APOD	88
2.21	Modulation MLI dents de scie -sinusoïdal à 8 porteuses : (a)PD, (b)IPD, (c)POD, (d)APOD	89
2.22	Représentation des vecteurs de tension de l'onduleur.	90
2.23	Représentation de modulation de niveau le plus proche	91
3.1	Représentation de l'effet d'un 3ème harmonique sur le courant de réseau à 50 Hz .	100
3.2	Représentation harmonique spectral d'un signal	101
3.3	Différents dispositions des porteuses triangulaires de MLI décalé au niveaux LS-PWM : (a)PD, (b)IPD, (c)POD, (d)APOD	105
3.4	(a) MLI décalé en niveau (LSPD-PWM) et (b) MLI déphasé (PS-PWM)	106
3.5	Les porteuses et le référence de MLI sinusoïdale proposé	108
3.6	Le comportement des racines des arbres lorsqu'elles recherchent de l'eau	110
3.7	L'organigramme de l'algorithme d'optimisation RTO pour caluler les optimaux angles initiaux	114
3.8	La structure d'un système PV raccordé au réseau grâce l'ONNCC	116
3.9	Schéma fonctionnel d'un contrôleur logique floue de la MPPT	118
3.10	Schéma fonctionnel d'un contrôleur logique floue de la MPPT	119
3.11	Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur MPPT flou . . .	121
3.12	La structure de commande de l'onduleur NNCC	123
3.13	Schéma synoptique du régulateur de tension V_{DC}	124
3.14	Le modèle du bus continu de notre système	124
3.15	Le modèle du bus continu de notre système	125
3.16	Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie.	126
3.17	Structure classique d'une PLL triphasée	127
3.18	Schéma symbolique d'un réseau triphasé	128
3.19	Commande du courant de l'axe -d- par le régulateur FLC	131
3.20	Fonctions d'appartenance des régulteurs flou des courantes	131
4.1	Structure d'un système PV couplé au réseau électrique	138
4.2	Variation du niveaux d'irradiation	140
4.3	Variation du niveaux d'irradiation	140
4.4	Circuit de puissance et de commande de notre système PV	141

Table des figures

4.5	La puissance maximale de générateur photovoltaïque	142
4.6	Evolution de différents puissances de notre système	142
4.7	La tension de bus continu de l'entrée du l'onduleur neuf niveaux à CC	143
4.8	Onduleur neuf niveaux en cascade lié à une générateur PV	145
4.9	La tension V_a de l'onduleur en cascade à neuf niveaux et sa FFT	146
4.10	Onduleur neuf niveaux à condensateur commute lié à une générateur PV	146
4.11	Les tensions des condensateurs commutés de l' ONNCC V_{C1} , V_{C2} et V_{C3}	147
4.12	La tension V_a de l'onduleur neuf niveaux à CC et sa FFT	147
4.13	Le schéma d'un filtre LC triphasé	149
4.14	La tension de phase a d'un ONNCC avant et après le filtrage	150
4.15	Les tensions triphasés V_a, V_b, V_c de l'onduleur neuf niveaux à CC	150
4.16	Le courant direct de réseau I_d	151
4.17	Le courant quadrature de réseau I_q	151
4.18	L'allure des courants : de l'onduleur, de la charge et du réseau	152
4.19	Le cas où la puissance de GPV injecter totalement au réseau	153
4.21	La tension et le courant du réseau sont maintenus en phase	153
4.20	le cas où la puissance du générateur supérieure à la puissance demandée	154
4.22	Le cas où le réseau couvre l'insuffisance de la puissance PV	154
4.23	La tension et le courant en opposition de phase ;(le réseau alimenter la charge)	155
4.24	L'énergie photovoltaïque produite dirigé totalement à la charge	155
4.25	Schéma de commande d'un ONNCC par la technique RTO-MLI	156
4.26	Schéma de commande de douze interrupteurs de l' ONNCC par la technique RTO-MLI	157
4.27	Courbes de convergence du RTO pour la fonction de fitness	158
4.28	Degré d'humidité du RTO	159
4.29	Angles initiaux optimaux de chaque génération	159
4.30	Les signaux des porteuses selon les angles optimaux calculés par l'RTO	160
4.31	Les signaux de différents interrupteurs	161
4.32	Le courant direct de réseau I_d	162
4.33	Le courant quadrature de réseau I_q	162
4.34	Le courant du réseau de phase 'a'	163
4.35	Les courants triphasés du réseau I_a , I_b , I_c .	163
4.36	Spectres harmoniques de la tension de sortie du OMNCC avec : (a) PI et $PD - MLIS$, (b) Fl et $PD - MLIS$ (c) PI et $RTO - MLIS$ et (d) FL et $RTO - MLIS$	164
4.37	Spectres des harmoniques du courant de réseau : (a) PI et $PD - MLIS$, (b) Fl et $PD - MLIS$ (c) PI et $RTO - MLIS$ et (d) FL et $RTO - MLIS$	165

Table des figures

4.38 La tension de sortie de l'onduleur neuf niveaux en cascade et sa FFT	167
4.39 Le courant injecté au réseau et sa FFT dans le cas d'utiliser l'ONN-CHB	167

Liste des tableaux

1.1	Caractéristique des montages de différents convertisseurs DC/DC	38
2.1	Étude comparative du nombre de composants des onduleurs OMN	66
2.2	États des commutateurs et des condensateurs.	77
2.3	Comparaison de différentes topologies d'un onduleur à neuf niveaux	80
3.1	Table des règles de décision floues.	121
4.1	Paramètres du système proposé	139
4.2	Comparaison entre les deux topologies d'onduleur à neuf niveaux	148
4.3	Paramètres de l'algorithme RTO	157
4.4	Les fitness des racines optimaux	158
4.5	Comparaison de THD entre différentes techniques MLI selon le type du contrôle du courant utilisé	166
4.6	Comparaison entre différentes technique MLI dans la littérature	168

"L'échec est simplement l'occasion de recommencer, cette fois plus intelligemment"

Henry Ford

Introduction Générale

Introduction Générale

Contexte général

La croissance de la demande énergétique mondiale a conduit à une forte consommation de combustibles fossiles ; ainsi, l'environnement a été négativement affecté en raison d'une forte concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Par conséquent, les ressources énergétiques renouvelables ont attiré l'attention et le développement en générant une énergie électrique efficace avec une pollution presque nulle[1]. En effet, la production d'énergie renouvelable (REG) a été largement reconnue comme la solution clé à la crise énergétique et la pollution de l'environnement, l'électronique de puissance joue ici un rôle important[2]. En dehors de la quantité totale de rayonnement solaire émis par le soleil, plus de 100 000 TW atteignent la surface de la Terre après réflexion et absorption [3]. Cette quantité d'énergie gratuite a le potentiel de faire de l'énergie solaire un contributeur important aux sources d'énergie renouvelables. Par conséquence, la capacité photovoltaïque installée dans le monde affichant un taux de croissance très élevé, environ 30-40 % par an[4].

Les systèmes photovoltaïques (PV) connectés au réseau sont l'un des systèmes de conversion d'énergie renouvelable à la croissance plus rapidement développés au monde où environ 75% des systèmes photovoltaïques installés dans le monde sont connectés au réseau. En effet, une augmentation au total de 500% entre 2004 et 2008 (de 2 à 12 GW de capacité installée)[5]. La principale raison de ce développement remarquable est la réduction des coûts des modules

Introduction

photovoltaïques et l'introduction d'incitations économiques ou de subventions en raison des préoccupations environnementales croissantes. Les grands parcs solaires photovoltaïques atteignent la gamme des mégawatts et continueront de croître en taille et en quantité dans les décennies à venir[6].

Dans le système PV connecté au réseau, on s'intéresse de plus en plus aux topologies d'onduleurs photovoltaïques qui fournissant du courant alternatif au consommateur en une forme d'onde sinusoïdale peut synchroniser avec le réseau électrique [7]. En outre, le convertisseur DC-AC permet de stabiliser la tension du bus DC à une valeur donnée, car la tension de sortie du générateur photovoltaïque varie en fonction de la température, de l'irradiance et de l'effet du MPPT (suivi du point de puissance maximale) [8, 9]. En effet, l'émergence et le développement de nouveaux dispositifs contrôlables à l'ouverture et à la fermeture tels que les GTO et les IGBT ont permis le développement de nouveaux convertisseurs puissants, rapides et fiables.[10, 11, 12].

Par conséquent, on peut envisager d'utiliser un convertisseur plus efficace tel qu'un convertisseur multiniveaux[13, 14]. Le concept multi niveaux est utilisé pour diminuer la distorsion harmonique dans la forme d'onde de sortie sans diminuer la puissance de sortie de l'onduleur [15, 16]. Le convertisseur à plusieurs niveaux ouvre la voie au progrès technologique de conversion de l'énergie électrique[17], ainsi que les applications à haute puissance non seulement pour les performances, mais aussi pour les conceptions à moyenne et faible puissance comme celle qu'ils proposent. Il présente les avantages d'une faible distorsion harmonique et d'un rendement élevé par rapport au convertisseur classique à 2 niveaux[18].

Les onduleurs multi-niveaux sont en faveur du milieu universitaire ainsi que de l'industrie au cours de la dernière décennie pour les applications haute puissance et moyenne tension [19, 20]. De plus, ils peuvent synthétiser des formes d'onde commutées avec des niveaux de distorsion harmonique inférieurs à ceux d'un convertisseur à deux niveaux [21, 22]. Une série d'opérations de commutation bien déterminées (généralement une modulation de largeur d'impulsion) peut être utilisée pour obtenir un signal alternatif de la fréquence souhaitée.[23, 24].

Des nombreuses topologies ont été fondées dans la littérature au cours des vingt dernières années pour les applications aux systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux[25, 26] à savoir l'onduleur à point neutre (Neutral Point Clamped NPC), du condensateur flottants (Flying

Introduction

Capacitors FC) [27] et de topologie en pont en H en cascade (Cascade H-Bridge CHB)[28].

Ils sont maintenant considérés comme les topologies multi niveaux traditionnelles. Les limites de ces OMN sont un plus grand nombre des composants, plusieurs tensions d'entrée et souffrent de problèmes d'équilibrage de l'auto-tension des condensateurs , des problèmes d'équilibrage de tension CC et une complexité de contrôle pour des niveaux accrus lors l'énergie PV injecté dans le réseau. Par conséquent, il convient d'améliorer le gain du convertisseur DC/DC boost avec un taux de conversion plus élevé [29, 30] ou de créer une topologie particulière pour les onduleurs multi niveaux qui ont moins de composants et utilise une tension continue plus faible[31]. Une autre branche des OMN pour remédier ces contraintes est l'onduleur à condensateur commuté (OMCC)[32, 33, 34]. Il combine les fonctions d'amplification de tension et de produire plusieurs niveaux de tension auto-équilibrés en courant alternatif grâce à une seule source DC [35]. Dans ces topologies, le remplacement des sources CC par des condensateurs peut entraîner une diminution du nombre de sources CC nécessaires et une baisse du coût total du système[36].

En général, l'augmentation de la tension nécessite l'utilisation de transformateurs, qui augmentent la taille et le volume du système, [37]. Les topologies à condensateur commuté (Switched Capacitor en Anglais) sont la solution alternative de base [38]. Ils peuvent augmenter la tension de sortie par connexion série / parallèle des condensateurs qui ne nécessite aucun transformateur[39, 40].

De plus, dans ce travail, nous allons améliorer l'efficacité de cet onduleur en appliquant une nouvelle stratégie de commande basée sur le calcul optimal des angles initiaux du signaux porteuses pour contrôler divers commutateurs à semi-conducteurs pour but de réduire les harmoniques et améliorer la qualité d'énergie du côté charge du système solaire raccordé au réseau. Une nouvelle méthode appelée Rooted Tree Optimization (RTO)[41] est proposée comme technique d'optimisation pour résoudre un système contient des équations non linéaires afin de déterminer le meilleur angle initial pour la porteuse d'un signale de contrôle de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté pour obtenir une minimum valeur de THD .

Objectifs et méthodologies

Ce travail porte sur l'étude d'onduleurs multi-niveaux à condensateur commuté pour les systèmes PV afin de motiver et de guider la société à se concentrer sur l'invention d'un onduleur multi-niveau efficace et économique à partir d'une seule source DC qui possède les capacités combinées de ces convertisseurs rapportés dans la littérature pour l'amélioration de la qualité de l'énergie injecté au un réseau électrique et permet à la fois l'augmentation du gain de la tension de la sortie de l'onduleur . Divers objectifs sont visés pour cette thèse :

- Augmenter les performances des onduleurs multi-niveaux raccordés aux réseaux.
- Améliorer le gain de la tension de l'onduleur multi-niveaux.
- Réduire le volume de filtre.
- Réduction de nombre des composants et des sources continues utilisées
- Diminuer le coût et le volume global du système PV.
- Améliorer la dynamique et la qualité de l'énergie fournie au réseau électrique.

ça prend :

- Modélisation des différents éléments du système.
- Conception d'une commande MPPT optimale pour extraire le maximum de puissance du générateur PV
- Déterminer la taille du filtre selon les exigences de connexions de la norme.
- Régulation du bus continu qui représente la tension d'entrée de l'onduleur multi-niveaux pour bien synchroniser le système PV avec le réseau.
- Choix d'une stratégie de contrôle des interrupteurs appropriée pour réguler le courant injecté au réseau.

Organisation de la thèse

Cette thèse, dont le titre réel est : "Contribution à l'étude des onduleurs triphasés à neuf niveaux connectés aux convertisseurs DC-DC élévateurs multiniveaux dans les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux électriques", est composée de 4 chapitres visant à atteindre les objectifs suivants :

Introduction

Le premier chapitre se concentre sur la contribution des systèmes photovoltaïques connectés au réseau, l'état de l'art des différents composants constitutifs et les diverses architectures du système de conversion DC-AC et une brève présentation des différentes liaisons entre les générateurs photovoltaïques et les réseaux que nous donnent les différents modes du système photovoltaïque.

Nous traitons dans le deuxième chapitre l'état de l'art des convertisseurs DC-AC multi-niveaux : les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux classiques aux systèmes photovoltaïques. Ainsi, nous nous concentrerons sur la recherche et la modélisation de nouvelles topologies des onduleurs multiniveaux à condensateurs commutés connectés aux systèmes photovoltaïques qui ils permettent d'augmenter la qualité d'énergie délivrée par le générateur photovoltaïque à le réseau avec moins de composants (semi-conducteurs et condensateurs) et de résoudre simultanément les problèmes d'encombrement et de commande des onduleurs conventionnelles.

Le chapitre trois explique les lois des commandes de notre système et décrit une nouvelle stratégie de contrôle de l'onduleur multi-niveaux déposé sur une méthode d'optimisation inspiré de la nature qui appelle en anglais : Rooted Tree Optimisation RTO [41] afin de rechercher sur les angles initiaux des porteuses de la technique modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale MLIS pour commander les interrupteurs d'onduleurs multi-niveaux à condensateur commuté.

Le dernier chapitre décrit le modèle et le fonctionnement de notre système PV associé à un réseau électrique grâce à un onduleur triphasé neuf niveaux à condensateur commuté. L'application de l'approche proposée est consacrée à la technique d'optimisation RTO, elle est effectuée sous la plate-forme de MATLAB. Les simulations des différents étages sont présentés et les résultats obtenus sont discutés et commentés.

Enfin, des conclusions générales sont tirées et des idées des perspectives suite à cette étude sont proposées pour l'avenir.

CHAPITRE I : État de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

« *L'important en science
n'est pas d'obtenir de nou-
veaux faits, mais de découvrir
de nouvelles façons de penser
à ces faits.* »

William Bragg

1

Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

Sommaire

1.1	Introduction	10
1.2	Développement des énergies renouvelables au monde	11
1.3	Développement des énergies renouvelables en l'Algérie	12
1.4	Modes d'exploitation des systèmes photovoltaïques	13
1.4.1	Le système PV autonome	14
1.4.2	Le mode hybride	16
1.4.3	Le mode raccordée au réseau	17

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

1.5	Architectures du système PV raccordé au réseau	18
1.5.1	Architecture selon la configuration d'association des onduleurs	18
1.5.2	Architecture selon l'interface de conversion de puissance	20
1.5.3	Structure de système PV connecter au réseau avec un bus CC intermédiaire	22
1.6	Les composants constitutifs d'un système PV raccordé au réseau	24
1.6.1	Les générateurs photovoltaïques	25
1.6.2	La technique de L' MPPT d'un générateur PV	32
1.6.3	État de l'art des convertisseurs DC/DC pour les SPV	35
1.6.4	État de l'art des convertisseurs <i>DC/AC</i> pour les systèmes PV	42
1.6.5	Les filtres passifs dans les systèmes photovoltaïques couplés au réseau	46
1.7	Conclusion	48

1.1 Introduction

le problème de la pénurie d'énergie devient de plus en plus aggravant avec le développement d'industrie, les ressources fossiles s'épuisent et ne peuvent répondre aux besoins énergétiques à long terme [42]. Par conséquence, les énergies renouvelables présentent une grande opportunité, elles sont inépuisables dont constituent une bonne alternative aux énergies fossiles [43, 44]. Sur les dernières années, la chute des prix mondiaux des modules photovoltaïques influence directement sur le développement technologie des systèmes photovoltaïques (PV) où les coûts d'investissement ont diminué d'en moyenne 32 %. Par conséquence, l'énergie solaire photovoltaïque couvrira 10 à 30 % de la demande mondiale d'énergie entre 2030 et 2050. [45]. La figure ci-dessous représente l'évolution du prix de gros des modules PV a l'échelle mondiale. Ces données fournies par l'Association Européenne Industrie Photovoltaïque [46]. En effet, la réduction continue des coûts et les incitations gouvernementales contribuent à rendre la technologie photovoltaïque plus largement disponible et les parcs solaires peuvent être atteignent la gamme des mégawatts et continueront de croître en taille et en quantité dans les décennies à venir [5, 47, 48, 49].

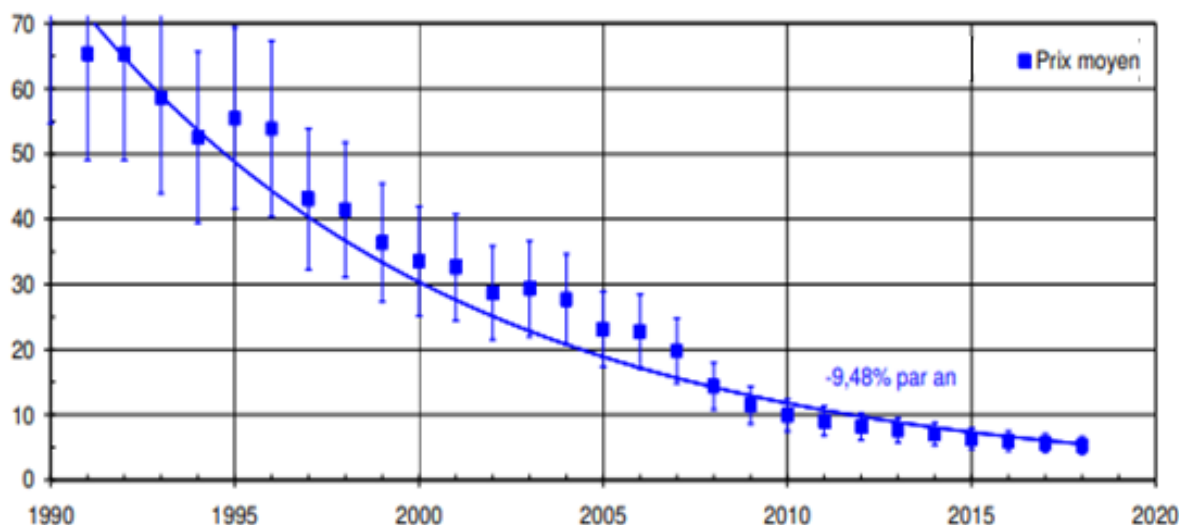


FIGURE 1.1 – Évolution du coûts des modules photovoltaïques [46]

L'évolution de développement de l'électronique de puissance permet de réaliser une production d'énergie photovoltaïque très efficace, le raccordement au réseau est le plus demandé sur le marché photovoltaïque. En outre, il ne s'appuie pas sur des dispositifs de stockage d'énergie,

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

ce qui permet un coût réduit avec moins d'entretien[48]. Actuellement, plusieurs des travaux sont réalisés sur les systèmes PV raccordés aux réseaux pour but d'améliorer l'efficacité électrique des panneaux PV et de diminuer dans les installations photovoltaïque les pertes d'énergies [50, 51, 52]. Dans ce chapitre, on va présenter les différents architectures et l'état de l'art des éléments constitutifs d'un système PV raccordé au réseau.

1.2 Développement des énergies renouvelables au monde

Selon une étude et un rapport du Conseil européen des énergies renouvelables à travers [53], Il est probable que l'énergie solaire jouera un rôle important dans la combinaison d'énergies renouvelables à l'avenir. Actuellement, le photovoltaïque (PV) est l'une des technologies d'énergie renouvelable à la croissance la plus rapide, avec plus de 80 pays qui le déploient dans le monde [48]. La Figure 1.2 compare l'évolution de production attendue entre diverses sources d'énergie renouvelable.

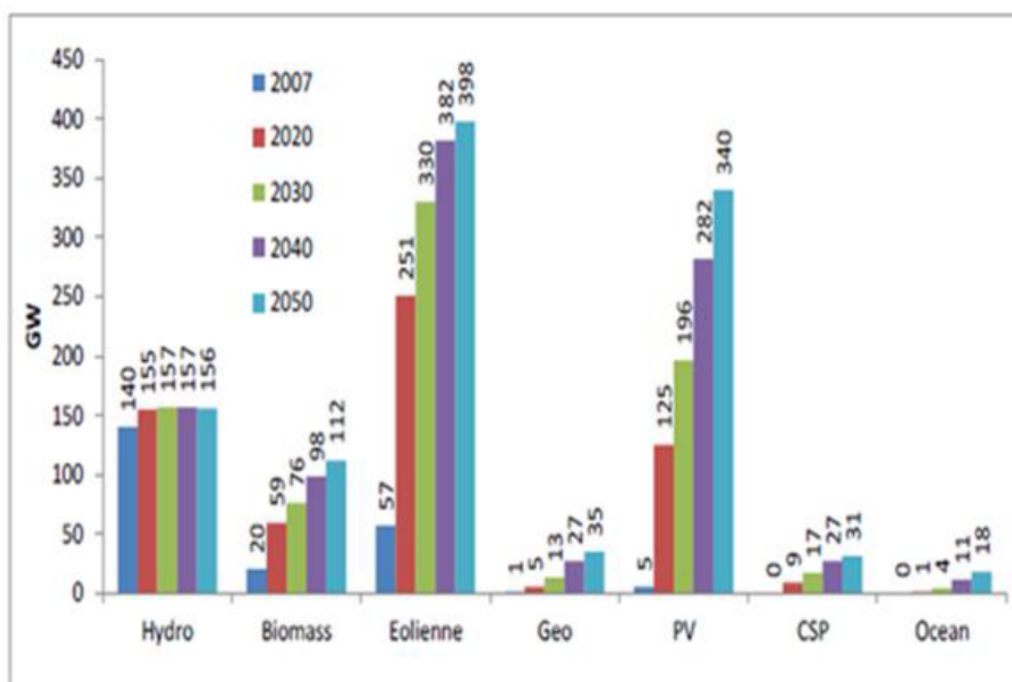


FIGURE 1.2 – Prévisions de la croissance des énergies renouvelables dans le monde [54]

Cette figure représente selon une estimation que les énergies générées à partir de systèmes

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

photovoltaïques et éoliens ont le plus de potentiel et de dynamique. Ainsi, d'ici 2050, 48 % du système électrique sera solaire et éolien, en raison de la forte baisse du coût des technologies éolienne, solaire et des batteries [54].

1.3 Développement des énergies renouvelables en l'Algérie

En 2011, le premier plan national en Algérie consacré au développement et à la promotion de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables (PNEREE). L'objectif était d'atteindre 40 % de la capacité de production d'énergie renouvelable d'ici 2030, comme le montre la figure cidessous 1.3 [55, 56].

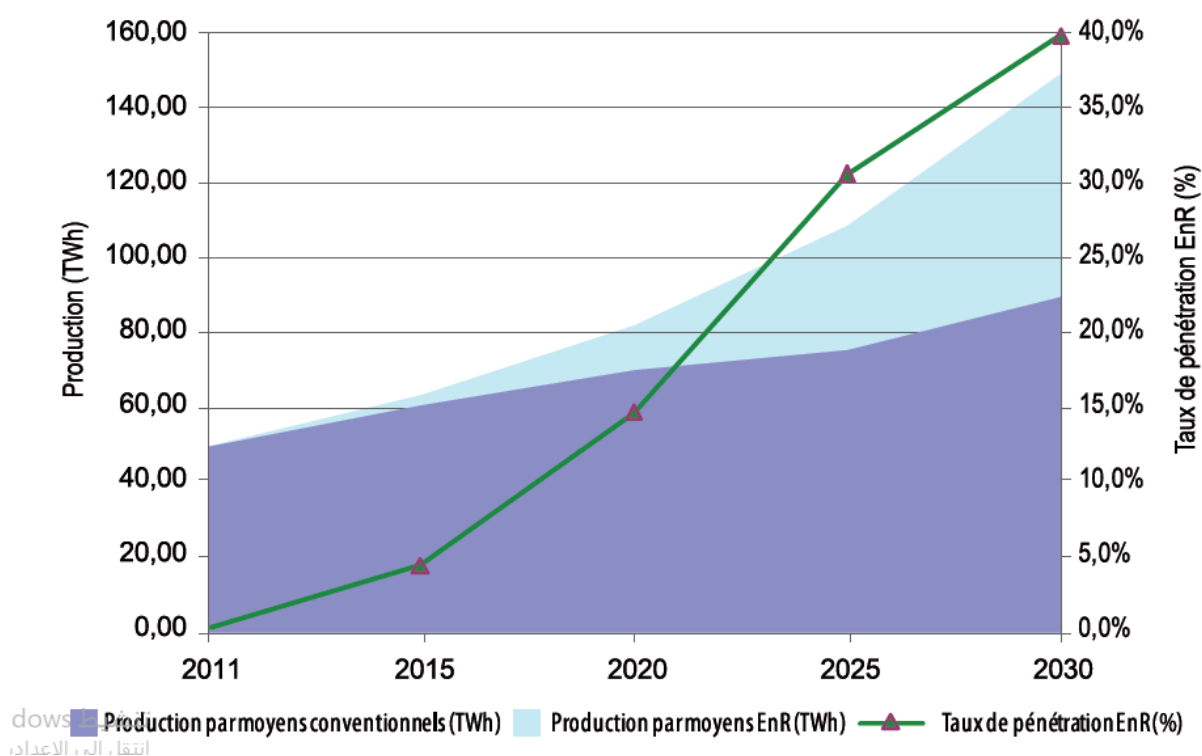


FIGURE 1.3 – Pénétration des EnR dans la production nationale en TWh

Le pays possède le "plus grand" réservoir solaire potentiel du monde, estimé à 3000 heures par an en moyenne. Ce potentiel solaire équivaut à "37 milliards de mètres cubes de gaz naturel, soit 10 grands gisements de gaz" [57]. L'énorme potentiel de l'énergie solaire motive ce

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

choix stratégique. Cette source d'énergie est l'épine dorsale du programme, qui constitue une part importante du solaire thermique et du solaire photovoltaïque. En Algérie, l'utilisation de sources d'énergie propres et renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire est devenue une alternative importante aux combustibles fossiles comme illustre la figure 1.4). D'ici 2030, l'énergie solaire représentera plus de 37 pourcent de la production d'électricité du pays. Bien que le potentiel soit assez faible, ce plan n'exclut pas l'éolien, deuxième axe de développement dont la part devrait représenter environ 3% de la production d'électricité [58].

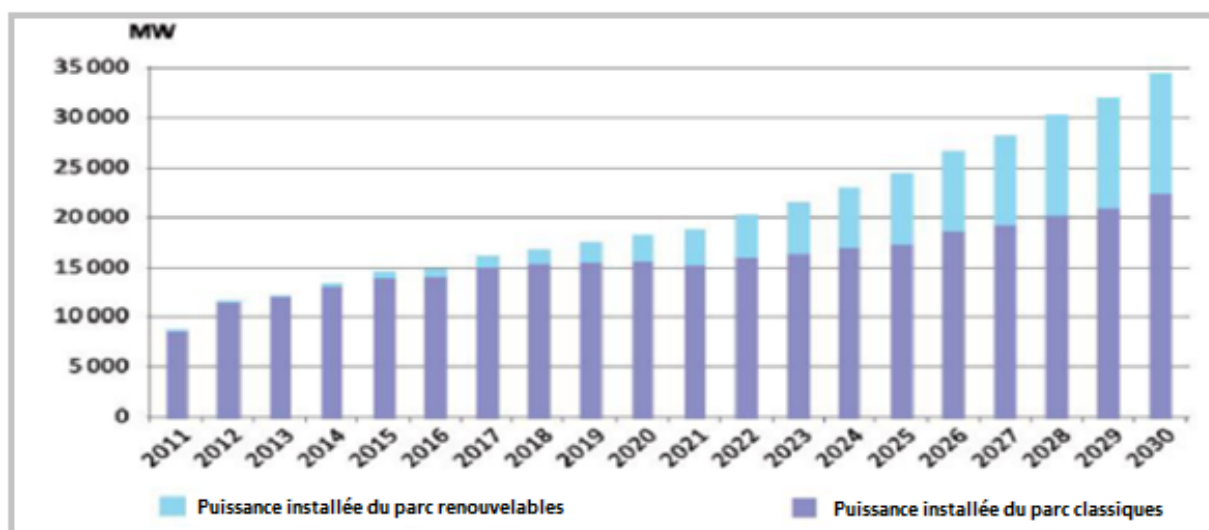


FIGURE 1.4 – Estimation de l'évolution du parc national de production électrique [56]

L'introduction des énergies renouvelables en Algérie peut se faire en intégrant de nouvelles centrales de production basées sur les énergies renouvelables ou en développant le système énergétique national (production, transport, distribution, etc.) comme suit [59] :

- L'électrification rurale complète par l'installation des centrales d'énergie renouvelable dans les zones reculées.
- Un hybridation de centrales diesel existantes ou nouvelles avec des systèmes photovoltaïques ou des éoliennes, selon le site et la puissance.

1.4 Modes d'exploitation des systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque se compose absolument d'un panneau photovoltaïque, d'une interface de puissance et d'une charge. Cependant, les systèmes photovoltaïques qui combinent

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

ces composants ont des modes de fonctionnement différents, ils appartiennent à trois catégories distinctes en fonction des exigences : systèmes hybrides, raccordés au réseau et autonomes.[27, 2, 60].

1.4.1 Le système PV autonome

Aujourd'hui, l'industrie photovoltaïque repose principalement sur la nécessité de fournir une alimentation électrique fiable et peu coûteuse aux zones isolées. Le photovoltaïque est la solution la plus rentable pour de nombreuses applications [61]. Le générateur photovoltaïque est la seule source d'énergie électrique pour alimenter les récepteurs en mode autonome[62, 63]. Ce mode est utilisé lorsqu'aucun réseau n'est disponible ou que le fonctionnement du récepteur repose uniquement sur la lumière du soleil [64, 65]. Parmi ces applications : les sites de télécommunications militaires et de services publics éloignés, les pompes à eau des fermes, les campus universitaires ou les stations d'appel d'urgence sur autoroute. Pour les endroits loin des centrales conventionnels, des systèmes autonomes d'alimentation en d'énergie photovoltaïque ont été considérés comme une meilleure alternative[66, 67, 68]. Récemment, le chercheur **Cuong** en [69] a recherché l'amélioration des chaînes qui convertissent l'énergie solaire en énergie autonome pour alimenter des endroits isolés. Il est présenté les avantages et les inconvénients de ce type d'installation photovoltaïque. Il y a deux types de systèmes autonome selon les besoins des consommateurs :

1.4.1.1 Système autonome sans batterie

Ce sort de système n'a pas besoin de stockage d'électricité car l'énergie produite par les des cellules photovoltaïques sous un faible éclairage est suffisante (ex : calculatrice, lampe), soit le fonctionnement de la charge n'est pas critique en temps. Ainsi, des nombreuses personnes dans les zones rurales sont confrontées à de gros problèmes en raison du manque d'eau donc, lorsque le réseau électrique n'est pas disponible, les pompes photovoltaïques (PV) sont la solution idéale pour l'approvisionnement en eau[70, 71]. La figure suivante montre un exemple d'un pompe solaire dont le stockage de l'eau au réservoir pour la période de l'absence de soleil [72].

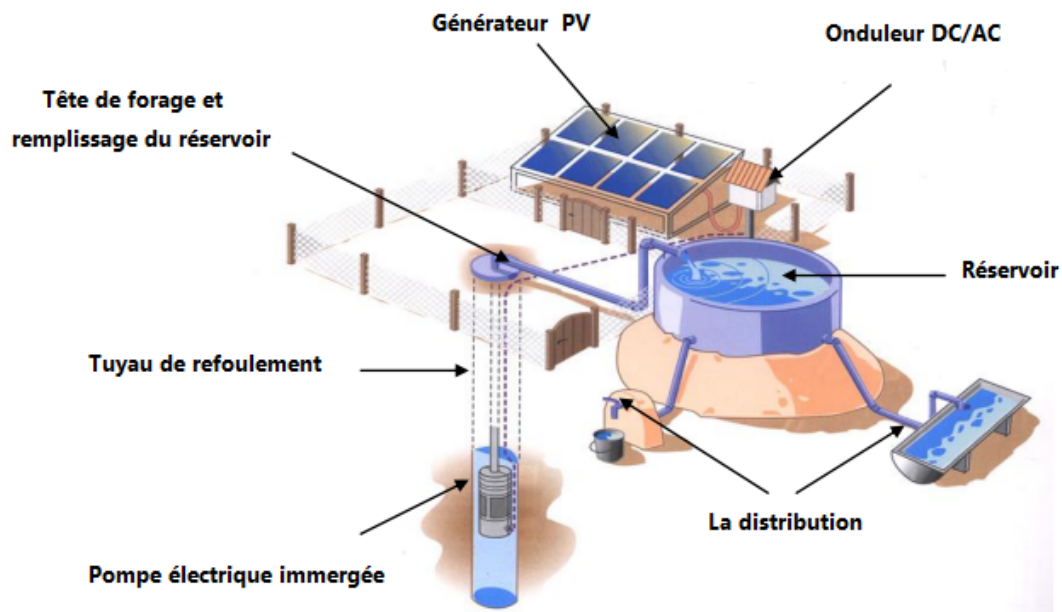


FIGURE 1.5 – Le système de pompage photovoltaïque

1.4.1.2 Système autonome avec batterie

Le fait que l'énergie solaire soit intermittente est l'un de ses principaux inconvénients. Pour une utilisation permanente, une partie de l'énergie générée doit être stockée [73]. C'est le système photovoltaïque le plus connu dont l'électricité (figure 1.6) peut alors être utilisée en tout temps [74]. Par conséquent, ce système peut s'appliquer à une variété de domaines comme : domotique, médical, transport, relevé de sites de catastrophes naturelles ou industrie, migrations animales, écologie [75].

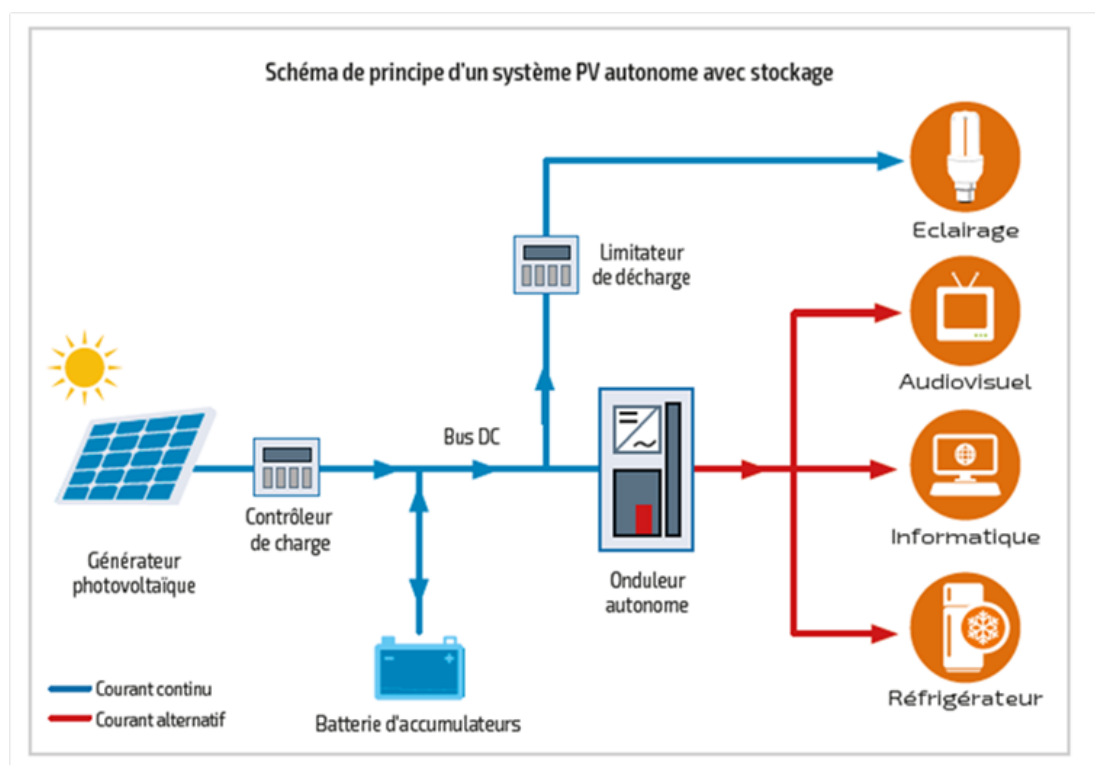


FIGURE 1.6 – Un système PV autonome avec stockage

1.4.2 Le mode hybride

En raison de leurs caractéristiques variables aléatoirement, les sources d'énergie renouvelable telles que le photovoltaïque et l'éolien sont aléatoires. Ils ne produisent pas une puissance constante [76]. En effet, l'énergie solaire est très dépendante de l'irradiance et de la température de l'air dans la région. Ces variables sont affectées négativement sur le réseau électrique [15, 77]. Un système énergétique hybride (SEH) est un système qui combine différentes technologies pour produire de l'énergie électrique : sources conventionnelles et renouvelables pour combiner les avantages de chaque système et atteindre un rendement énergétique plus élevé dans son ensemble [78, 79, 80]. Par conséquent, les générateurs PV peuvent également être combinés avec d'autres sources d'énergie (figure 1.7) telles que les éoliennes et les petites centrales hydroélectriques, s'il existe une complémentarité de production [44, 81]. Ce type de système est particulièrement adapté aux locations éloignées où il est crucial d'avoir de l'électricité à tout instant dont les coûts de transport du carburant sont élevés et l'utilisation du système photovoltaïque seul avec les batteries

n'est pas encore rentable[81].

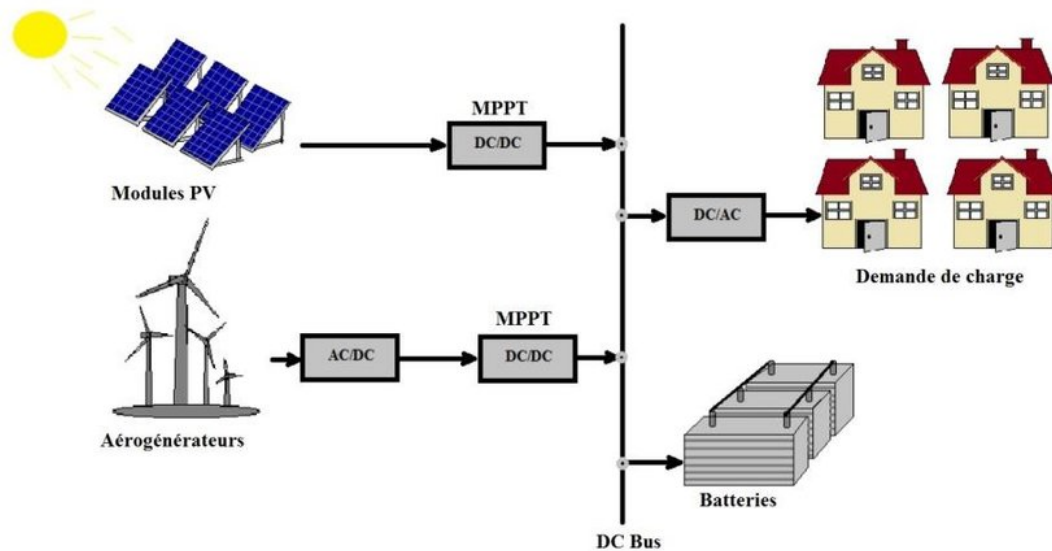


FIGURE 1.7 – Exemple de la structure d'un système PV hybride

1.4.3 Le mode raccordée au réseau

Dans ces systèmes, l'énergie générée par les modules PV est directement injectée dans le réseau [48, 43, 2, 68]. Alors, le réseau est utilisé comme une source en appoint à la production PV lorsque cette énergie n'est pas suffisante pour couvrir la demande énergétique. Le système photovoltaïque raccordé au réseau est muni d'un onduleur avec une commande électronique appropriée pour garantir que l'énergie photovoltaïque générée est adaptée à la fréquence et à l'amplitude du réseau électrique [27] (le couplage au réseau) comme le montre la figure 1.8 :

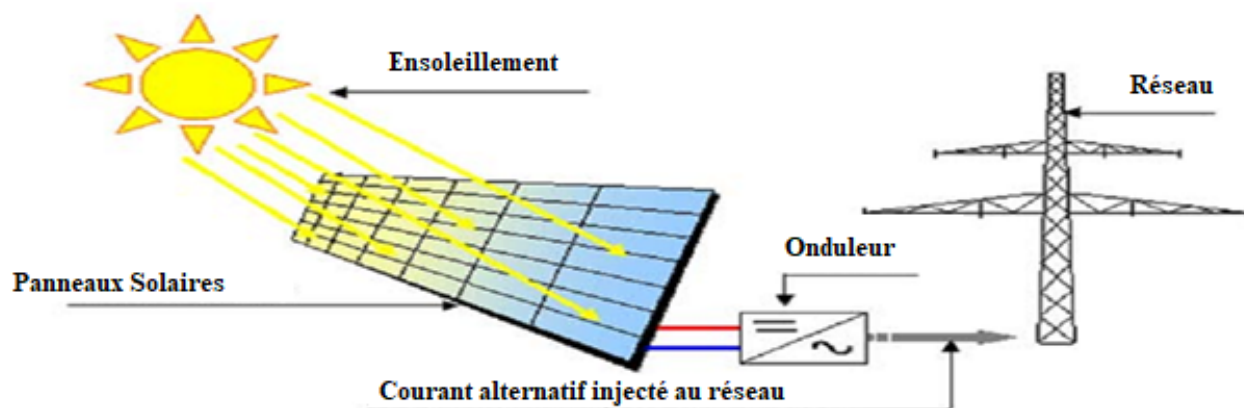


FIGURE 1.8 – Un système PV connecté au réseau

1.5 Architectures du système PV raccordé au réseau

La littérature a largement étudié les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux électriques. spécialement dans les travaux de [50, 56, 2, 63, 78, 41, 82]. L'onduleur est l'unité de base d'un système raccordé au réseau de distribution électrique. Cela est dû au fait qu'il permet de convertir le courant continu produit par le générateur photovoltaïque en courant alternatif qui est injecté dans le réseau.

1.5.1 Architecture selon la configuration d'association des onduleurs

Actuellement, il existe trois principaux types d'associations de modules aux onduleurs comme indiqué à la Figure 1.9 :

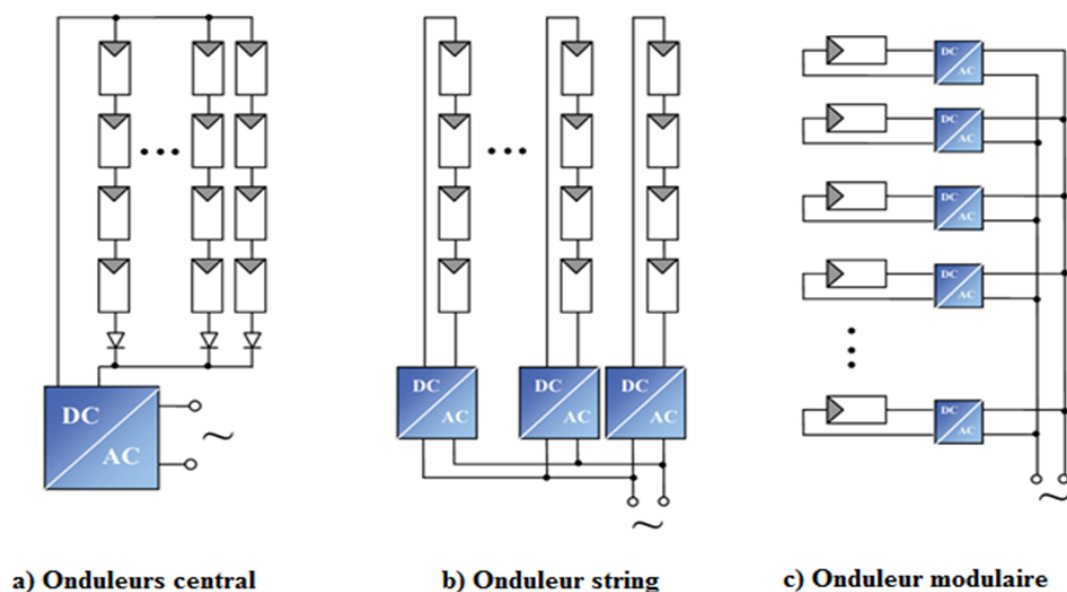


FIGURE 1.9 – Configurations des onduleurs PV connectés au réseau [54]

Nous décrivons brièvement leurs propriétés ci-dessous :

1.5.1.1 Installation avec un onduleur unique (onduleur central)

Le système centralisé contient un seul onduleur qui est dimensionné à partir de la puissance nécessaire de la charge. Le générateur photovoltaïque dans ce type d'installation est composé des modules du même type de construction ayant la même exposition. Cette installation est plutôt adaptée aux petites installations. Ainsi, le convertisseur DC/DC centralisé exécute un algorithme MPPT unique pour toutes les chaînes. La présence d'un seul onduleur présente des avantages économiques en réduisant les coûts d'investissement et d'entretien (figure 1.9.a). Cependant, une panne d'onduleur peut entraîner une perte de production pour l'ensemble du système [54].

1.5.1.2 Installation avec un onduleur pour chaque string (onduleur string)

Le système string qui relie plusieurs onduleurs à une série de modules (figure 1.9.b). Cette solution est requise lorsque plusieurs champs de modules sont placés à différents endroits. Il est destiné aux centrales de grande puissance (environ MW). De plus, l'étage dc-dc peut effectuer un MPPT individuel pour chaque chaîne permet d'améliorer la puissance de sortie par rapport à la topologie centralisée. Cela augmente l'efficacité et la fiabilité de l'ensemble de l'installation

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

globale[54, 2, 83]. De plus, la panne d'un onduleur n'implique pas une perte de production de l'ensemble du système (comme dans le cas d'un onduleur individuel), mais uniquement du sous-réseau correspondant.

1.5.1.3 Installation multi-onduleurs (Onduleur modulaire)

Selon ce nom, tout module solaire possède un onduleur individuel. Dans les grands parcs de production PV, tous les onduleurs sont connectés en parallèle du côté AC. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité des modules[83]. [82]. Cette configuration permet également l'avantage d'atténuer les problèmes liés à l'ombrage et aux différentes expositions des modules, ainsi que les problèmes liés à l'utilisation de différents modules[54]. Par conséquent, la topologie modulaire est considérée comme la solution de pointe, malgré le coût initial plus élevé et la complexité accrue de contrôle et de mise en œuvre introduite par les étages de convertisseur CC-CC supplémentaires[21, 69].

1.5.2 Architecture selon l'interface de conversion de puissance

L'interface d'électronique de puissance permet de fournir une surveillance fiable du réseau et de protéger contre les pannes de réseau et la coupure l'alimentation en cas de problèmes au sein du réseau ou de l'installation PV. Un seul onduleur peut être configuré dans les structures de connexion simples ou les structures avec le bus DC intermédiaire qui contient des convertisseurs DC/DC et des onduleurs [69, 6].

Nous avons présenté quelques architectures classiques des systèmes raccordés aux Réseaux avec des onduleurs conventionnels :

1.5.2.1 Structure à convertisseur unique

Le générateur photovoltaïque GPV, l'onduleur de tension, le filtre passif et le réseau de distribution font partie de cette structure. La particularité de cette structure est que le GPV est obtenu en combinant plusieurs modules en série afin d'obtenir une tension DC suffisante à l'entrée de l'onduleur car il n'y a pas d'un étage amplificateur de tension. Dans cette configuration, l'onduleur doit assurer toutes les fonctions (MPPT, conversion, anti-îlotage...) nécessaires à

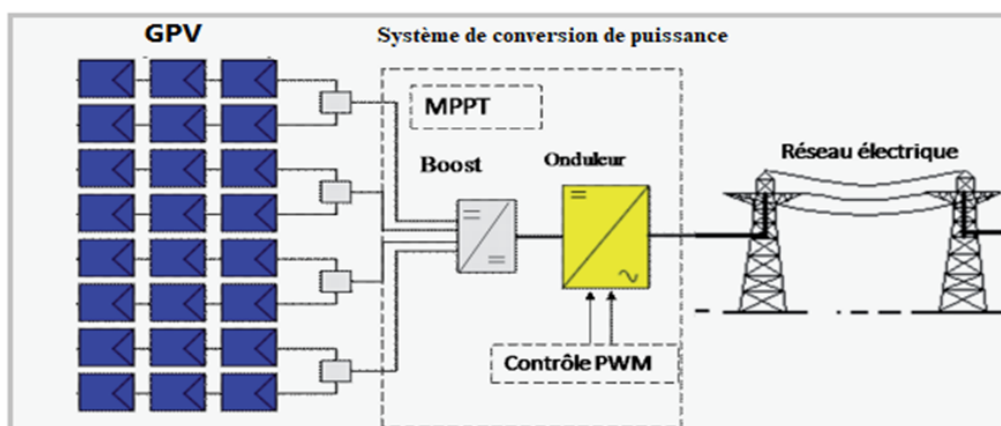


FIGURE 1.10 – Système PV raccordé au réseau grâce à un système de conversion de puissance

l'application photovoltaïque connectée au réseau[84].

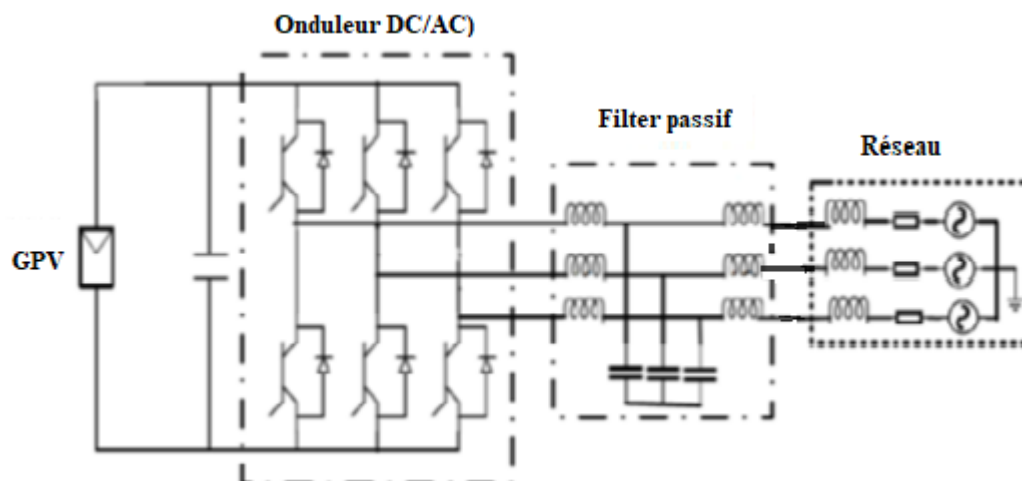


FIGURE 1.11 – Structure à connexion simple à convertisseur unique

1.5.2.2 Structure à connexion simple avec transformateur

L'insertion d'un transformateur après l'onduleur est parfois nécessaire pour assurer une isolation galvanique de l'onduleur contre les perturbations des réseaux. Dans certains pays, comme USA, l'isolation galvanique de l'onduleur est toujours requise dans les systèmes connectés au réseau [54]. Par conséquent, il faut adapter la taille de ce transformateur afin de transmettre la puissance au réseau. Il est donc une source d'encombrement et des pertes[27].

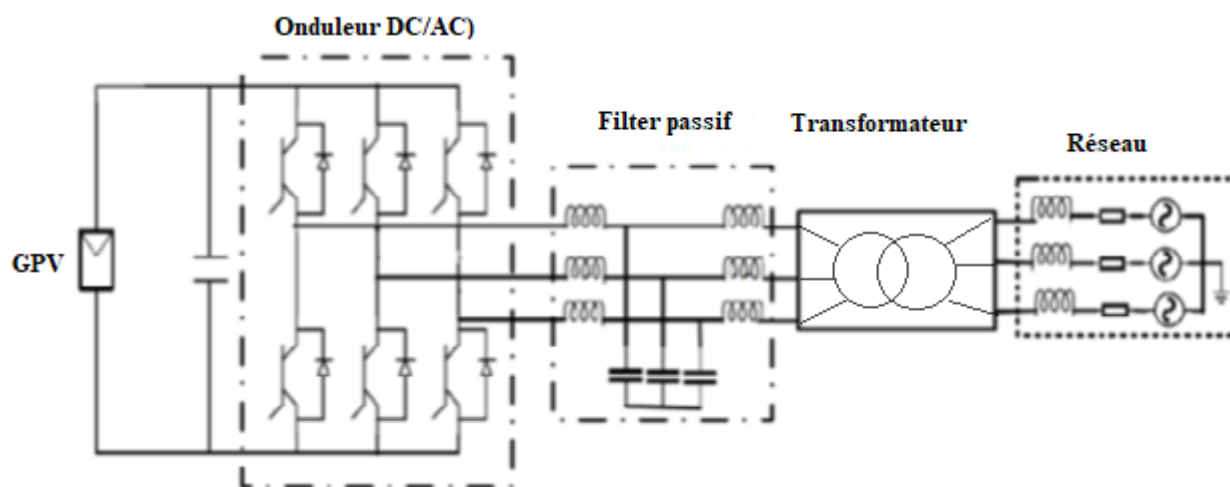


FIGURE 1.12 – Structure à connexion simple avec transformateur

Donc, le rendement est réduit relativement par rapport aux structures sans transformateur [82]. En effet, une étude a été réalisée en [27] confirme que dans les mêmes caractéristiques du système, le rendement d'un système sans transformateur peut augmenter par 2% à celui d'un système avec transformateur.

1.5.3 Structure de système PV connecter au réseau avec un bus CC intermédiaire

La sortie de convertisseur DC/DC qui représente le bus intermédiaire d'une installation raccorsé au réseau et il est peut être un hacheur survolteur (Boost) , hacheur dévolteur (Buck) ou survolteur dévolteur (buck –boost) [42] selon les les exigences de système. Cependant, le convertisseur Boost est couramment utilisé à cause de sa simplicité d'une part et le rapport d'élévation en tension permet d'obtenir de meilleurs rendements d'autre part[53, 54]. Il existe deux configuration avec et sans transformateur :

1.5.3.1 Structure avec un bus CC intermédiaire sans transformateur

La plupart des systèmes PV sont composés d'un générateur photovoltaïque, un hacheur DC/DC, un onduleur de tension DC/AC et d'un filtre passif pour le répondre de requirements de raccordement au réseau. La Figure 1.13 représente cette structure avec un bus CC intermédiaire

est un Boost[84].

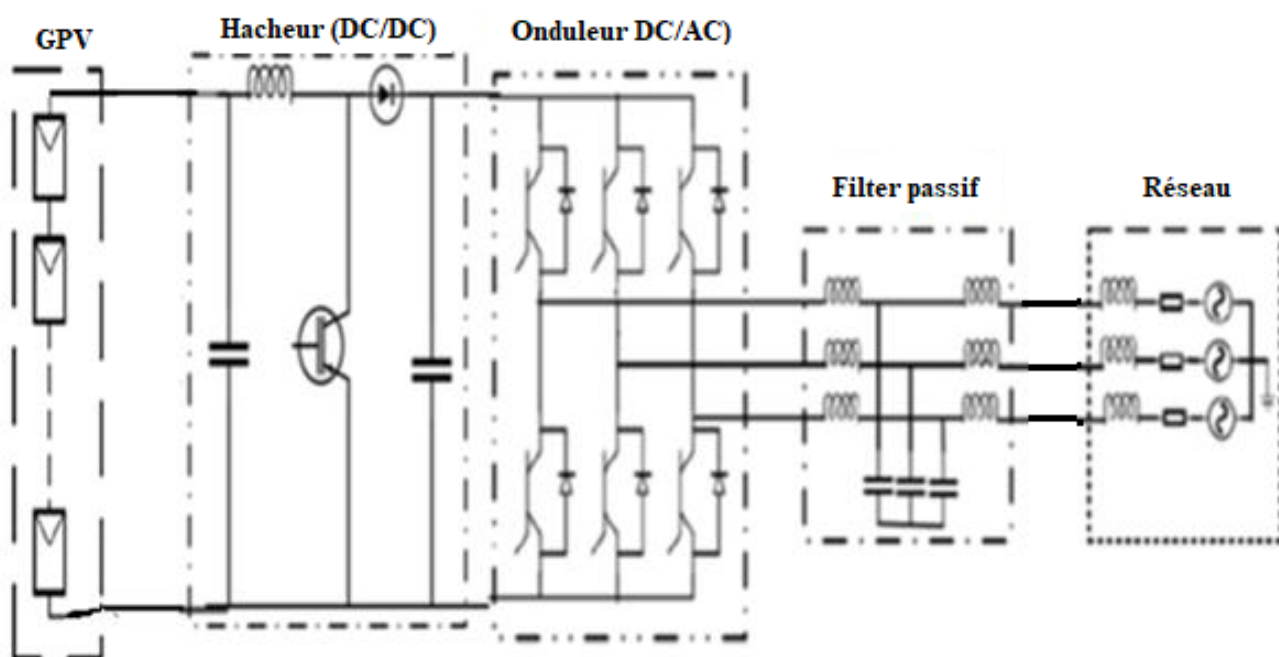


FIGURE 1.13 – Structure avec un bus DC intermédiaire sans transformateur

1.5.3.2 Structure avec un bus CC intermédiaire et transformateur

Cette structure comporte un bus CC intermédiaire à côté du générateur GPV et un transformateur à côté du réseau comme montre la figure 1.14 :

Cette structure a l'avantage de la sécurité des personnes, mais elle est moins performante que la structure simple sans transformateur (90 à 92% vs 92,5 à 94%) [42, 55].

La Figure 1.15 est inspirée des travaux de [51, 53, 58], résumant les différentes configurations possibles d'onduleurs PV reliés au réseau électrique.

La topologie de l'onduleur avec un bus CC intermédiaire sans transformateur semble convenir à notre système car le rendement est un critère important pour notre application. Cette structure est très populaire dans le système PV connecté au réseau en raison de sa simplicité, de sa petite taille, de son poids, de son coût et de son efficacité.

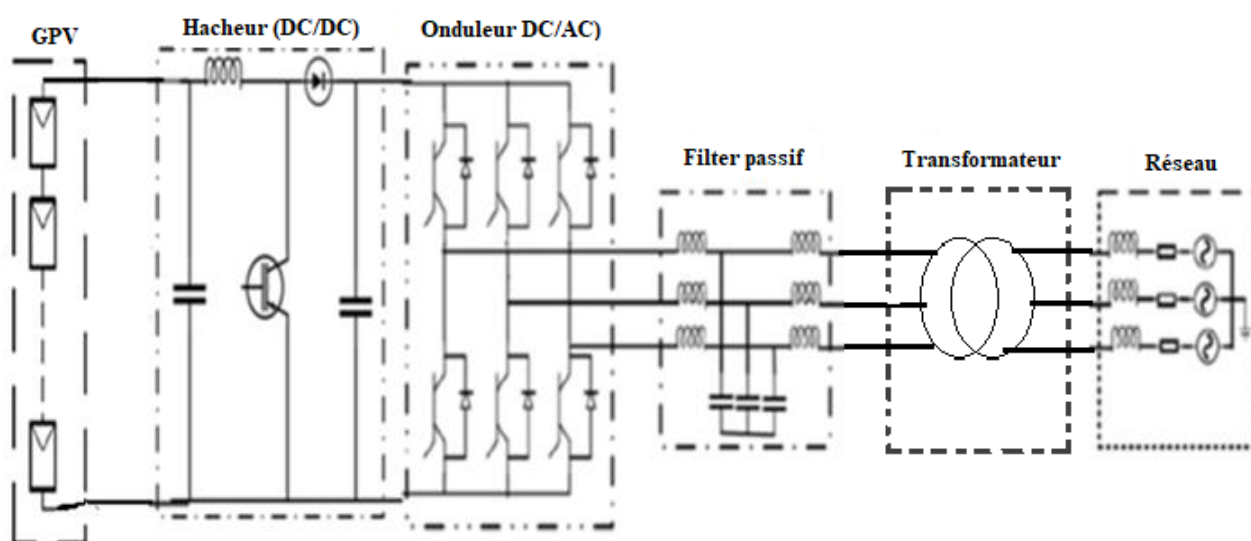


FIGURE 1.14 – Structure avec un bus DC intermédiaire et un transformateur

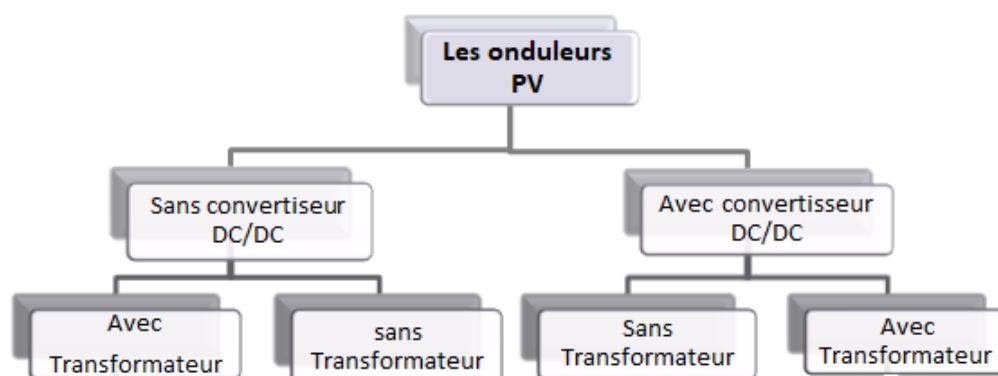


FIGURE 1.15 – Différents architectures du système PV connecté au réseau électrique

1.6 Les composants constitutifs d'un système PV raccordé au réseau

Un système photovoltaïque (PV) raccordé au réseau se compose d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur continu/continu (CC) permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximale MPPT, un onduleur CC/AC permettant d'alimenter les charges alternatives ou les réseaux électriques, un filtre passif pour but d'éliminer les harmoniques produites par la commutations des semi-conducteurs des onduleurs.

Dans la Figure 1.16, nous présentons le synoptique du système PV connecté au réseau

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

de distribution électrique, on considère la structure avec un bus CC intermédiaire et sans transformateur.

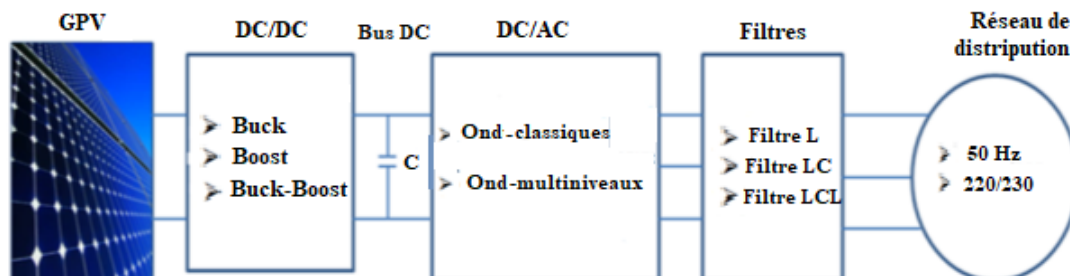


FIGURE 1.16 – Synoptique d'un système PV connecté au réseau de distribution électrique

1.6.1 Les générateurs photovoltaïques

1.6.1.1 Les cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est une unité de base de générateur PV qui est composée d'un matériau semi-conducteur sensible aux longueurs d'ondes visibles et permet de convertir l'énergie de rayonnement photonique reçue du soleil à sa surface en une tension électrique, qui est créée par le mouvement des électrons dans ce matériau comme montre la figure 1.17 :

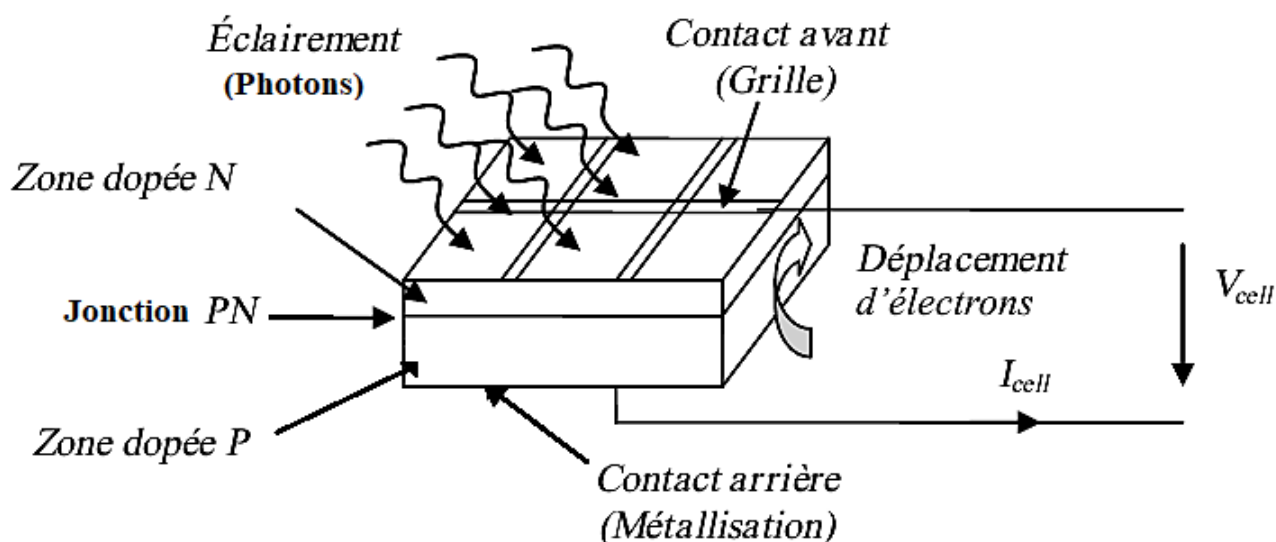


FIGURE 1.17 – Structure de base d'une cellule photovoltaïque

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

Les semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs) constituent les cellules photovoltaïques. Comme le silicium est abondant dans la nature, il est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer des cellules photovoltaïques. Il se présente naturellement sous la forme de pierre de silice. Le dioxyde de silicium, un composé chimique de la silice, est un minéral de formule SiO_2 . Il est la principale composante des roches sédimentaires détritiques, telles que le sable et le grès. [48, 78].

1.6.1.2 Modèle mathématique d'un module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est un groupe de cellules installées dans un panneau, qui sont connectées en série, en parallèle ou en combinaison selon le besoin de consommateur. Il existe un modèle générique de circuit équivalent pour représenter les cellules PV [1]. Il comporte d'une source de courant idéale représente le courant photonique I_{ph} par PV, qui est proportionnelle à l'irradiation solaire branchée avec une ou deux diodes en parallèle et avec une résistance série et une résistance shunt comme indiqué dans la Figure 1.18.

Les propriétés de semi-conducteur de la cellule sont décrites par la première diode D_1 , tandis que la seconde diode D_2 modélise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge. [85]. La résistance R_s représente les pertes liées aux contacts et aux connexions, tandis que les courants de fuite dans la diode sont traduits par la résistance parallèle R_{sh} [78].

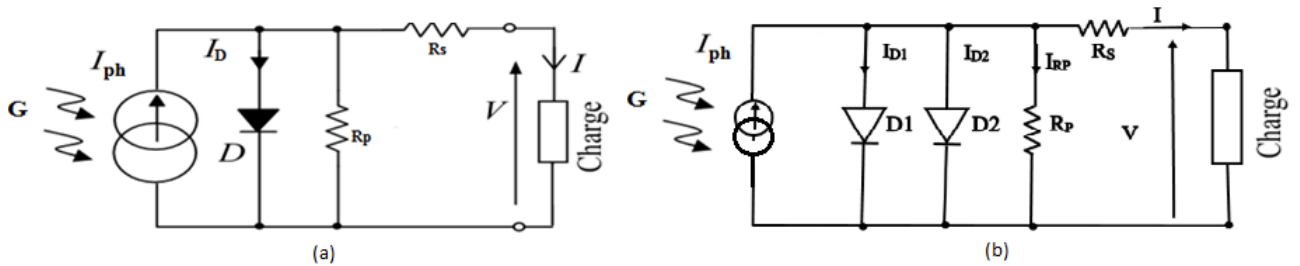


FIGURE 1.18 – Model équivalent d'une cellule photovoltaïque : (a) avec une seule diode, (b) avec deux diodes

Le courant généré par une cellule solaire éclairée s'écrit [85] :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1.1)$$

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

Où : [1] I_{pv} : Le courant de sortie de générateur PV.

I_{ph} : Le courant photo-généré.

I_d : le courant traversant la diode.

I_p : le courant de traversant la résistance shunt.

Selon l'équation des diodes de Shockley, I_d peut s'écrire :

$$I_d = I_{sa} \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (1.2)$$

et

$$I_p = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (1.3)$$

donc :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{sa} \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}\right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (1.4)$$

Avec :

I_{sa} : Le courant de saturation.

En général, pour les cellules cristallines, la résistance parallèle d'une cellule de type cristallin est très grande et peut être considérée comme une valeur infinie, donc :

$$\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \rightarrow 0 \quad (1.5)$$

Alors, le modèle est réduit à quatre paramètres ($I_{ph}, I_{sa}, R_s, V_{th}$) dont la tension thermique V_{th} et le courant de saturation I_{sa} sont déterminés par ces équations :

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_s I_{op} - V_{co}}{\log\left(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}}\right)} \quad (1.6)$$

$$I_{sa} = (I_{cc} - I_{op}) \exp\left[-\frac{V_{op} + R_s I_{pv}}{V_{th}}\right] \quad (1.7)$$

où :

I_{cc} est l'intensité de court-circuit.

V_{co} est la tension de circuit ouvert.

I_{op} est le Courant de point de puissance optimale.

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

V_{op} est la tension de point de puissance optimale.

Aussi I_{ph} le courant photo générer représente le courant de court circuit I_{cc} du module photovoltaïque; ce paramètre est sensible à l'irradiance.

D'autre part, la V_{co} est la valeur maximale de la tension qu'une cellule solaire peut atteindre à courant nul[1].

Pour un générateur de N_P modules en parallèles et N_S modules en séries (Figure 1.19) on a [86, 87] :

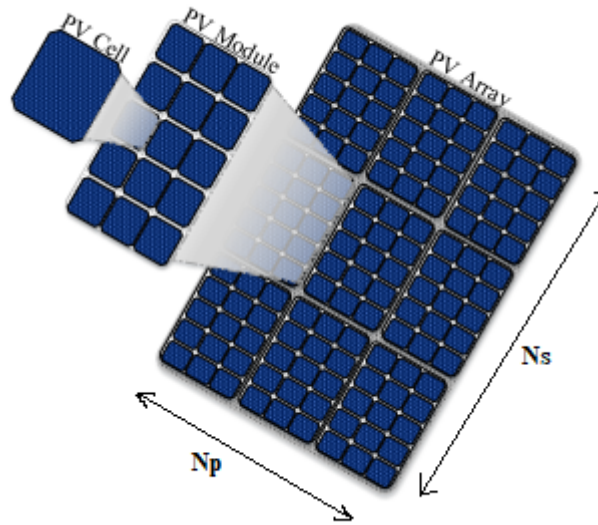


FIGURE 1.19 – Exemple d'un panneau photovoltaïque

$$\begin{cases} I_{cc} = N_P I_{cc(m)} \\ I_{op} = N_P I_{op(m)} \\ V_{co} = N_S V_{co(m)} \\ V_{op} = N_S V_{op(m)} \\ V_{th} = N_S V_{th(m)} \end{cases} \quad (1.8)$$

L'indice m est indiqué au module photovoltaïque.

Donc, le courant délivré par ce générateur est donnée par l'équation suivante :

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_{sa} \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + R_{sg} I_{pv}}{N_s V_{th}} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_{sg} I_{pv}}{R_{pg}} \quad (1.9)$$

Avec :

$$R_{sg} = \frac{N_s R_s}{N_p}$$

$$R_{pg} = \frac{N_p R_p}{N_s}$$

Aussi, le courant et la tension de sortie d'un champ photovoltaïque sont [88] :

$$V_g = \sum_{i=1}^{N_s} V_i = V_1 + V_2 + V_3 + \dots .. + V_{N_s} \quad (1.10)$$

$$I_g = \sum_{i=1}^{N_p} I_i = I_1 + I_2 + I_3 + \dots I_{N_p} \quad (1.11)$$

La puissance de sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_g = \sum_{i=1}^{N_s} V_i \sum_{i=1}^{N_p} I_i = (V_1 + V_2 + V_3 + \dots .. + V_{N_s})(I_1 + I_2 + I_3 + \dots I_{N_p}) \quad (1.12)$$

1.6.1.3 Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque

Pour tracer les caractéristiques du courant-tension I-V non linéaire d'un panneau photovoltaïque, trois points de mesure en conditions standards (1000 W/m², 25°C)[78] :

1. Point de court-circuit (I_{cc} , 0). Il s'agit de la valeur maximale du courant d' une cellule PV.
2. Point de circuit ouvert (0, V_{co}). Elle représente la tension maximale d'une cellule photovoltaïque.
3. Le point optimal (I_{op} ,V_{op}) est le point de fonctionnement maximale où le module fournit la puissance maximale (PPM) dissipée dans une charge résistive

La température joue un rôle crucial dans le fonctionnement des cellules solaires. Le courant augmente d'environ 0,025 mA/cm²/C° lorsque la température augmente et la tension diminue de 2,2 mV/C°/cellule . Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ 0,4% /C°. Donc, lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque, cette influence devra être prise en compte. [66].

De la même manière que la température, la jonction PN réagit différemment en fonction de l'énergie qu'elle reçoit. Elle produit plus d'énergie lumineuse lorsqu'elle en reçoit. Pour une

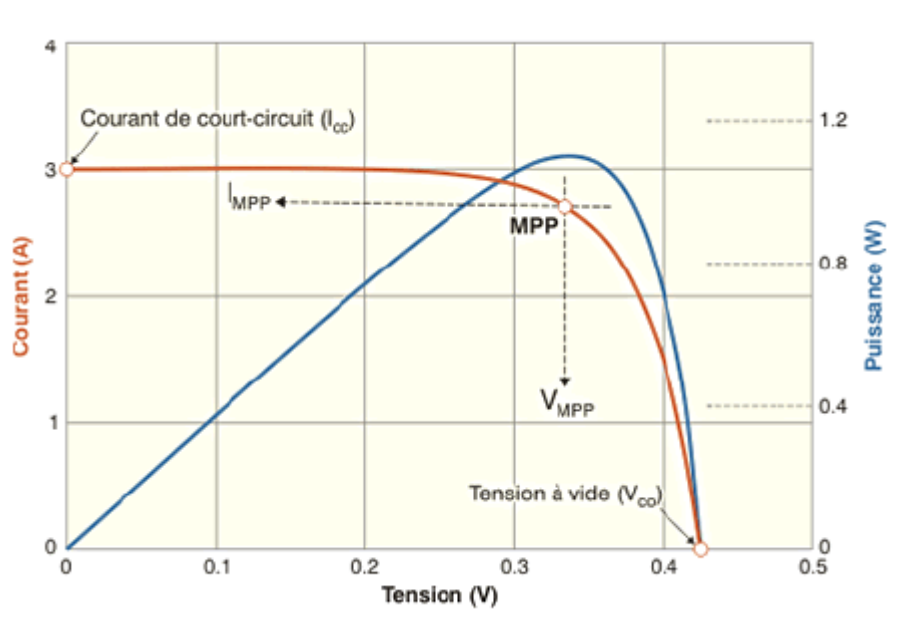


FIGURE 1.20 – Caractéristique d'une cellule photovoltaïque installation photovoltaïque, une variation de 50 % de la charge ou de l'éclairement induit une dégradation de la puissance du générateur photovoltaïque d'environ 50 %. [89]. Pour des différents niveaux d'éclairements et de températures, on trouve [62] :

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (1.13)$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{G}{G_r} \right) \Delta T + \left(\frac{G}{G_r} - 1 \right) I_{cc} \quad (1.14)$$

$$\Delta V = -\beta \cdot \Delta T - R_s \Delta I \quad (1.15)$$

Donc :

$$V = V_r + \Delta V \quad (1.16)$$

$$I = I_r + \Delta I \quad (1.17)$$

Sur la figure 1.21, nous reportons les caractéristiques de **ENIESOLAR-75** pour différentes températures, sous un ensoleillement donné ($E = 1000 \text{ W/m}^2$) [90] : Cependant, la figure 1.22 montre les caractéristiques électriques du module pour divers valeurs d'éclairement et de température constante de 25°C .

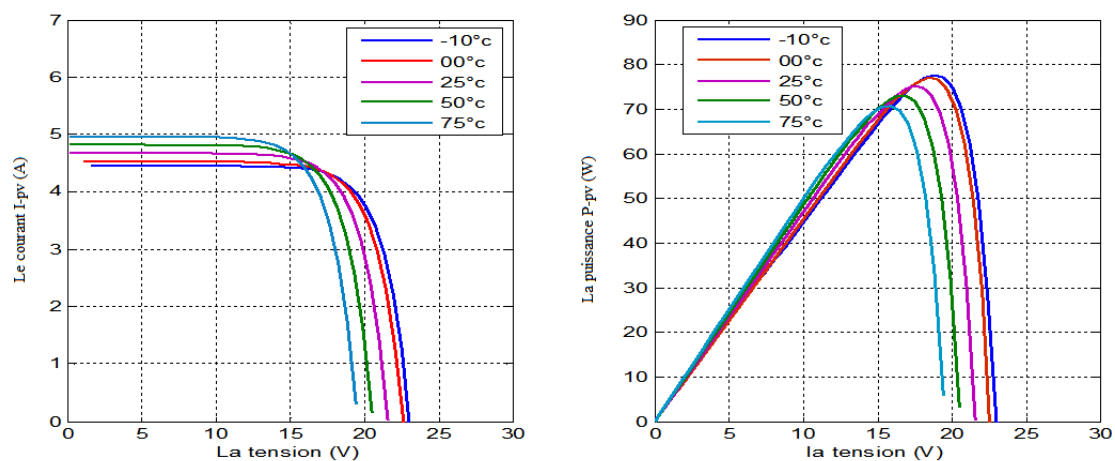


FIGURE 1.21 – Effet de la température sur la caractéristique I-V et P-V

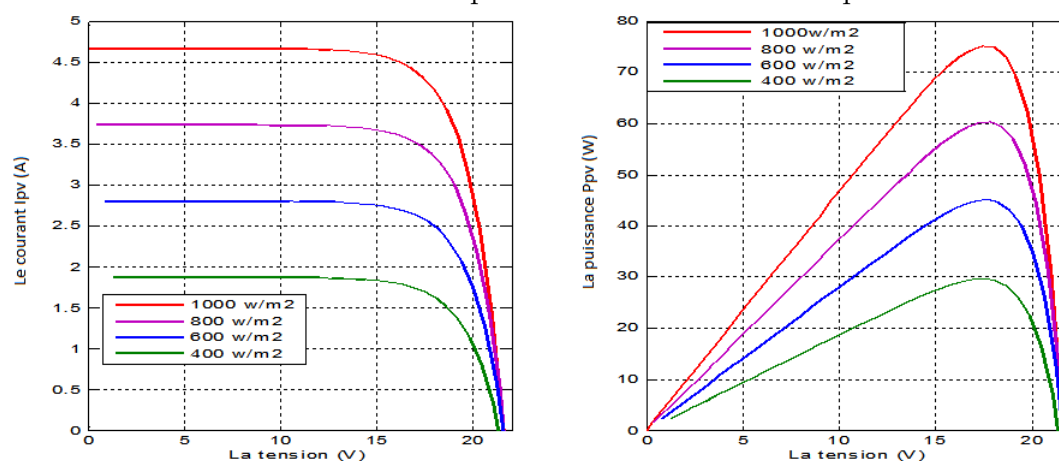


FIGURE 1.22 – Effet de la variation d'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V

Après ces caractéristiques, nous pouvons remarqués que [87] :

1. Lors de l'augmentation de la température, en remarque une importance variations au niveau de la tension et une petite accroissement du courant au point de puissance maximale sur le comportement global de la cellule.
2. Le courant produit (I_{ph}) et la puissance maximal (P_m) sont pratiquement proportionnels au flux lumineux (ϕ).
3. La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement aux bornes de la jonction PN lors de la diminution importante de l'éclairement.

1.6.2 La technique de L' MPPT d'un générateur PV

1.6.2.1 Principe de fonctionnement de l'MPPT

Les propriétés électriques des cellules solaires étant fortement non linéaires et fortement dépendantes des conditions météorologiques. Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes de production d'énergie photovoltaïque, leur commande nécessite l'utilisation d'une phase d'adaptation de puissance combinées à des techniques de suivi du point de puissance maximale (PPM) [29]. La phase d'adaptation représente un convertisseur DC/DC qu' est contrôlé à une façon bien déterminer. Donc, la commande MPPT est basé sur la variation automatique du rapport cyclique de l'interrupteur K de ce convertisseur , à une valeur approprié pour extraire la puissance maximale du générateur photovoltaïque [91]. La figure1.23 représente un schéma fonctionnel d'un système PV adapté par le contrôleur MPPT

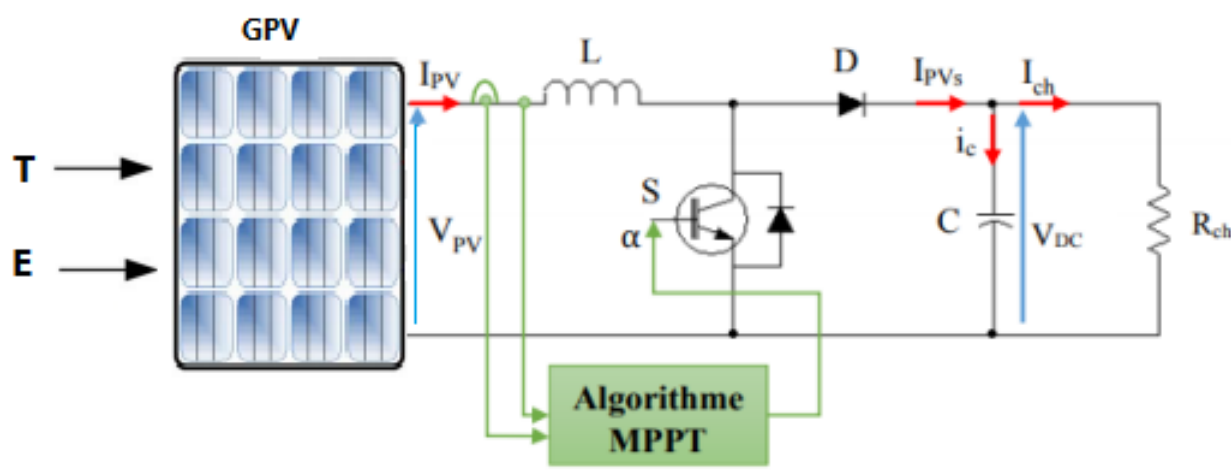


FIGURE 1.23 – Schéma d'un système PV adapté par un régulateur de puissance MPPT

Les techniques de contrôle de l'MPPT consistent à agir automatiquement le générateur à sa valeur de fonctionnement optimale, indépendamment d'une éventuelle instabilité météorologique ou de changements de charge soudains à tout moment[91] comme montre la figure1.24. En pratique, le hacheur détecte la puissance consommée au cours d' une période d'échantillonnage défini et commence à augmenter ou diminuer le rapport cyclique pour annuler le gradient de puissance P [92] :

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est défini comme le rapport entre la puissance maximale extraire de cellule PV et de la puissance optique reçue. Cette puissance lumineuse correspond au produit de la surface de cellule S et de l'ensoleillement G [73] :

$$n_{tot} = \frac{P_{Max}}{GS} \quad (1.18)$$

Généralement, son rendement se situe entre 90 et 95% [93, 94].

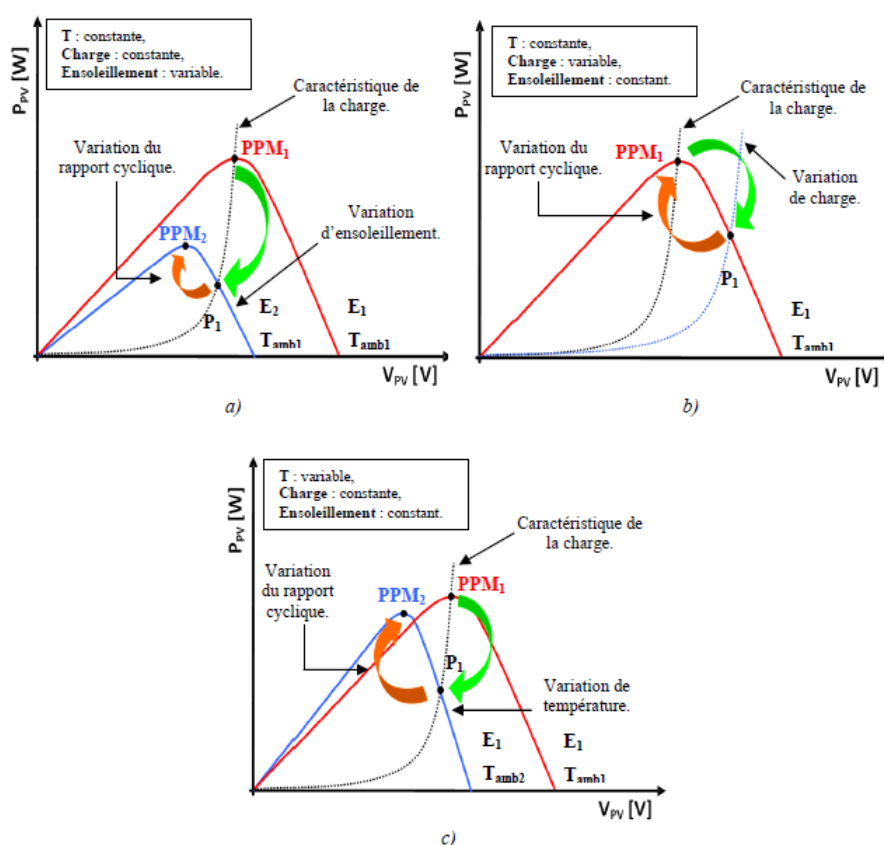


FIGURE 1.24 – Recherche du point de puissance maximale : a) Changement d'ensoleillement, b) Changement de la charge c) Changement du température

1.6.2.2 Les différentes techniques d'MPPT

Dans l'utilisation d'énergie photovoltaïque autonome ou connectée au réseau, les chercheurs ont tenté de développer des stratégies pour « presser » le panneau photovoltaïque de extraire le maximum de puissance [85, 95]. Depuis 1968, date à laquelle la première loi de commande adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV a été publiée, divers travaux ont

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

été publiés régulièrement sur les commandes assurant un fonctionnement de type MPPT [91]. À ce jour, un grand nombre d'algorithmes et de conceptions MPPT sont disponibles dans la littérature [95, 96, 97]. Chaque méthode a ses propres spécifications, limitations et applications. Certains méthodes nécessitent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des microprocesseurs combinés avec des circuits de commutation, par contre, il y a des autres très robustes et simples.[98]. Tout d'abord, des systèmes mécaniques ont été développés qui déplacent les panneaux photovoltaïques afin qu'ils reçoivent le maximum de radiations solaires[99]. Un autre type de suiveur de puissance maximale, appelé power point tracker électrique (MPPT), est basé sur le déplacement de la tension PV de fonctionnement, ou de courant, afin d'obtenir la puissance maximale[66]. Dans la référence [89], les chercheurs ont compté au moins 40 méthodes utilisées pour trouver la puissance maximale d'un panneau solaire. Celle-ci peut être décomposée en fonction de leurs techniques de suivi en cinq groupes :

1.6.2.2.1 Techniques de suivi avec des paramètres constants

Les méthodes basées sur cette technique de suivi, utilise des valeurs fixes prédéfinies qui caractérisé le MPP . Dont on peut citer : méthode à tension constante[100, 101], méthode de tension en circuit ouvert[87] et méthode hybride de tension en circuit ouvert[102].

1.6.2.2.2 Techniques de suivi avec mesure et comparaison

Cette technique est basée sur la détection des paramètres externes (tension PV , courant, irradiance ou température) et leur comparaison avec un MPP pré-connu. Comme la méthode de table de recherche(Look up table) [103], Maximisation du courant ou tension de la charge[104].

1.6.2.2.3 Techniques de suivi par essais et erreurs

Ces méthodes utilisent une tentative de calcul et d'observation du résultat obtenu, qui détermine les critères de direction pour la prochaine tentative afin d'atteindre le MPP . On peut citer : méthode Perturb and Observe (P O)[105], P O modifié avec étape de perturbation fixe[106] et méthode de Hill-Climbing[107].

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

1.6.2.2.4 Techniques de suivi avec calcul mathématique

Ces techniques définissent l'emplacement du MPP en fonction de calculs basés sur des équations des données disponibles. Nous pouvons compter : la méthode balayage du courant (Current Sweep) [108], méthode de conductance incrémentielle [109, 110], Méthode de différenciation [111], méthode de capacité parasite (PC), méthode β [112]

1.6.2.2.5 Techniques de suivi avec prédiction intelligente

Ces méthodes utilisent un processus d'apprentissage intelligent qui offre la possibilité de prédire l'emplacement du MPP [85]. On peut citer : contrôle par la Logique Floue [76, 113, 114], Réseau Neuronal [115, 116], Algorithme de l'essaim biologique PSO [69, 117, 118].

En raison du développement des microcontrôleurs [119], le contrôle basé sur la logique floue est devenu de plus en plus populaire. Les avantages de ces techniques sont qu'elles peuvent gérer des valeurs d'entrée imprécises et ne nécessitent pas de modèles mathématiques de haute précision. De plus, ils peuvent gérer la non-linéarité. Dans notre travail, on se limite à la méthode de recherche de l'MPPT par le régulateur flou, qu'il a un bon rendement et il est très simple à implanter [78].

1.6.3 État de l'art des convertisseurs DC/DC pour les SPV

Les convertisseurs statiques sont essentiellement constitués des éléments de commutation électronique et des éléments de stockage d'énergie électrique comme l'inductance ou le condensateur où la technique de conversion d'énergie est effectuée en stockant l'énergie de la source dans les éléments de stockage pendant le fonctionnement partiel, puis en le transférant à la charge pour le reste du cycle de commutation [69]. Les convertisseurs DC-DC permet d'adapter - à l'aide d'un interrupteur électronique contrôlable à la fermeture et l'ouverture périodiquement- la source continue à amplitude variable de panneau photovoltaïque à une tension continue constante DC que peut répondre à les besoins de la charge de type DC. Ainsi, la sortie de tension de ce convertisseur est représentée le bus continu qui relie le champ PV avec divers composants énergétiques soit les charges DC, des autres sources d'énergie de type continue comme les batteries, la pile à combustible, ou autres sources renouvelables. De plus, cela permet de réduire les variations de tension au niveau des différents composants et de stabiliser l'entrée d'un onduleur DC/AC dans

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

les charges de types alternatives ou les réseaux électriques [119].

1.6.3.1 Différents types des convertisseurs DC/DC

Les configurations de base des divers convertisseurs DC/DC fréquemment d'utiliser dans la littérature pour les systèmes photovoltaïques sont affichés dans la figure 1.25 suivante :

1. Convertisseur survolteur (hacheur élévateur, Boost ou parallèle)[112, 113].
2. Convertisseur abaisseur (Buck, hacheur série ou dévolteur)[114, 120].
3. Convertisseur dévolteur- survolteur (série – parallèle, Buck-Boost ou hacheur à stockage inductif)[106, 115, 116, 121],
4. Convertisseur dévolteur- survolteur-inverseur(Cuk ou hacheur à stockage capacitif ou abaisseur-élévateur-inverseur)[117, 118].
5. Convertisseur Sepic (hacheur capacitif abaisseur-élévateur)[69, 122]

Pour calculer les valeurs moyennes de ces convertisseurs, il est habituel de calculer la valeur moyenne de courant en supposant une tension constante et du courant constant lors du calcul de la tension. Le tableau 1.1 permet de résumer les gains des tensions et les contraintes subies sur les commutateurs pour divers types de convertisseurs DC/DC [123].

Les gains de tensions pour différents convertisseurs DC/DC en fonction de rapport cyclique sont illustré à la Figure 1.26

Plusieurs convertisseurs peuvent être envisagés pour l'élévation de tension, notamment si le rapport cyclique alpha de signal de commutation est supérieur à 0,5, mais seul le hacheur Boost peut augmenter la tension sur toute la plage de réglage du cycle de service. Par exemple, pour un rapport cyclique de 0,5, la tension de sortie du Boost représente le double de la tension d'entrée. Par contre, les autres élévateurs ont tendance à être similaires aux convertisseur Boost uniquement lorsque le cycle de service près de 1[123]. Lorsque en prenant en considérations toutes les caractéristiques de ces diverses convertisseurs DC/DC, on obtient que le hacheur survolteur Boost, grâce à sa simplicité, son rendement élevé et son faible coût représente la structure plus retenue pour utiliser dans la plupart des systèmes photovoltaïques [83, 84].

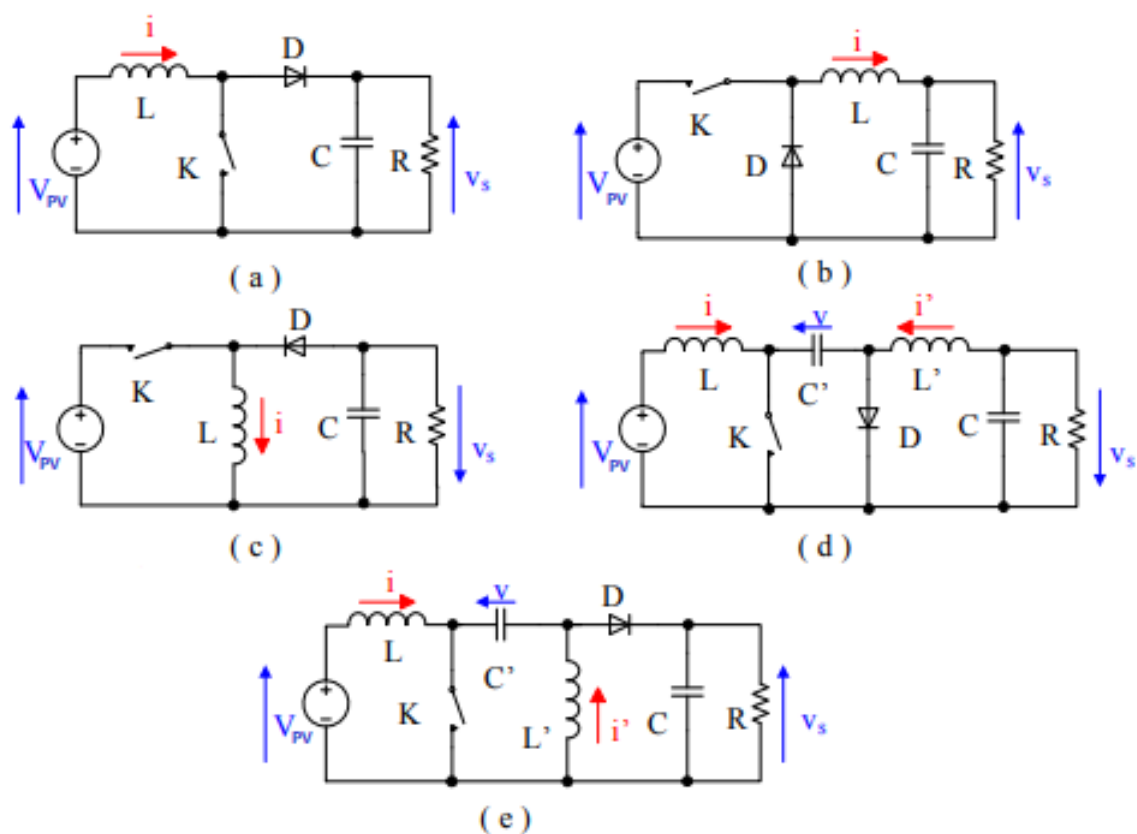


FIGURE 1.25 – Schéma de principe des convertisseurs DC-DC couramment utilisés : (a) boost, (b) buck, (c) buck-boost, (d) Cuk et (e) Sepic

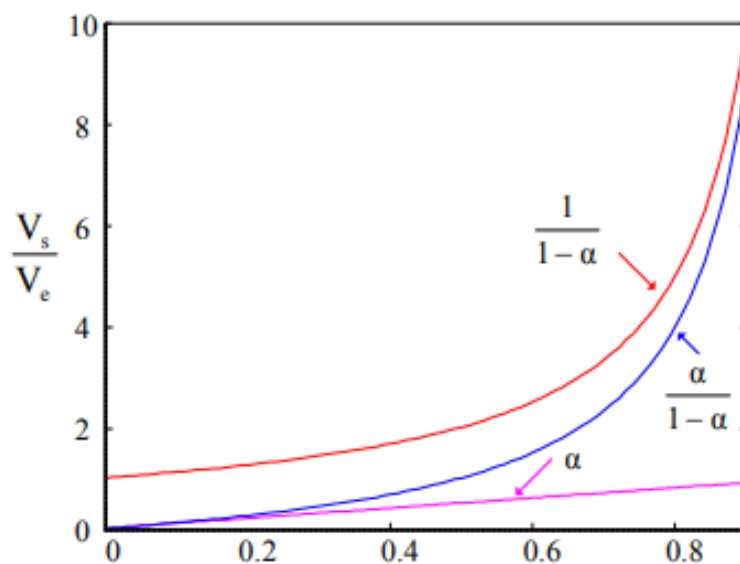


FIGURE 1.26 – Développement du rapport de la tension d'après le type de convertisseur.

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

TABLE 1.1 – Caractéristique des montages de différents convertisseurs DC/DC

	Gain de tension	$V_{k_{max}}, V_{d_{max}}$	$I_{k_{max}}, I_{d_{max}}$
Boost	$\frac{1}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \left(\frac{\alpha V_e}{2Lf}\right)$
Buck	α	V_e	$I_s + \left(\frac{\alpha(1-\alpha)V_e}{2Lf}\right)$
Buck-Boost	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \left(\frac{\alpha V_e}{2Lf}\right)$
Cuk	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_{c'}}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \left(\frac{\alpha V_e}{2Lf}\right) \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L'}\right)$
Sepic	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s + \Delta V_{c'}}{2}$	$\frac{I_s}{1-\alpha} + \left(\frac{\alpha V_e}{2Lf}\right) \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{L'}\right)$

1.6.3.2 Fonctionnement du convertisseur dc/dc élévateur (ou Boost)

Dans la littérature, il est évident que le convertisseur survolteur boost est l'objet de nombreuses discussions sur sa qualité de conversion DC/DC[85]. Dans les systèmes solaires, la tension d'entrée de ce hacheur survolteur est la tension de générateur PV comme elle montre la figure 1.27. Cet hacheur comporte principalement : des composantes de stockage (l'inductance L et le condensateur C), les commutateurs de puissances semi-conducteurs (l'interrupteur S et le diode D).

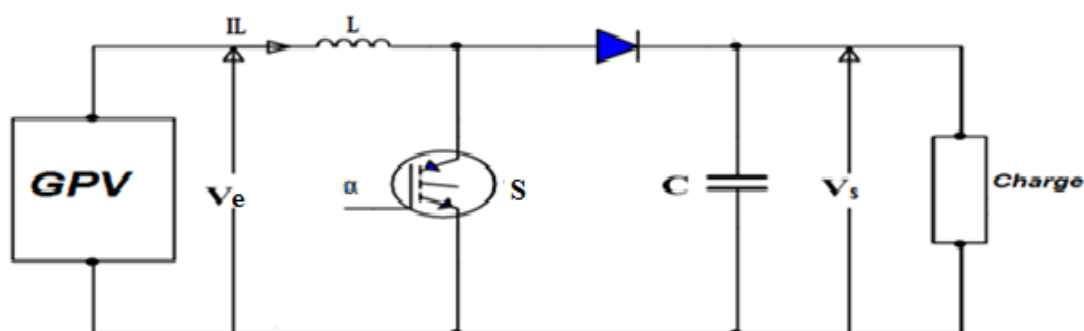


FIGURE 1.27 – Schéma de raccordement du hacheur boost avec le générateur photovoltaïque

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

Pour un modèle réel, un semi-conducteur est modélisé comme un interrupteur parfait en série avec une résistance r , l'inductance est équivalente à la résistance. Alors, ce modèle du hacheur est représenté en la Figure 1.28.a. De plus, le courant traversera le transistor ou la diode quel que soit l'état du commutation. En prend que la diode et le transistor ont la même valeur de résistance et on peut les remplacer par l'équivalente résistance du semi-conducteur R_{SC} et elle est associé avec la résistance interne de l'inductance R_L en série comme montre la figure 1.28.b.

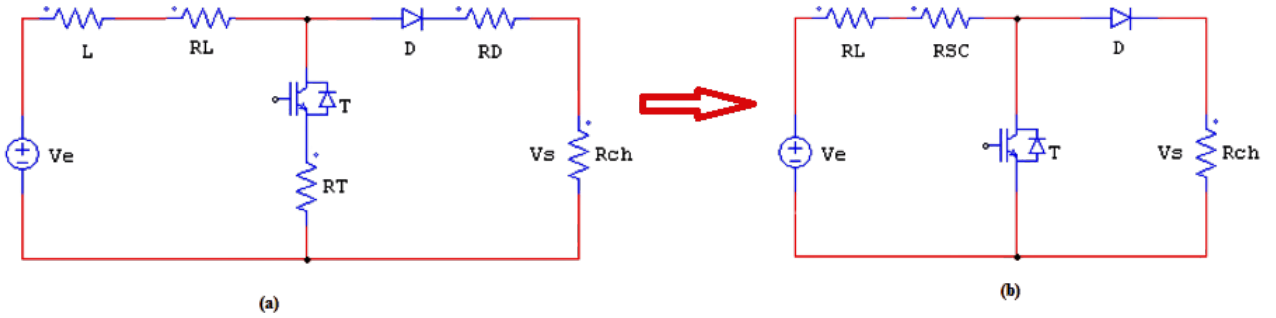


FIGURE 1.28 – (a). Modèle énergétique du Boost, (b) Modèle équivalent de Boost pour calculer les pertes

D'après la loi des mailles, la tension d'entrée de l'hacheur est :

$$V_e = (R_L + R_{SC})I_{Lmoy} + V_{Tmoy} \quad (1.19)$$

A partir de tableau 1.1 Pour un rapport cyclique « α » donné, on obtient que :

$$V_{Tmoy} = (1 - \alpha)V_s \quad (1.20)$$

En régime de conduction de l'interrupteur continu, et en tenant compte les pertes des résistances parasites, la tension de V_e moyenne et le courant de l'inductance sont donnés par [124] ces équations respectivement :

$$V_e = \frac{(R_L + R_{SC})V_s}{(1 - \alpha)R_{ch}} + (1 - \alpha)V_s \quad (1.21)$$

$$I_{Lmoy} = \frac{I_s}{1 - \alpha} = \frac{V_s}{(1 - \alpha)R_{ch}} \quad (1.22)$$

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

Le gain de tension est déterminé par :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{(1 - \alpha) \left[\frac{R_L + R_{Sc}}{R_{ch}(1 - \alpha)^2} + 1 \right]} \quad (1.23)$$

Alors, le rendement du boost est :

$$\eta = \frac{V_s I_s}{V_e I_e} = \frac{1}{\left[\frac{R_L + R_{Sc}}{R_{ch}(1 - \alpha)^2} + 1 \right]} \quad (1.24)$$

Donc, la présence des pertes produites par des résistances équivalentes des éléments constitutifs de convertisseur permet de limiter le gain de tension et réduire le rendement de conversion maximal comme illustré à la figure 1.29. Ainsi, contrairement à ce que laisserait penser la courbe théorique bleue, le taux de conversion de ce convertisseur Boost est limité [124, 125].

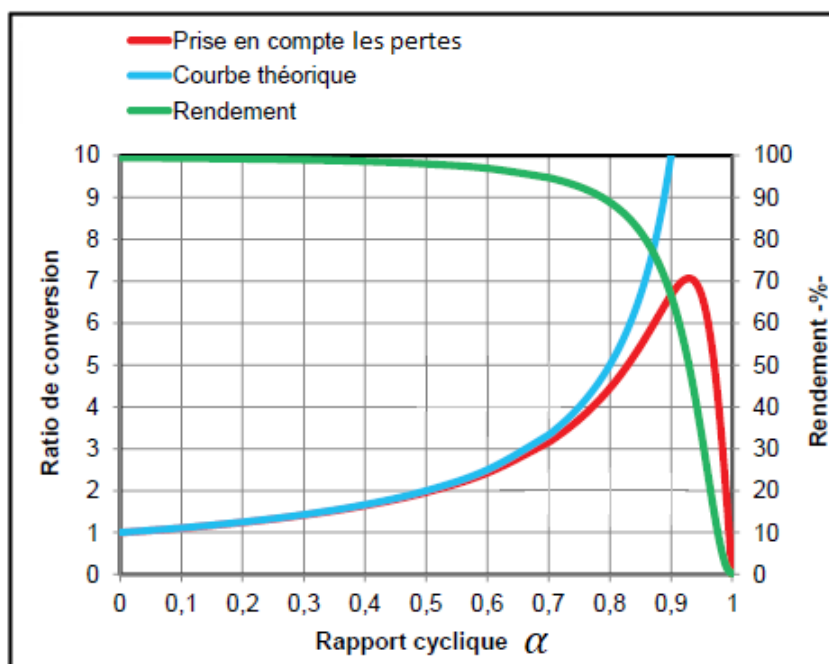


FIGURE 1.29 – Ratio de conversion de convertisseur Boost et son rendement en fonction du rapport cyclique

A partir de la figure 1.29, le rendement (courbe verte) se détériore à mesure que le taux de conversion augmente. Lorsque le taux de conversion maximum est atteint, celui-ci est de 50% [123]. Les expressions utilisées pour le calcul des composants L et C , du hacheur boost, basées sur le contenu d'ondulation du courant de l'inductance ΔI_e , les oscillations du tension

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

de condensateur ΔV_s et la fréquence de signal du porteuse f_p utilisée pour la commutation de la technique MLI [96, 123] :

$$\Delta I_e = \frac{V_e}{L f_P} \alpha \quad (1.25)$$

$$\Delta V_s = \frac{V_e \alpha}{RC f_P (1 - \alpha)} \quad (1.26)$$

Avec ces ondulations qui sont calculés autour de leurs valeurs moyennes.

On peut conclure que ,le ratio de conversion de convertisseur boost (élevateur de tension) dépend des éléments actifs et passifs du circuit et ils sont toujours limités [126]. Ainsi, le rendement se diminue très fortement pour les rapports de conversion élevés [53, 125]. Pour cette raison, de nombreuses études récentes ont abordé l'étude de différentes topologies de convertisseurs DC/DC qui augmenteraient le gain de tension et atteindraient plusieurs niveaux à partir d'une seule entrée faible tension[123].

1.6.3.3 Convertisseurs DC/DC multi niveaux

Avec l'introduction des nouveaux composants semi-conducteurs de puissance et le développement des circuits intégrés , qui ont ouvert la porte à un nouveau type de convertisseur de l'électronique de puissance. Les convertisseurs *DC/DC* sont également l'un des composants cruciaux de tout système solaire photovoltaïque [127]. Dans les dernières décennies, l'apparition des nouvelles structure *DC/DC* peuvent produire multi-niveaux *DC* à partir une seule source d'entrée et d'augmenter la tension de sortie avec haut gain en connectant en série et parallèle les condensateurs [17, 35]. Dans la littérature, plusieurs structures sont développées comme le montre la figure 1.30 :

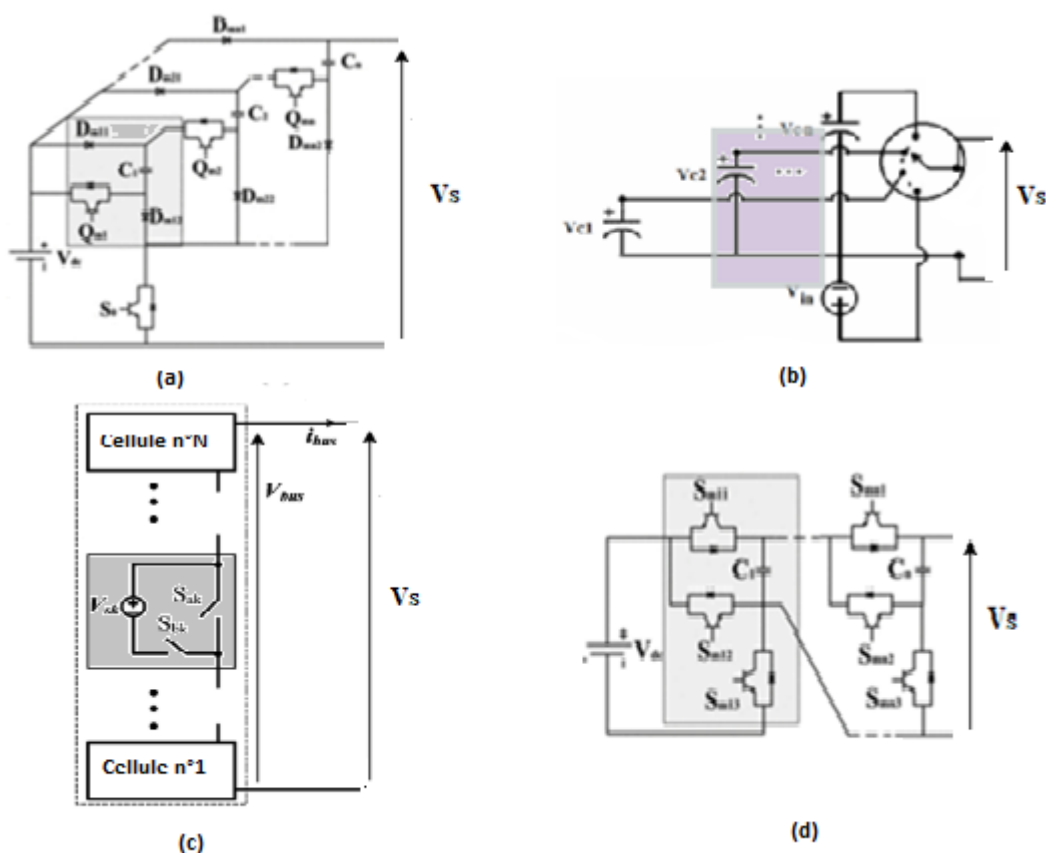


FIGURE 1.30 – Exemples de multi niveaux DC/DC topologies : (a) de [124, 126], (b) de [128], (c) de [129] et (d) de [130]

Les convertisseurs proposés dans ces études sont utilisés une seule source d'entrée CC et possèdent une caractéristique très utile de fournir une capacité d'amplification inhérente de la tension de sortie [131]. Le fonctionnement et la performance de chaque topologie dépendent de sa caractéristique particulier [128].

1.6.4 État de l'art des convertisseurs DC/AC pour les systèmes PV

L'onduleur DC/AC est la pièce maitresse de toutes installation photovoltaïque raccordée au réseau. Il est destiné de convertir le courant continu produit par le générateur PV en courant alternatif AC [132]. Il faut adapté également les signaux produits à la tension et à la fréquence du réseau. Ainsi que le bon fonctionnement du système est une des principaux caractéristiques

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

de l'onduleur intégré dans les système solaire [2]. Dans la littérature, les onduleurs de tension à deux niveaux sont des onduleurs classiques le plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Recement, l'objet de nombreuses recherches concentre sur les onduleurs à plusieurs niveaux (de trois niveaux et plus) qui produisent des tensions quasi-sinusoïdales[54]. Les signaux de tension de sortie de divers onduleurs sont illustrées à la figure 1.31

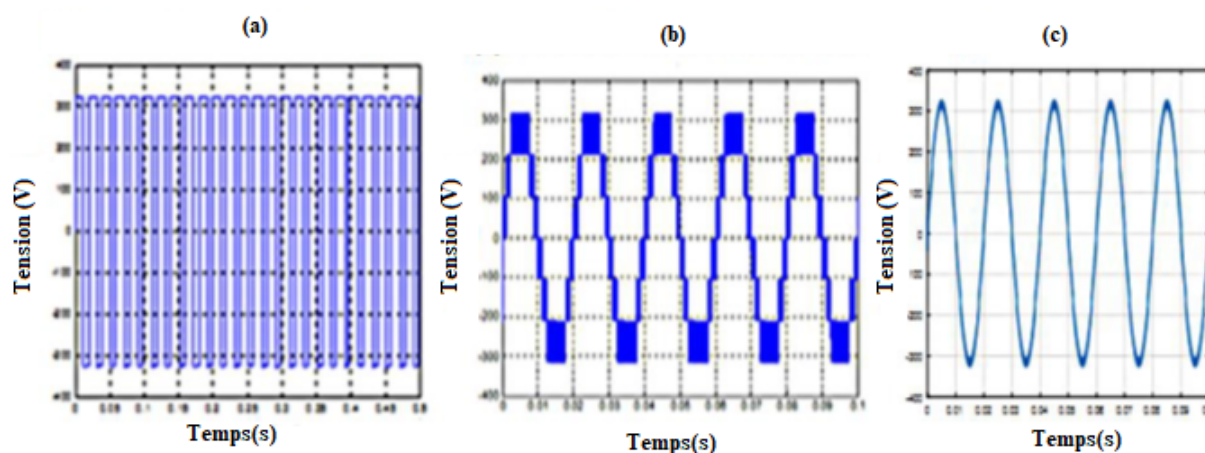


FIGURE 1.31 – Les ondes de tensions d'un onduleur : (a) classique, (b) multi-niveaux ,c) tension du réseau

1.6.4.1 Les onduleurs classiques à deux niveaux

Les onduleurs convencionnels sont les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Ils ont des structures en pont en H qui constituées des interrupteurs semiconducteurs comme des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Par un jeu de commutation convenable, réalisé souvent grâce à la technique de modulation de largeur d'impulsion *MLI*, l'énergie électrique continu produite par les panneaux photovoltaïques adapté pour obtenir un signal AC d'amplitude se de fréquence du réseau [43]. La forme carrée de l'onde de sortie peut s'adapter à plusieurs types de charges, mais son inconvénient majeur est qu'elle présente des pertes très élevées à vide et à faible charge. Ils ne peuvent fonctionner qu'à pleine charge, ce qui leur permet d'être efficaces dans les applications à forte puissance [133]. La figure 1.32 montre un système PV raccordé au réseau par un onduleur en pont en H à deux niveaux : Le couplage des onduleurs au réseau est contrôlé par l'organisation du distributeur d'électricité pour des raisons de sécurité [53]. En effet, les onduleurs raccordés au réseau doivent être constamment protégés contre les perturbations et les coupures

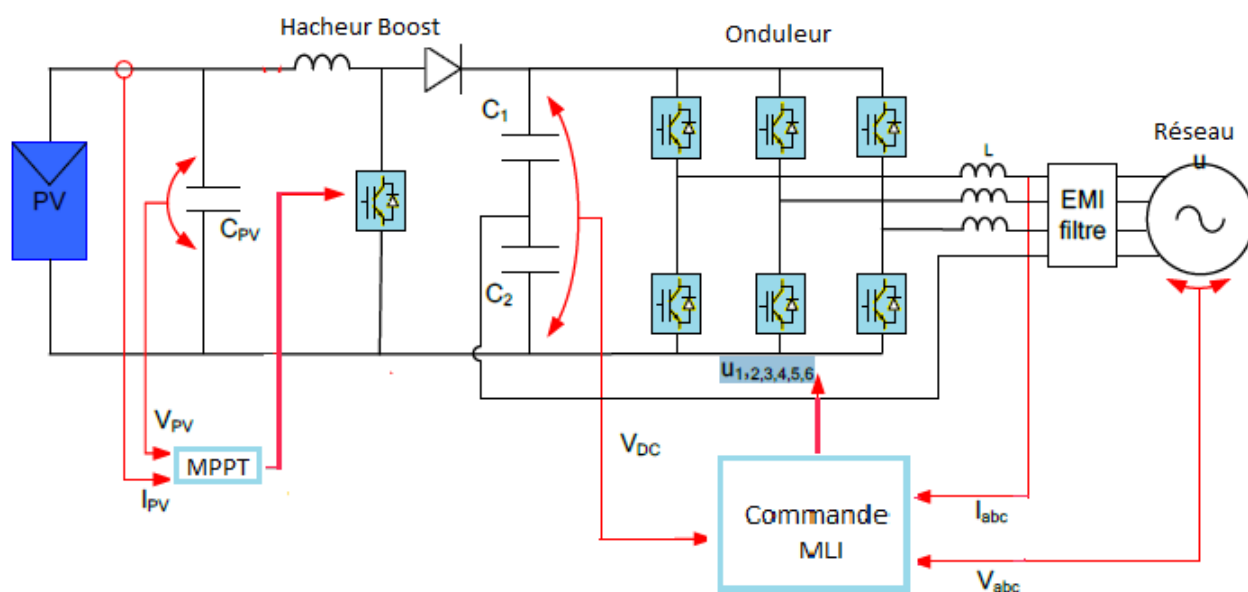


FIGURE 1.32 – Un système PV connecté au réseau avec un onduleur à deux niveaux immédiatement d'injection d'électricité en cas de panne ou d'arrêt [43]. Les onduleurs à pont en H sont limités en puissance (1 MVA) et en tension (1.4 kV). Dans les applications fortes puissances, on combine généralement plusieurs onduleurs pour augmenter la tension et la puissance en série et en parallèle. Cette association rend les commandes plus difficiles et le système plus coûteux. Pour se débarrasser de ces inconvénients, la recherche d'autres topologies des onduleurs comme les onduleurs multiniveaux pouvant faciliter le contrôle et produire un signal de tension quasi-sinusoidale est devenue nécessaire. (Figure 1.31.a. vs Figure 1.31.b). De plus, la tension à commuter par les semi-conducteurs est réduite des valeurs plus petites [62].

1.6.4.2 Les onduleurs multi niveaux conventionnels

Globalement, les systèmes photovoltaïques connaît une croissance rapide depuis plus d'une décennie, d'environ 30% à 40% par an [27]. Cette croissance extraordinaire, principalement due au raccordement des systèmes PV au réseau électrique. Cela se traduit clairement par des avancées technologiques significatives et des réductions des coûts des modules PV, ainsi que par d'importants efforts de recherches et développements (RD) en électronique de puissance [1]. De nos jours, l'onduleur multi niveau est l'une des avancées les plus récentes en électronique de puissance en particulier dans les applications haute tension et haute puissance. Ainsi, ils présentent de nombreux avantages tels que : une faible fréquence de commutation, un faible bruit

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

électromagnétique *EMI*, une faible distorsion harmonique et une faible contrainte de tension [134, 135]

De plus, dans les installations de faible puissance, l'utilisation des onduleurs multi niveaux est une solution raisonnable car ils permet d'éliminer le transformateur par conséquent, la complexité de système et les pertes sont réduites [136].

Les convertisseurs multi niveaux ont suscité un intérêt accru récemment en raison de leur capacité à générer des signaux de sortie de haute qualité avec une faible fréquence de commutation ; le concept multi niveau est utilisé pour diminuer la distorsion des harmoniques dans les signaux de sortie sans diminuer la puissance de l'onduleur [137].

En effet, les harmoniques de la tension de sortie en cas d'utiliser les onduleurs multi-niveaux sont réduites en amplitude et rejeté vers les hautes fréquence .Cela permet de réduire les valeurs des composants de filtrage, le volume, le poids total et alors le cout globale de système devraient être plus diminué [54]. C'est que ce que nous souhaitons vérifier dans ce travail.

1.6.4.3 Stratégie de commande d'un onduleur photovoltaïque

En particulier, beaucoup d'efforts ont été consacrés à l'amélioration des techniques de contrôle robustes et flexibles des convertisseurs de puissance afin d'accroître la fiabilité et la sécurité de fonctionnement d'un système photovoltaïque[138]. L'utilisation de la technique de modulation de la longueur des impulsions *MLI* (*PWM* ,Pulse Width Modulation en Anglais) pour la commade des interrupteurs semi-conducteurs des onduleurs DC/AC permet d'améliorer les tensions du sorties et d'obtenir des signaux près de sinusoïdaux avec un rendement très élevé et des faibles pertes à vide [27, 1].

L'intersection d'un signale de référence sinusoïdale de fréquence f avec des signaux triangulaires de haute fréquence f_p appelés Porteuses peut être déterminer les différents signaux de contrôle des interrupteurs. Par conséquent, deux indices sont définis [18] :

1. Indice de fréquence m_f :

$$m_f = \frac{f_p}{f_m} \quad (1.27)$$

2. **Indice de de modulation de tension** m_a comprise entre 0 et 1 :

$$m_a = \frac{v_m}{V_p} \quad (1.28)$$

La méthode de modulation de largeur d'impulsion *MLI* à utilisé pour généré un signal modulé à partir le calcue de rapport cyclique α qu'est obtenu par le programme du PIC[82].

1.6.5 Les filtres passifs dans les systèmes photovoltaïques couplés au réseau

Afin de diminuer les harmoniques injectés vers le réseau [2, 62], un filtre passif sera nécessaire d'installer après l'onduleur et avant le réseau de distribution. Il permet de réduire les harmoniques des courants générés à cause des commutations des différents interrupteurs de l'onduleur. Il existe plusieurs types de filtres [137] : la variante la plus simple est le filtre inductif L [69], c'est une inductance connectée à la sortie de l'onduleur. Mais il y a aussi des combinaisons avec des condensateurs comme LC [126] ou LCL peuvent être utilisées [139]. Ces topologies possibles sont représentées à la Figure1.33.

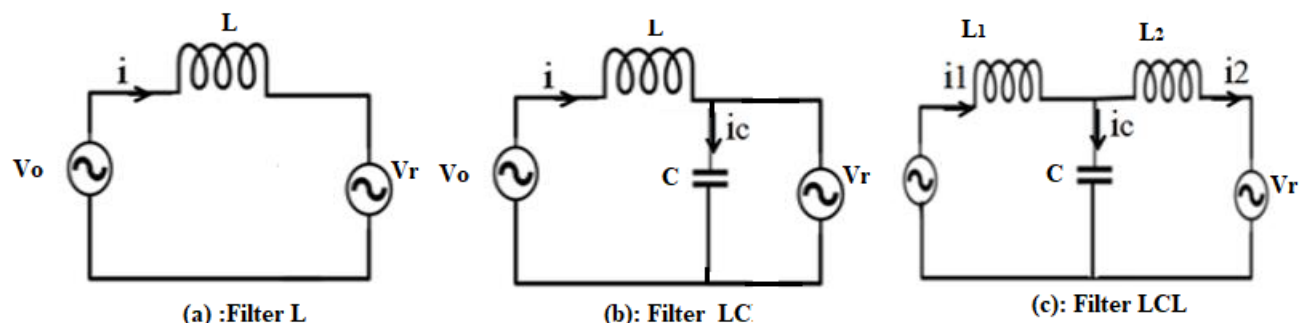


FIGURE 1.33 – Topologies des filtres passifs.

Avec :

V_0 et V_r sont la tension de l'entrée et de sortie de filtre respectivement. I_1 et I_2 sont le courant de l'entrée et de sortie de filtre respectivement. Dans le système *PV* classique, on a utilisé souvent le filtre *LCL* pour de meilleures performances. Par exemple, les auteurs dans les travaux de [2, 140, 141, 142, 143] indiquent que, par rapport aux filtres simples de type L ou LC , le filtre LCL associé au onduleur classique est le plus efficace pour filtrer les harmoniques HF haute

Chapitre 1. Etat de l'art des Systèmes PV raccordés aux réseaux électriques

fréquence générés par l'onduleur. De plus, la taille des composants passifs dépend fortement du choix de la fréquence de commutation f_c . Pour les applications PV résidentielles, la fréquence de commutation est sélectionnée entre 16 et 48 kHz [126].

La figure 1.34 montre la variation des pertes de commutation et la taille de l'inductance en fonction de la fréquence de commutation f_c .

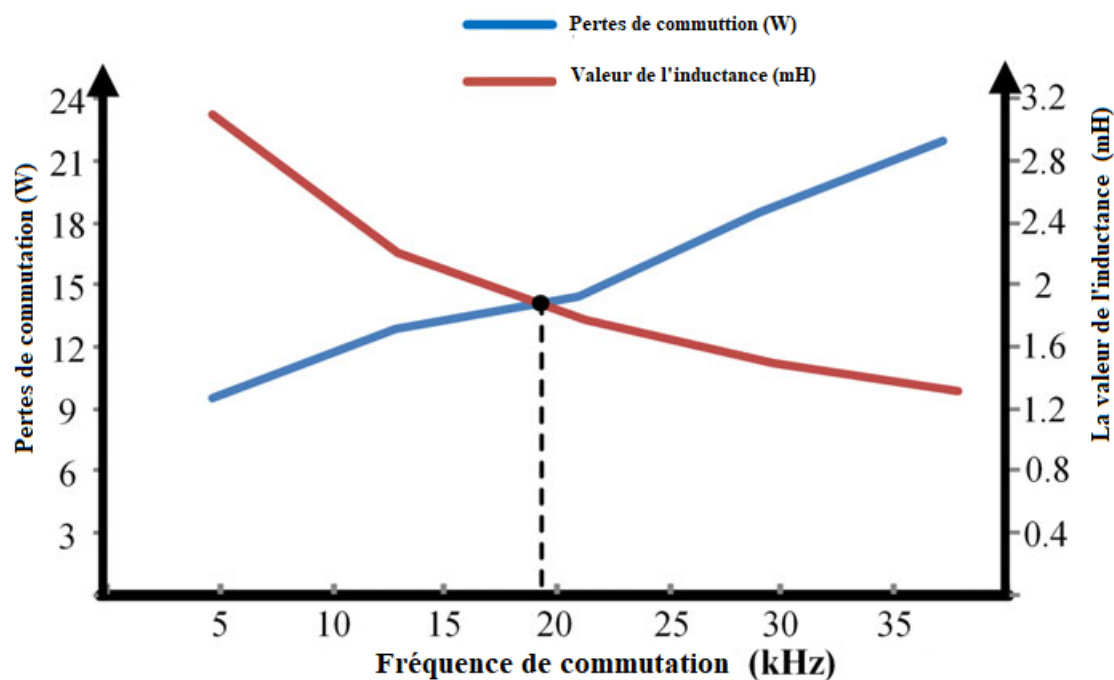


FIGURE 1.34 – La relation entre la fréquence de commutation, les pertes de commutation et la taille d'inductance

Notez que la fréquence de $20kHz$ est la valeur optimale de f_c et constitue un bon compromis entre la taille du filtre et les pertes de commutation. Les inductances et les condensateurs sont sélectionnés en fonction des valeurs souhaitées du contenu d'ondulation dans le courant et la tension, respectivement[126]. Ils sont calculés par les équations suivantes :

$$\frac{V_{dc}}{24f_c L_f} = \Delta I_L < 25\% \frac{P_N}{V_r} \quad (1.29)$$

$$C_f = 5\% \frac{P_N}{2\pi f V_r^2} \quad (1.30)$$

Où :

P_N est la puissance nominale.

V_r est la valeur efficace de la tension du réseau.

V_{dc} est la tension totale du circuit intermédiaire.

f_c et f sont respectivement la fréquence de commutation et la fréquence de réseau.

1.7 Conclusion

L'énergie solaire est une solution durable et respectueuse de l'environnement sur le plan énergétique dans notre pays. Par conséquent, il était nécessaire de la connecter au réseau de distribution pour augmenter la production et l'efficacité de l'électricité. L'état de l'art des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution électrique a été abordé dans ce chapitre. Cela nous permet de décrire en détail toutes les composantes des systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux électriques. Le plus gros problème des systèmes solaires connectés au réseau est les perturbations générées par les onduleurs conventionnels et leurs contrôleurs, ainsi que le domaine d'application des onduleurs à deux niveaux est limité en tension. Les onduleurs multi-niveaux sont proposés comme une solution alternative pour remédier à ces inconvénients. Le chapitre qui suit permet de donner un bref aperçu des principales topologies des différentes structures d'onduleurs multiniveaux ainsi que quelques avantages et inconvénients.

CHAPITRE II : Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

« Chaque récipient est rétréci
par ce qui y a été fabriqué,
sauf le récipient de la connais-
sance, il s'élargit. »

Ali ibn Abi Talib

2

Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

Sommaire

2.1	Introduction	53
2.2	Les onduleurs multi-niveaux	54
2.2.1	Définition	54
2.2.2	Intérêt des onduleurs multi-niveaux	55
2.3	Différents topologie des onduleurs multi-niveaux	58
2.3.1	Topologie conventionnelles des onduleurs multi-niveaux	58
2.4	Nouvelles topologies des onduleurs multi-niveaux	67
2.4.1	l'intérêt des nouvelles topologies d'onduleurs multi-niveaux	67

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

2.4.2	État de l'art de l'onduleur multi niveaux à condensateur commuté .	68
2.4.3	Différentes topologies des onduleurs multi niveaux à CC	69
2.4.4	La topologie proposée d'onduleur multi-niveaux à CC	71
2.4.5	Comparaison des topologies des onduleurs multi niveaux	79
2.5	Les stratégies de commande des convertisseurs multi niveaux . .	81
2.5.1	Technique de Modulation de Largeur d'Impulsions MLI	82
2.5.2	Modulation MLI vectorielle	89
2.5.3	Élimination d'Harmoniques sélective	90
2.5.4	Modulation de niveau le plus proche	91
2.6	Conclusion	92

2.1 Introduction

Les convertisseurs électroniques dans les systèmes PV ont une très grande importance pour l'efficacité et haut rendement pour la production de l'énergie électrique. Actuellement, les onduleurs multi niveaux conventionnels (OMNC) sont devenus plus attrayants pour les chercheurs en raison de leur capacité à fournir des interférences électromagnétiques plus faibles, une efficacité supérieure et des rendements plus importants [1, 144], la contrainte dans les dispositifs de commutation est réduite et le profil global des harmoniques est amélioré [145]. Les limites des onduleurs conventionnels à condensateur flottant et à diode clampée sont qu'ils ont un nombre élevé de condensateurs et de diodes pour une génération des niveaux supérieurs, tandis que les onduleurs en pont en H en cascade ont de nombreuses alimentations CC isolées et un grand nombre de commutateurs de puissance pour les applications à haute puissance [146, 17]. Donc pour remédier à ces inconvénients majeurs, de nombreux efforts de recherche ont commencé à incorporer des nouvelles topologies des onduleurs basées sur les circuits à condensateur commuté[147, 148, 36], ce qui a eu un impact significatif sur la réduction du nombre requis de sources d'entrée CC isolées, condensateurs et du nombre de commutateurs dans les onduleurs multi-niveaux donc réduction des pertes de commutation et augmenter le gain de tension[149, 34, 127]. Ainsi, ces nouvelles topologies des onduleurs à condensateurs commutés ont une alternative importante, en particulier dans les applications à haute tension car l'amplitude de la tension est augmentée où cette topologie d'onduleur consiste à mettre en cascade séquentiellement un convertisseur *DC* à gain de tension élevé et un onduleur *DC* de tension de sortie sinusoïdale acceptable [150, 6]. En raison de ces avantages, ils ont été proposés pour interfacer les systèmes PV au réseau[62]. Ce chapitre s'intéresse par une étude comparative entre les onduleurs multi-niveaux classiques et les nouvelles topologies appliquées aux systèmes solaires raccordés au réseau. Ainsi, un aperçu général sur des divers stratégies de commande des convertisseurs multi niveaux est présenté.

2.2 Les onduleurs multi-niveaux

2.2.1 Définition

Si un onduleur produit une tension de sortie de plus de trois niveaux, il est appelé « multi-niveaux » [27]. Il comprend plusieurs d' interrupteurs semi-conducteurs, des sources de tension et des condensateurs dont la sortie génère des tensions avec des formes d'onde échelonnées [151]. Il permet de surmonter les limitations de tension des dispositifs semi-conducteurs à structure conventionnelle à deux niveaux et d'améliorer la qualité de forme de signale de sortie par la diminution de sa distorsion harmonique totale THD [152] . En effet, ils sont capables à partir de ses structures de synthétiser un signal de sortie en escalier proche de la sinusoïdale comme montre la figure 2.1.d avec des composants de filtre réduits et d'une bonne qualité de puissance de sortie du point de vue harmoniques. Ils sont donc les meilleures alternatives pour limiter les problèmes des onduleurs à deux niveaux [126]. La valeur limité de la tension de blocage de commutation est repoussée au fil d'amélioration basée au développement des onduleurs multi-niveaux, mais est toujours inférieure à 10 kV et elle ne pourra être franchie qu'avec l'avènement des nouvelles technologies [26].

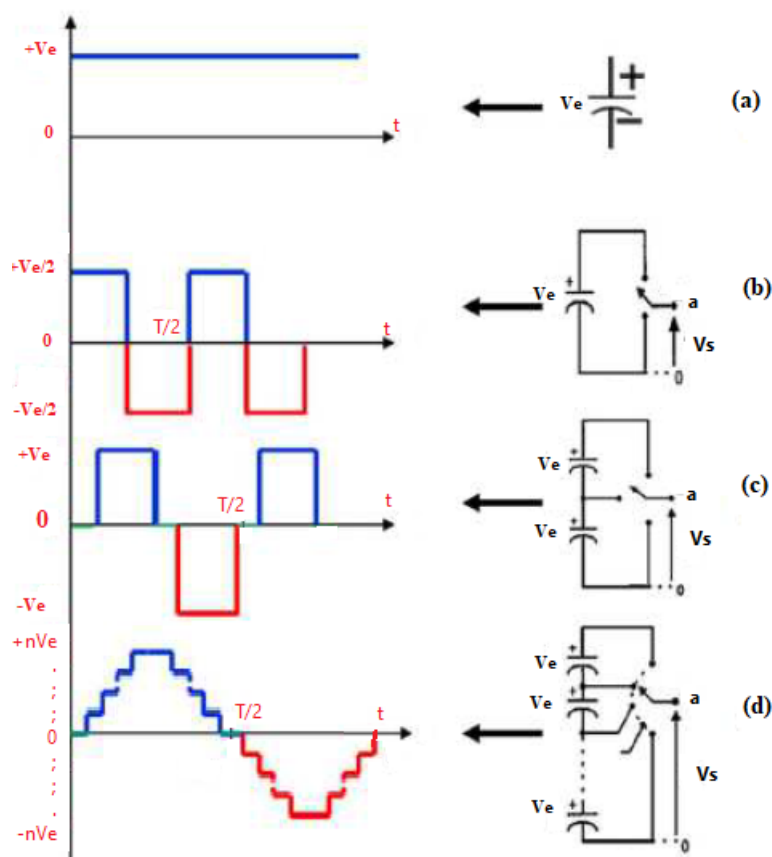


FIGURE 2.1 – Ondes de tension correspondantes à : (a) une entrée continue, (b) Onduleur deux niveaux, (c) Onduleur trois niveaux et (d) Onduleur multi niveau

Une implémentation de convertisseur multi-niveaux consiste à utiliser une topologie plus complexe. Plus de signaux sont nécessaires pour les contrôler, mais les signaux résultants présentent des meilleures performances [68, 153].

2.2.2 Intérêt des onduleurs multi-niveaux

Les convertisseurs multi-niveaux présentent les avantages d'une plus grande efficacité et d'une faible distorsion harmonique THD en comparant aux convertisseurs conventionnels, ce qui a permis des développement des technologies de conversion d'énergie électrique [126, 130].

À un indice de modulation maximum, un onduleur en pont en H a besoin de $600V$ dans sa liaison CC pour délivrer une tension de $230V$ RMS à ses bornes. Ainsi, lors de la synthèse d'une forme d'onde à deux niveaux, une tension de $+600V$ et $-600V$ apparaît alternativement

sur les commutateurs, ce qui entraîne une contrainte de commutation élevée [68].

Dans le cas d'onduleurs à plusieurs niveaux, la tension maximale sur chaque commutateur sera $\frac{V_{Max}}{P}$, où P est le nombre de pas par quart de cycle dans la forme d'onde de tension aux bornes. Ainsi, à un nombre de niveaux plus élevé, la contrainte sur les commutateurs sera minimale [26]. Donc, ce type de convertisseur présente deux avantages principaux : la structure à plusieurs niveaux peut limiter la contrainte de tension des interrupteurs d'une part. Lorsque le commutateur est à l'état bloqué, il peut supporter une fraction de tension d'autant plus faible de la pleine tension du bus continu [7]. Alors que l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie diminue, les amplitudes des raies harmoniques diminuent également [154, 155]. En d'autres termes, les tensions de sortie fournies par les convertisseurs multiniveaux présentent des caractéristiques spectrales intéressantes car le résultat obtenu est plus proche de la modulation (généralement sinusoïdal) et présente des harmoniques réduites. Cela permet également de réduire la taille du filtre ou même d'omettre complètement le filtre. Un autre avantage est la fréquence de commutation plus faible, qui réduit les pertes de commutation [23].

Au cours des vingt dernières années, de nombreuses topologies des onduleurs multi-niveaux ont été fondées dans la littérature pour les applications d'entraînements du moteurs moyenne tension haute puissance telles que les ventilateurs, les pompes, les convoyeurs, les entraînements de traction [10] et de propulsion les compensateurs statiques Var, la liaison HVDC, les variateurs de vitesse et le filtrage actif [133] et ils sont largement utilisés dans de nombreuses applications des énergies renouvelables en particulier, les générateurs photovoltaïques raccordés aux réseaux électriques [145, 62, 18].

2.2.2.1 Le choix des interrupteurs statiques

Le premier thyristor de puissance a mis sur le marché des composants de puissance contrôlables dans les années 1950. Ils ont continué à évoluer, donnant naissance aux MOSFET dans les années 1970 et aux IGBT dans les années 1980. [156]. Par conséquent, comme le montre la figure 2.2, il existe une adaptation entre la croissance de la puissance de conversion et le développement technologique des commutateurs semi-conducteurs.

Les MOSFET sont très adaptés aux convertisseurs basse tension et haute fréquence (inférieurs à 100 V et supérieurs à 50 kHz), tandis que les IGBT sont utilisés pour des tensions

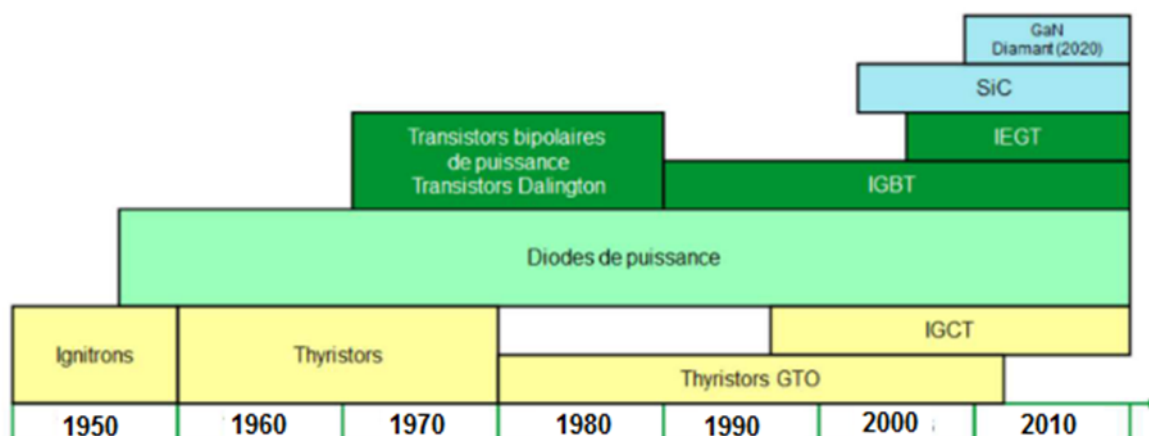


FIGURE 2.2 – Histogramme de l'évolution des composants de puissance supérieures à 300 V et des fréquences rarement supérieures à 20 kHz. Les GTO et les thyristors sont conçus pour les applications à haute tension supérieure à 1 kV et à courant élevé supérieur à 1 kA. La figure 2.3 permet de résumer la classification de ces composants en fonction de la puissance et la fréquence de commutation.

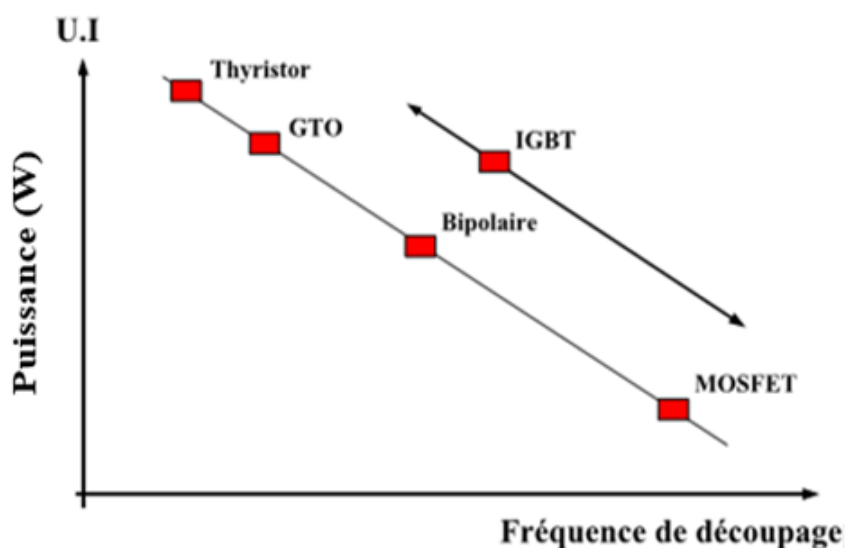


FIGURE 2.3 – Classification des différents commutateurs de puissance

Les domaines d'application des modules IGBT couvrent entièrement les gammes des applications hautes et moyennes puissances. [22]. Le choix des interrupteurs statiques est déterminé par le courant et la tension qu'ils peuvent supporter. La tension nominale de l'interrupteur doit être au moins le double de la tension à supporter [157].

2.3 Différents topologie des onduleurs multi-niveaux

Diverses topologies d'onduleurs à plusieurs niveaux sont nées dans les années 1960, comme en témoigne la littérature scientifique, la première structure étant décrite comme un pont en H en série [158]. A la fin des années 70, les convertisseurs à point neutre clampé NPC sont apparus sur le marché et le développement continue à ce jour pour répondre au besoin d'améliorer certaines performances pour chaque application différente [68]. Ces convertisseurs sont de plus en plus utilisés dans les applications des énergies renouvelables grâce à leurs divers avantages [62, 159]. Parmi les divers topologies des onduleurs multi-niveaux, on distingue trois topologies conventionnelles de base de la conversion multi-niveaux. Au cours des deux dernières décennies, de nouvelles topologies d'onduleurs multi-niveaux basées sur le nombre réduit de composants (OMN) ont été développées [68].

2.3.1 Topologie conventionnelles des onduleurs multi-niveaux

Les onduleurs multi niveaux populaires dans la littérature sont les trois topologies conventionnelles qui sont résumées dans la figure 2.4, à savoir les topologies à point neutre (Neutral Point Clamped : NPC), en pont H cascades (Cascade H-Bridge : CHB) et à condensateurs flottants (Flying Capacitors : FC) [54].

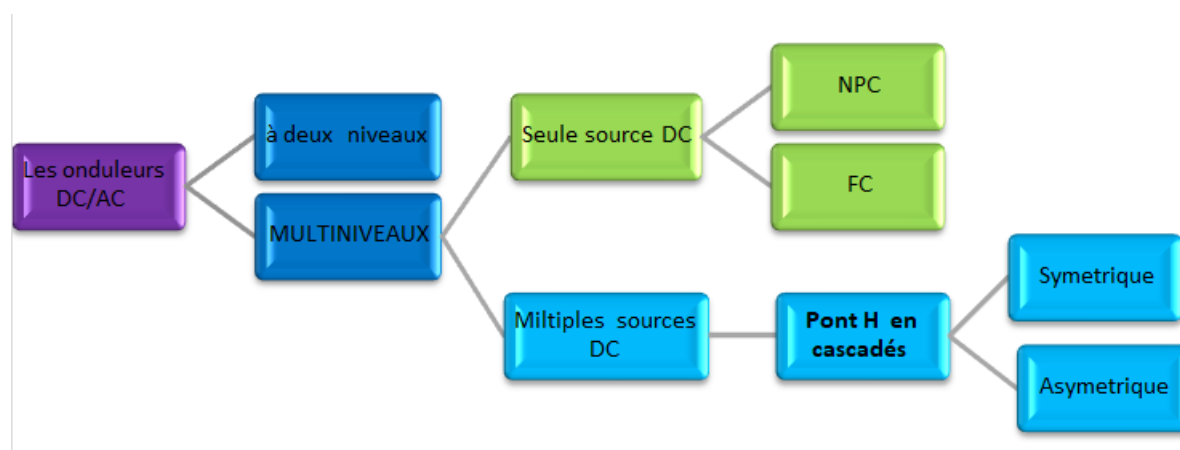


FIGURE 2.4 – Différents topologies des onduleurs multi-niveaux conventionnels

2.3.1.1 Onduleur de tension à diode de bouclage NPC

Les convertisseurs à structure NPC sont les premières topologies multi-niveaux qui ont été introduites au début des années quatre-vingt par A. Nabae et I.Takahachi et H.Akagi en 1981 dans [160] pour diminuer les harmoniques injectées par l'onduleur d'une charge de type moteur [5]. Ils sont particulièrement intéressants en raison de leur simplicité. Les multiples niveaux de tension sont obtenus grâce à un montage en série de condensateurs identiques [14]. Cette structure d'onduleur multi-niveaux a été utilisée dans les applications d'énergie photovoltaïque où le générateur PV est connecté à la liaison CC d'entrée, ainsi qu'aux entraînements de moteur à vitesse variable[22]. Plusieurs condensateurs divisent la tension du bus continu dans différents niveaux de tension avec un point neutre au centre [23]. Cela crée plusieurs niveaux de tensions internes à une amplitude différente qui sont bloqués par deux diodes supplémentaires avec des tensions nominales différentes [161, 2]. Le OMN-NPC ne nécessite qu'une seule source indépendante pour synthétiser N niveaux dans le signal de sortie dont le nombre de niveaux délivrés par celui-ci sera basé sur le nombre de condensateurs de serrage [15]. La tension aux bornes de chaque interrupteur du l'onduleur NPC ne dépassera pas la tension nominale du condensateur de serrage individuel. Cela rend la topologie capable de gérer une application haute tension avec des composantes basses tensions. Mais le principal inconvénient de NPC est qu'il nécessite des circuits d'équilibrage de tension pour assurer une distribution de tension égale entre les condensateurs de serrage [146, 10]. La figure 2.5 montre un onduleur NPC à N niveau [7].

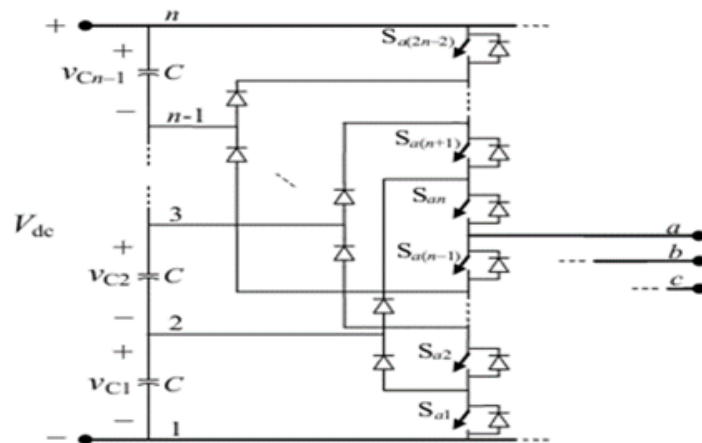


FIGURE 2.5 – Schéma de l'onduleur NPC triphasé à N niveaux

Dans les structures NPC, les capacités $N-1$ sont généralement nécessaires pour obtenir

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

une tension de niveau N . Les tensions de ces condensateurs sont toutes égales à $E/(N - 1)$ où E représente la tension de l'entrée de l'onduleur. Se compose de $2(N - 1)$ commutateurs connectés en série [158]. On appelle cellule de commutation chaque deux paires d'interrupteurs commandés de manière complémentaire.

Par exemple, l'onduleur triphasé à neuf niveaux est constitué de (16) interrupteurs semi-conducteurs en série pour chaque bras de phase dont le schéma de cet interrupteur est représenté comme montre la figure 2.6) et 14 diodes flottantes. Les huit condensateurs peut diviser la tension d'entrée en huit tensions continues d($8U_c$).



FIGURE 2.6 – Interrupteur semi-conducteur " Transistor–Diode

L'onduleur multiniveau à structure NPC (ou diode flottante) est une structure de conversion couramment utilisée pour alimenter des machines à courant alternatif à tension variable et fréquence variable de forte puissance. La symétrie de l'onduleur triphasé permet de le modéliser par des bras, à partir desquels on peut déduire la symétrie de l'ensemble de l'onduleur. Ainsi, un seul bras est pris en considération pour décrire le fonctionnement d'un onduleur triphasé à neuf niveaux de type NPC comme montre la figure 2.7. Les valeurs de la tension simple V_{ko} entre la borne a de la charge et le point neutre doivent être connues (k représente les branches des phases : a, b, c de l'onduleur NPC).

L'état des 16 interrupteurs $TD_{k1}, TD_{k2}, \dots, TD_{k-16}$ du bras k représente entièrement cette tension [162]. Chaque branche du convertisseur peut être vue comme un interrupteur et sa position peut changer le potentiel des points K . Ce point est relié à chaque fois à l'une des tensions aux bornes des condensateurs en série.

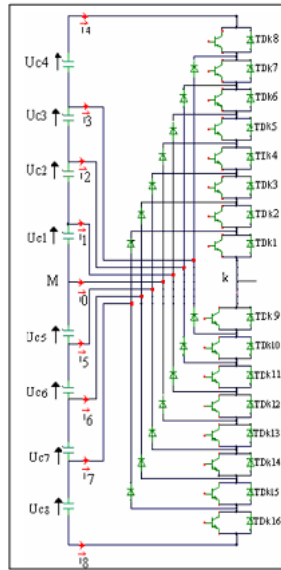


FIGURE 2.7 – Structure d’une phase d’un onduleur NPC à neuf niveaux

La structure d’un onduleur à neuf niveaux limite la tension imposée à chaque interrupteur à $E/8$, alors que cette tension vaut la tension continue complète E dans la structure classique de l’onduleur à deux niveaux. La tension de sortie d’une branche de cet onduleur NPC ne doit pas dépasser la moitié de la tension d’entrée V_{cc} [68].

Une commande complémentaire des différents interrupteurs sera nécessaire en mode commandable pour éviter la conduction simultanément des (16) interrupteurs d’un bras k , qui pourrait entraîner leur destruction par une augmentation du courant lors du court-circuit ou une surtension si tous les interrupteurs sont ouverts. Les paires de commutations sont représentées comme suite [2] :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \bar{B}_{k16} \\ B_{k2} = \bar{B}_{k15} \\ B_{k3} = \bar{B}_{k14} \\ B_{k4} = \bar{B}_{k13} \\ B_{k5} = \bar{B}_{k12} \\ B_{k6} = \bar{B}_{k11} \\ B_{k7} = \bar{B}_{k10} \\ B_{k8} = \bar{B}_{k9} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Avec :

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

- B_{Ki} commande du transistor TD_{ki} de bras K .
- k : numéro du bras ($k = 1, 2, 3$).

Dans cette topologie , lorsque le nombre de niveaux de tension augmente, la commande devient plus complexe, le nombre de composants semi-conducteurs augmente et le système devient plus coûteux et complexe [158].

2.3.1.2 Onduleur de tension à condensateur Flottant FC

La topologie multi niveaux à condensateur Flottant OMN-FC appelée aussi les onduleurs multicellulaires série proposée par T. Meynard et H. Fochen en 1992 [137] est approchant à l'onduleur de type NPC , mais il utilise un condensateur au lieu d'une diode de blocage. [149]. Cela explique le nom d'« Onduleur à Condensateurs Flottants ». Cette structure est proposée pour résoudre le problème du balancement de tension et le nombre excessif de diodes. [14]. Les onduleurs multi-niveaux FC avec un nombre accru de niveaux ont été démontrés comme une approche viable pour fournir des courants sinusoïdaux à faible distorsion pour des charges avec un filtrage inhérent négligeable, tout en augmentant simultanément la densité de puissance et l'efficacité spécifiques de l'onduleur[20]. Par conséquent, les convertisseurs OMN-FC peuvent présenter une densité de puissance et une efficacité plus élevées dans applications à basse tension ($< 1\text{kV}$), où des condensateurs céramiques à haute densité d'énergie sont facilement disponibles La figure 2.8 représente l'onduleur triphasé à condensateur flottant à cinq niveaux

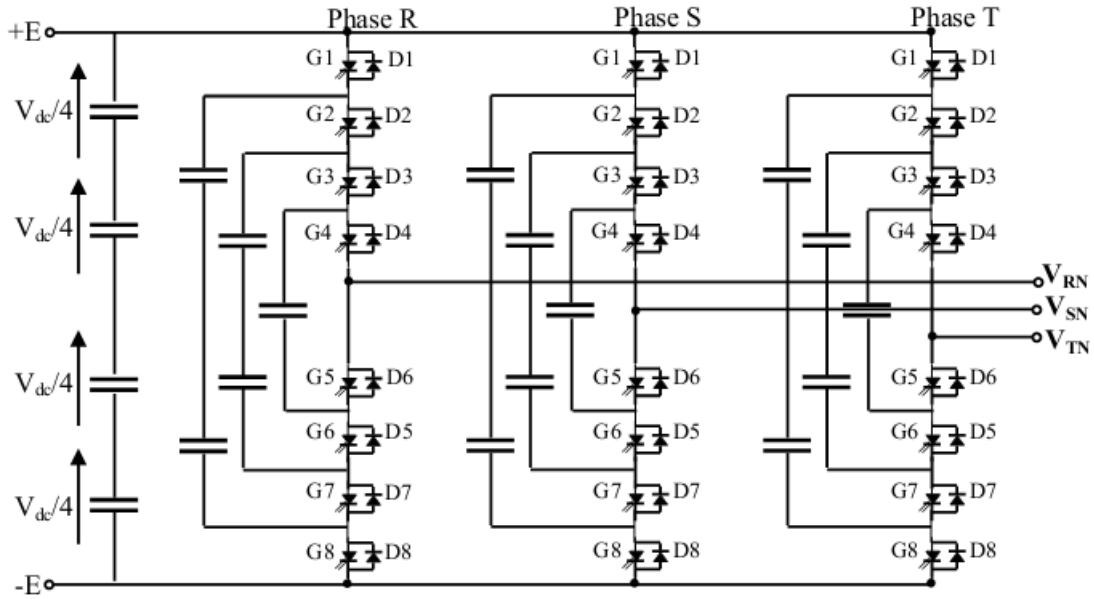


FIGURE 2.8 – Structure d’ondeur triphasée à cinq niveaux à condensateurs flottants

La valeur de tension de sortie maximale du bras de l’ondeur FC ne dépasse pas la moitié de la tension d’entrée V_{cc} , comme dans l’ondeur multiniveau NPC[68]. Pour un convertisseur OMN-FC à N niveaux, il y a (N_1) paires d’interrupteurs, chacun avec une tension nominale idéale de

$$V_{int} = \frac{V_{cc}}{N - 1} \quad (2.2)$$

Il existe également N condensateurs volants avec des valeurs nominales de [14] :

$$C = \frac{I_s}{(N - 1)f_c \Delta V_c} \quad (2.3)$$

ΔV_c étant l’ondulation de tension de condensateur acceptable, N le nombre de cellules imbriquées, f_c est la fréquence de commutation des interrupteurs et I_s le courant maximal de sortie.

En ce qui concerne la topologie OMN-FC, à un nombre plus élevé de niveaux, il nécessite un nombre plus élevé de condensateurs, ce qui entraîne un emballage complexe. Ainsi, si l’ondeur doit fonctionner en haute tension, les condensateurs seront volumineux et nécessiteront des circuits de commutation complexes [163].

2.3.1.3 Onduleur de tension en cascade

Une connexion en série de plusieurs onduleurs en pont H monophasé représente un onduleur multi niveaux en cascade. (Cascade H Bridge en Anglais CHB)[18]. Il présente l'idée de créer une onde en escalier de tension AC par l'association des sources DC distinctes. Sa structure modulaire le rend simple à atteindre un plus grand nombre de niveaux de tension de sortie par l'addition des sources continues sans augmenter la complexité du circuit. Elle est non seulement simple et modulaire, mais nécessite également le moins de composants en comparant avec les deux autres types NPC et FC[21]. De plus, des diodes de serrage ou des condensateurs ne sont pas nécessaires [153]. Dans l'onduleur multi-niveaux à pont en H en cascade OMN-CHB[7], plusieurs sources de tension d'entrée sont nécessaires, ce qui est facilement adapté au système PV. Chaque source PV est connectée à son propre onduleur monophasé. Il présente des avantages particuliers pour les systèmes photovoltaïques : il fournit plusieurs liaisons CC auxquelles se connectent des chaînes photovoltaïques, chacune avec un MPPT indépendant, et il atteint facilement la moyenne tension. Néanmoins, étant donné que chaque cellule en pont en H possède son propre système photovoltaïque indépendant avec son propre point d'alimentation, il existe un déséquilibre de puissance inhérent entre les cellules[21].

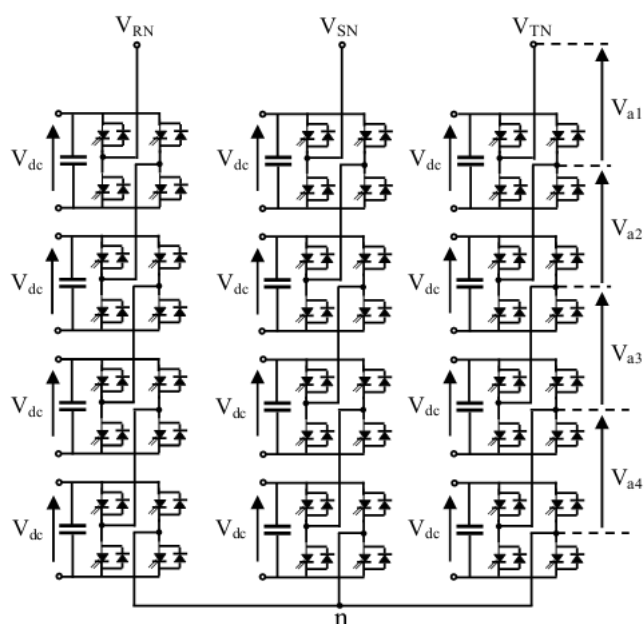


FIGURE 2.9 – Structure d'un onduleur triphasé à neuf niveaux en cascade

Le circuit de l'onduleur neuf niveaux en cascade illustré dans la Figure 2.9 utilise quatre

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

sources de courant continu indépendantes et créera par conséquent une tension de phase de sortie à neuf niveaux. En général, si n est le nombre de sources de courant continu indépendantes par phase, alors les relations suivantes s'appliquent [7] :

$$\mathbf{N} = 2n + 1 \quad (2.4)$$

$$d = 2(N - 1) = 4n \quad (2.5)$$

Où N est le nombre de niveaux et d est le nombre de dispositifs de commutation dans chaque phase.

Par rapport aux deux autres onduleurs multiniveaux, ce dernier permet de résoudre simultanément les problèmes de grand taille et de commande compliquée dans les domaines photovoltaïques de haute tension et forte puissance [28].

Le principal inconvénient de cette topologie est qu'elle nécessite l'utilisation d'une source de tension indépendante isolée galvaniquement pour chaque pont H, ce qui l'amène à l'utilisation dans certains domaines d'application [68].

2.3.1.4 Comparaison des onduleurs multi-niveaux conventionnelles

Nous avons constaté que chaque topologie avait ses propres avantages et inconvénients en comparant les différentes caractéristiques des trois topologies d'onduleurs multi-niveaux traditionnelles (NPC, FC et CHB) décrites précédemment. Plusieurs paramètres doivent être pris en compte pour évaluer les performances d'un onduleur multi-niveaux, tels que le nombre de composants (nombre d'interrupteurs de puissance, de diodes, de circuits d'équilibrage et de circuits de commande), les pertes (pertes de conduction et de commutation), le nombre d'états ON et OFF, la tension de blocage (tension de blocage par interrupteur, tension de blocage maximale), le nombre de sources isolées ou non isolées (nombre de sources DC ou de condensateurs, nombre de variétés de sources DC)) et type de configuration (configuration symétrique ou asymétrique) [68]. Le tableau 2.1 résume le nombre de différents composants requis pour chaque topologie d'onduleurs multi-niveaux conventionnelles.

En effet, pour un niveau de tension N , les trois topologies nécessitent le même nombre d'interrupteurs de puissance, mais ils sont différents pour le nombre des sources continues, du

TABLE 2.1 – Étude comparative du nombre de composants des onduleurs OMN

Topologie	NPC	FC	CHB
Interrpteurs IGBT	$2(N - 1)$	$2(N - 1)$	$2(N - 1)$
Diodes P	$2(N - 1)$	$2(N - 1)$	$2(N - 1)$
Diodes de blocage	$2(N - 2)$	0	0
Condensateurs du bus DC	$N - 1$	$N - 1$	$\frac{N-1}{2}$
Condensateurs flottants	0	N	0

diodes et du condensateurs nécessaires. Le major inconvénient des deux premières topologies (NPC et FC) est qu'elles nécessitent un large nombre de composants à mesurer que le nombre de niveaux N augmente. Dans ce cas, le convertisseur CHB semble être la topologie la plus avantageuse car il nécessite moins de composants[28]. Il convient de noter que le nombre de composants nécessaires à la mise en œuvre d'un onduleur multi-niveaux est un paramètre très important qui détermine en grande partie l'efficacité des pertes, le volume et le coût d'un convertisseur multi-niveaux comme montre la figure 2.10.

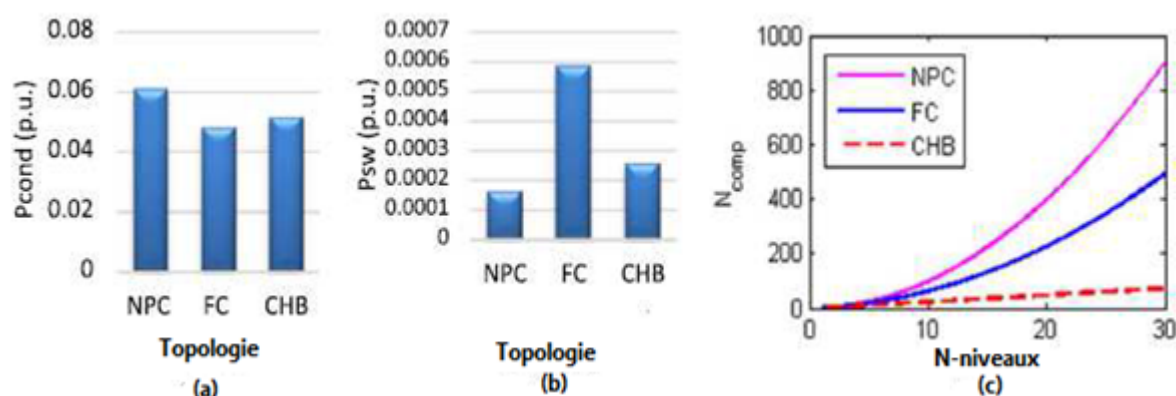


FIGURE 2.10 – Comparaison des trois topologies conventionnelles : (a) les pertes par conduction (p.u), (b) les pertes par commutation (p.u) et (c) le nombre de composants selon du nombre de niveaux [68]

Où :

P_{cond} : les pertes de puissance des interrupteurs dans le cas de conduction.

P_{sw} : les pertes de puissances des interrupteurs dans le cas de commutation.

N_{comp} : le nombre des composants nécessaires de chaque topologie x.

Ainsi, les convertisseurs multi-niveaux de type CHB sont largement utilisés dans les systèmes de conversion de puissance multi-sources comme les générateurs PV, le filtrage actif ou

la compensation statique où l'onduleur n'a pas besoin d'alimenter le système. Par conséquent, il convient le mieux à la compensation de puissance réactive[158].

Cependant, dans les cas où une seule source continue est disponible, les topologies de type NPC et FC représentent des avantages par rapport aux topologies CHB[164].

2.4 Nouvelles topologies des onduleurs multi-niveaux

Les trois structures de base des onduleurs multiniveaux traditionnels montrent que ces onduleurs peuvent convertir une grande puissance avec une bonne qualité de puissance (faible THD des ondes de courant et de tension) L'inconvénient d'avoir plus de niveaux est que plus de composants sont utilisés. [36, 7]. Ainsi, ils ne sont pas capables de fournir une amplification de tension donc le transformateur peut être utilisé pour réaliser une élévation de tension, cela augmente la taille et le coût de l'onduleur. Ainsi, l'efficacité du système d'onduleur peut diminuer en raison de l'élément magnétique volumineux car le transformateur doivent avoir un aimant magnétique important et lourd noyaux pour maintenir la haute puissance [33, 32]. Pour surmonter ces limitations, de nouvelles topologies d'onduleurs multi-niveaux basées sur le nombre réduit de composants ont été développées au cours des deux dernières décennies[148, 165]. il s'agit d'améliorer l'efficacité et le performance énergétique, le THD du signal de sortie, la stratégie de contrôle, la capacité et le coût des onduleurs multi-niveaux et d'élargir leur domaine d'application pour les rendre plus attractifs et compétitifs que les topologies traditionnelles [7, 41].

2.4.1 l'intérêt des nouvelles topologies d'onduleurs multi-niveaux

De nos jours, pour réduire les composants (commutateur de puissance et condensateur) donc réduction de la perte de commutation et augmenter le gain de suralimentation, des nouvelles structures des onduleurs multi niveaux basées sur le circuit à condensateur commuté qui consiste à mettre en cascade séquentiellement un convertisseur DCà gain de tension élevé et un onduleur DCd'une forme d'onde de tension de sortie sinusoïdale acceptable[34].De nombreux chercheurs ont présenté nombreuses structures développées des onduleurs multi niveaux avec moins de composants clés tels que le nombre de commutateurs requis, les condensateurs, les sources

d'alimentations, etc [148, 152].

Ces convertisseurs sont combinés dans une configuration spécifique pour obtenir une amplification haute tension. Le circuit proposé présente des caractéristiques distinctes d'augmentation de tension et de produire une tension de sortie AC quasi sinusoïdale (multi-niveaux/escalier). Cette technique utilise des éléments de stockage d'énergie tels que des condensateurs et des inducteurs en conjonction avec des commutateurs à semi-conducteurs de puissance. Selon les commutateurs activés et désactivés, chacun des condensateurs peut être en série ou en parallèle avec les autres condensateurs du circuit[166]. La cellule de base du circuit à condensateur commuté C-CC se compose de commutateurs à semi-conducteurs de puissance et de diodes avec une tension continue. Cette structure est non seulement très simple et facile à étendre à un niveau supérieur, ses circuits de commande de grille sont également simplifiés car le nombre de commutateurs actifs est réduit

Les convertisseurs multi- niveaux à condensateur commuté OMCC ont de nombreuses applications dans différents domaines tels que : véhicule électrique, énergie renouvelable, générateur d'impulsions haute tension[62]. Dans ces domaines, la capacité de survoltage est l'une des principales exigences pour la conception de convertisseurs [40].

2.4.2 État de l'art de l'onduleur multi niveaux à condensateur commuté

De nombreuses études approfondies menées pour améliorer divers aspects de l'onduleur multi niveau classique, les chercheurs continuent de contribuer à l'évolution de la nouvelle topologie de circuit d'onduleur multi niveau avec un nombre réduit des composants et un contrôle simple[167]. Tout d'abord, les chercheurs Y. Hinago et H. Koizumi ont proposé en [32] un nouveau modèle d'onduleur à plusieurs niveaux qui produit une tension à plusieurs niveaux en commutant les sources de tension continue en série et en parallèle. Le concept de base de nouvelles topologies multi-niveaux est repose le plus célèbre sur le circuit de condensateur CC, il est connu sous le nom de la pompe de charge où l'énergie de la pompe est déplacée d'un condensateur à un autre grâce à une technique de contrôle de commutation appropriée[166].

Ces efforts de recherche ont commencé à incorporer des circuits à condensateur commuté C-CC, ce qui a eu un impact significatif sur la réduction du nombre requis de sources d'entrée CC

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

isolées et du nombre de commutateurs semi-conducteurs[40]. Les principales applications de ces convertisseurs sont pompe de charge, véhicule électrique, pilote LCD, automobile , piles à combustible, cellules photovoltaïques, batterie et micro-réseau.Par exemple, la topologie de l'onduleur multi-niveaux à condensateur commuté OMNCC décrite dans[130] nécessite 5 commutateurs actifs par condensateur, mais tous ne doivent être évalués que pour la tension d'entrée. D'autre part, une topologie OMNCC créée par [127] n'a besoin que d'un interrupteur et de 2 diodes par condensateur, mais possède également un pont en H sur la sortie. Les commutateurs à pont en H peuvent ajouter beaucoup plus de masse qu'un plus grand nombre de commutateurs à tension nominale inférieure, car ils doivent tous être dimensionnés pour la tension de sortie complète du convertisseur. De plus, les chercheurs en [168] ont été proposé un onduleur de 13 niveaux de sortie AC quasi sinusoïdale avec une faible distorsion harmonique totale basée sur la circuit de commuté à base de résonance simple qui continent un condensateur et deux interrupteurs semi-conducteurs avec une technique de contrôle de modulation de largeur d'impulsion (MLI) à cycle de service variable. Pour la topologie propose par[169], une seule source de courant continu utilise seulement huit commutateurs pour obtenir une sortie à neuf niveaux, cet OMCC à source unique basé sur des modules CC avec une capacité d'auto-équilibrage. Ainsi, pour atteindre le plus grand nombre de niveaux de tension de sortie avec moins de nombre de semi-conducteurs de puissance et simple commutation, un nouveau type de OMCC a vu le jour en utilisant la stratégie de commutation série/parallèle[163].Sa topologie proposée réserve les avantages des OMCC courants, tels que la capacité de survoltage, l'auto-équilibrage en tension des condensateurs, moins sources d'alimentations nécessaires[130]. De plus, un onduleur multi-niveaux à condensateur commuté pour les systèmes PV connectés au réseau avec des composants réduits a été réalisé dans les travaux [34, 33, 32]. Ces OMNCC contiennent plusieurs condensateurs et commutateurs qui peuvent utiliser une seule source d'alimentation en courant continu de tension très réduite pour atteindre un sortie en courant alternatif qui a un plus grand nombre de niveaux de tension qui a un gain d'élévation très acceptable.

2.4.3 Différentes topologies des onduleurs multi niveaux à CC

Les topologies des onduleurs multi-niveaux à condensateur commuté sont populaires en raison de la modularité de leur structure et de leur capacité d'intégration en masse. Il existe de

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

nombreuses topologies d'onduleurs multi-niveaux à condensateur commuté OMNCC avec différentes configurations de circuits de condensateur commuté qui ont été proposées dans la littérature [146, 17, 36, 127, 6, 152, 167, 168]. La figure 2.11 montre la catégorisation des topologies des circuits à condensateur commuté. Ces topologies peuvent être classées selon les composants utilisés comme ; OMNCC à base de résonance (avec inductance) et OMNCC à base de condensateur (sans inductance) étudiés dans la littérature publiée.

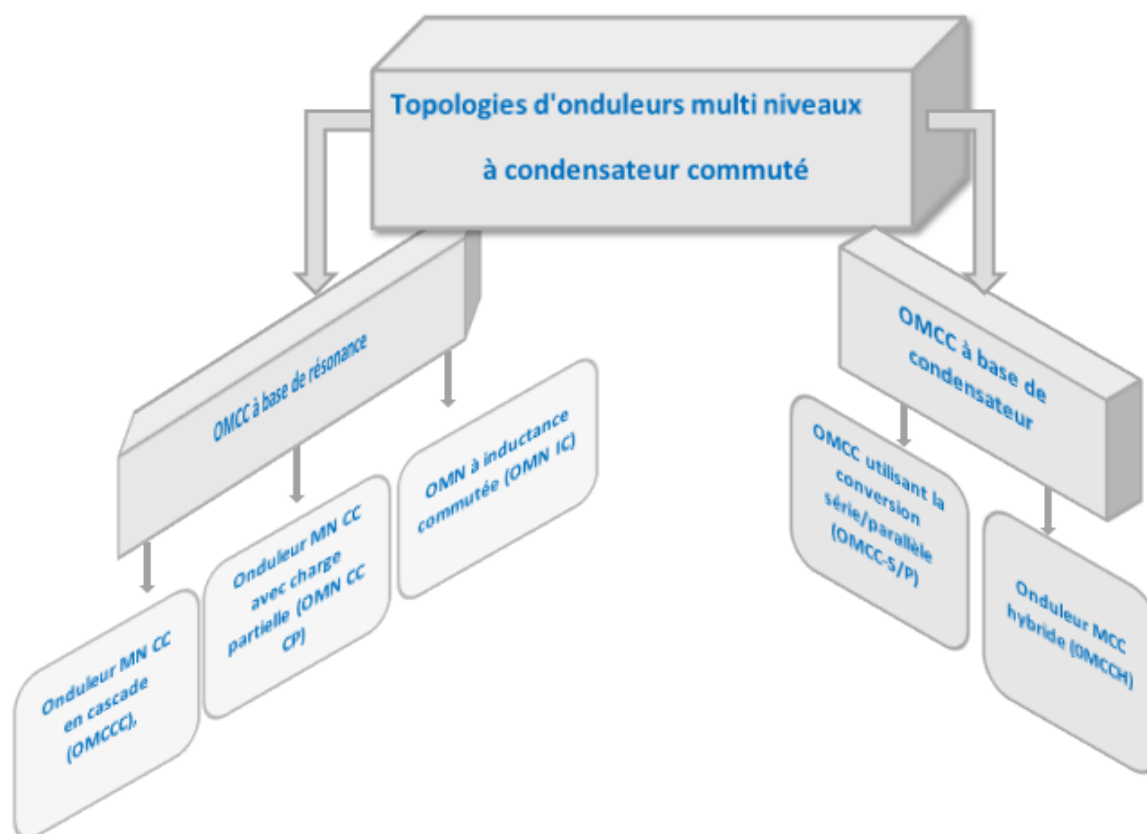


FIGURE 2.11 – Classification des topologies d'onduleurs multi niveaux à condensateur commuté

Pour le circuit de condensateur commuté C-C basé sur la résonance, trois types de configuration sont inclus, à savoir ; onduleur multi-niveau à condensateur commuté en cascade (OMC-CEC), onduleur multi-niveau à condensateur commuté utilisant une charge partielle (OMUCP) et onduleur multi-niveau à inductance commutée (OMIC). Pour le circuit C-C basé sur le condensateur, deux types de configuration sont inclus, à savoir ; Onduleur à condensateur commuté utilisant la conversion série/parallèle (OMCC-S/P) et onduleur hybride à plusieurs niveaux utilisant une unité à condensateur commuté (HSC-MLI)[40]. De plus, l'évolution des onduleurs multi

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

niveaux tend à réduire le nombre de composants, notamment les sources DC basées sur la combinaison de plusieurs sources DC et de condensateurs [169]. Dans ces topologies, le remplacement des sources DC par des condensateurs peut entraîner une réduction du nombre des sources nécessaires et du coût du système. Pour augmenter la tension, il est généralement nécessaire d'utiliser des transformateurs, mais les transformateurs augmentent la taille et aussi le volume du système [36]. Les topologies des onduleurs multi-niveaux à condensateur commuté (OMNCC) sont la solution alternative de base qui ne nécessite aucun transformateur. ils peuvent augmenter la tension de sortie en connectant en série/parallèle les condensateurs. La figure 2.12 permet d'afficher quatre topologies OMNCC différentes, chacune avec un nombre et une disposition différents de commutateurs par rapport le circuit de condensateur commuté[127].

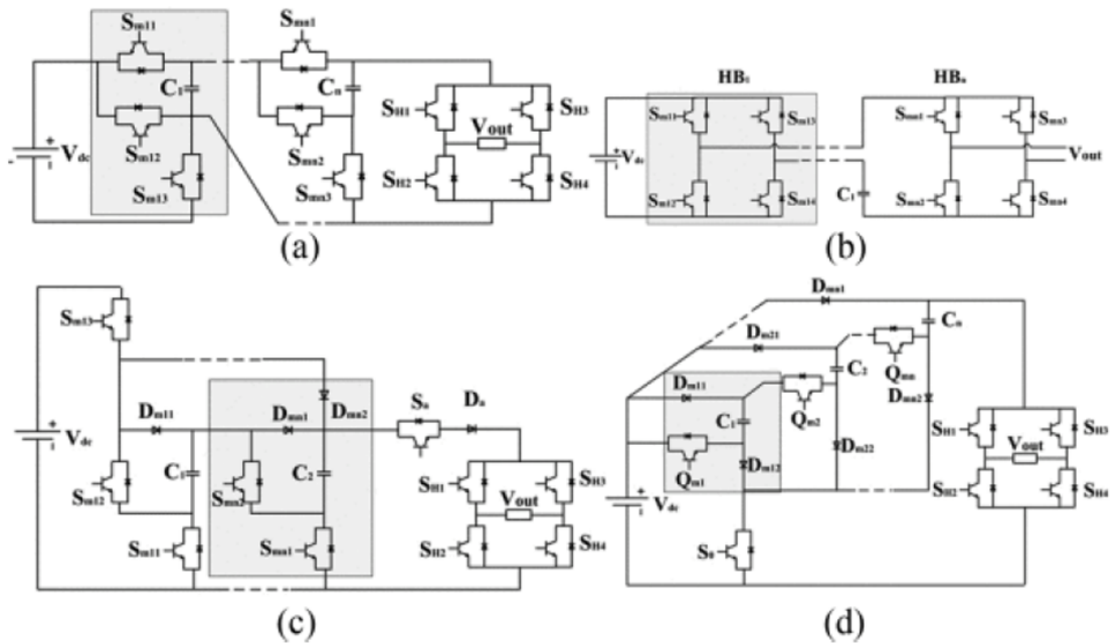


FIGURE 2.12 – Exemples des topologies des onduleurs multiniveaux à condensateurs commutés

2.4.4 La topologie proposée d'onduleur multi-niveaux à CC

Dans le cadre de notre travail, on présente un nouveau circuit d'onduleur DC/AC multi-niveaux qui est basé sur une topologie de circuit à condensateur commuté avec un nombre réduit de composants (commutateur de puissance et condensateur) pour les applications à faible puis-

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

sance[163]. Grâce à sa topologie qui connecte plusieurs condensateurs à travers un ensemble de commutateurs, ce type d'onduleur permet d'augmenter la tension produite par le générateur photovoltaïque vers la charge [40]. Par conséquent, le nombre élevé de niveaux de tension qu' il peut être atteindre par cet onduleur permet de générer une tension la plus sinusoïdale possible et d'améliorer le taux d'harmoniques. Cette topologie d'onduleur consiste à mettre en cascade séquentiellement un convertisseur $DC - DC$ à gain de tension élevé et un onduleur $DC - AC$ d'une forme d'onde de tension de sortie sinusoïdale acceptable[6]. La commutation des interrupteurs permet d'additionner les tensions des condensateurs, qui atteignent une haute tension en sortie, tandis que les semi-conducteurs de puissance ne doivent supporter que des tensions réduites[146].

2.4.4.1 Définition

Au cours des dernières années, un autre groupe familial de topologies d'onduleurs DC/AC à plusieurs niveaux a évolué, connu sous le nom de topologies d'onduleurs à plusieurs niveaux à condensateur commuté. Ces topologies contiennent des composants (condensateurs et commutateurs à semi-conducteurs de puissance) agencés selon une configuration spécifique. La cellule de base est composée de commutateurs à semi-conducteurs de puissance, de diodes et de condensateurs. Ils peuvent générer un nombre élevé de niveaux de tension de sortie AC avec un gain de haute tension à partir d'une seule source d'entrée DC en utilisant moins de composants que les circuits des onduleurs multi-niveaux classiques[153]. Ces nouvelles topologies évoluées d'onduleurs à plusieurs niveaux réalisent une conversion de puissance en deux étapes. La première étape comprend un circuit à condensateur commuté qui est utilisé pour augmenter la tension d'entrée DC aux niveaux de tension souhaités (la tension apparaît à travers une série de condensateurs). Les interrupteurs de puissance associés sont commandés de manière à ce que la forme d'onde de sortie en escalier à plusieurs niveaux soit formée pendant le cycle positif de la sortie AC. La deuxième étape est un circuit en pont en H qui permet de changer la polarité de l'amplitude de la tension de sortie entre le positif et le négatif et vice versa. Ces topologies ont une fonction d'amplification de tension ; car avec une faible tension d'entrée, ils peuvent produire une tension de sortie AC d'une amplitude plus élevée[168]. La figure 2.13 montre la topologie du circuit de l'onduleur multi niveaux à condensateur commuté proposé OMNCC. L'onduleur proposé produire une tension supérieure à la tension d'entrée en commutant les condensateurs en série et en parallèle. La tension

de sortie maximale est déterminée par le nombre de condensateurs [17].

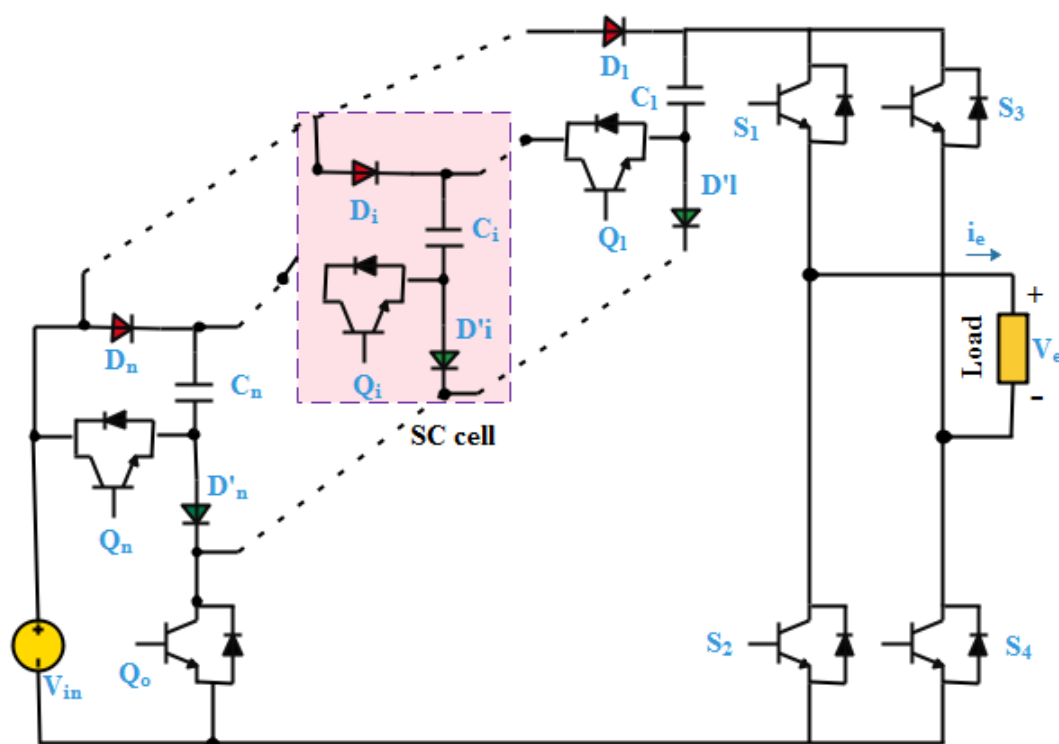


FIGURE 2.13 – La topologie du circuit de l'OMNCC proposé

Le circuit proposé de l' OMNCC présente des caractéristiques distinctes d'augmentation de tension et une sortie AC quasi sinusoïdale et peuvent donc transférer plus de puissance d'entrée vers la sortie[40]. Ce convertisseur possède des caractéristiques qui pourraient le rendre utile pour de nombreuses autres applications. Donc, la topologie de l'onduleur multi niveaux à condensateur commuté (OMCC) qui a été choisie permet de booster l'amplitude de tension et générer un multi niveau dans la sortie en une seule étape. Par conséquent, la complexité du système et les pertes de conversion sont diminuées. Son circuit contient une source de tension d'entrée V_i , n condensateurs $C_1 - C_n$, n diodes($D_1 - D_n$), $n^2 - 1$ interrupteurs et le circuit en pont en H contient quatre commutateurs ($S_1 - S_4$)[167].

La connexion série-parallèle est un autre type de connexion de circuit est utilisée dans les techniques des condensateurs commutés dont les cellules du circuit à condensateur commuté (C-C) peuvent être configurées en connexion série-parallèle afin qu'elles puissent effectuer un transfert d'énergie de l'une à l'autre pour obtenir une multiplication de tension. Ces cellules peuvent être

étendues à plusieurs étages pour générer un niveau et un gain de tension plus élevé [68]. Ce circuit proposé est appelé l'unité de base de OMMCC qui contient une alimentation en courant continu, un condensateur, une diode de puissance passive et deux commutateurs de puissance actifs qui ont un fonctionnement complémentaire les uns avec les autres. Des cellules photovoltaïques (PV), des batteries et des piles à combustible peuvent être utilisées comme alimentation électrique dans cette structure[166]. Dans le cadre de notre travail, nous traitons une structure d'onduleur de tension à neuf niveaux à condensateur commuté.

2.4.4.2 Principe de fonctionnement

L'idée principale de cette topologie d'onduleur est d'utiliser une technique de circuit simple appelée circuit à condensateur commuté (en Anglais appelée Switched Capacitor Circuit SCC) avec une technique de contrôle de modulation de largeur d'impulsion (MLI) à cycle de service variable de manière à ce que la tension à plusieurs niveaux puisse être réalisée à travers des condensateurs. Le condensateur commuté est la technique d'amplification de tension la plus connue. La figure 2.14 (a) montre une unité de base de cellule de circuit à condensateur commuté. Elle est formée par un condensateur, une diode et deux commutateurs actifs qui sont utilisés pour obtenir une forme d'onde DC multi-niveau contrôlée. Les interrupteurs S_a et S_b connectent le condensateur C en série et en parallèle avec une tension continue.

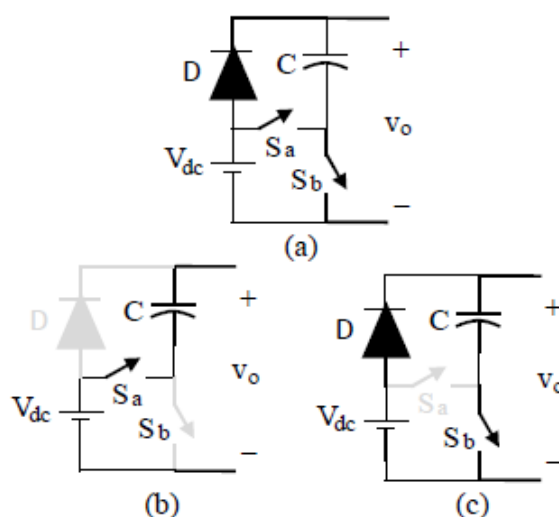


FIGURE 2.14 – (a) Unité de base de la cellule $C - C$ du série/parallèle conversion, (b) Mode de décharge du condensateur, (c) mode de charge du condensateur

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

Les interrupteurs S_a et S_b ont un fonctionnement complémentaire ce qui signifie que lorsque l'interrupteur S_a est fermé, l'interrupteur S_b doit être ouvert et vice versa. Sinon, un court-circuit se produit aux bornes de la tension continue. Les figures 2.14(b) et (c) montrent les opérations de charge et de décharge du condensateur C respectivement. Les commutateurs S_a et S_b sont utilisés dans les opérations de conversion en série et en parallèle. Lorsque l'interrupteur S_b est activé pendant la première moitié du cycle de commutation, le condensateur est connecté en parallèle avec la source de tension d'entrée donc il est chargé à une tension continue $V_a = V_{dc}$ via une diode conductrice, D_i . Pendant la seconde moitié du cycle de commutation, le condensateur est connecté en série avec la source de tension d'entrée. L'interrupteur S_a est fermé et le condensateur commence à se décharger. La diode D_i devient polarisée en inverse pour empêcher la décharge arrière vers la source de tension continue. La source de tension continue est connectée en série avec le condensateur chargé C_i , et par conséquent sa tension peut être ajoutée, c'est-à-dire $V_a = V_{dc} + V_{ci}$ tandis que le courant du condensateur C circule vers la charge. Pour atteindre un nombre plus élevé de niveaux de tension, plusieurs étages du circuit C-C doivent être connectés en cascade. Il est évident que l'unité de base proposée ne nécessite aucun circuit de commande d'équilibrage de charge supplémentaire, ce qui est l'avantage majeur de cette structure. Si on a n condensateurs, on peut avoir une tension de sortie entre $+(n + 1)V_{in}$ et $-(n + 1)V_{in}$, mais certaines topologies d' OMNCC ne peuvent pas atteindre ces limites[36]

En effet, l'onduleur à condensateur commuté proposé avec une seule source DC d'entrée peut augmenter la tension sans utiliser d'inductance ou de transformateur avec capacité d'auto-équilibrage de la tension. Cette topologie peut être utilisée pour obtenir un nombre quelconque de niveaux à l'aide d'opérations de conversion série-parallèle à partir d'une tension d'entrée.

Dans la topologie OMNCC, la tension équilibrée de chaque condensateur doit être donnée par l'équation suivante après avoir supposé que le nombre de condensateurs est n [170] :

$$V_{Ck} = kV_{dc} \quad \text{pour } k = 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

La tension de sortie maximale et le nombre de niveaux de tension de sortie produits sont calculés selon n par les équations suivantes :

$$V_{O_{Max}} = (n + 1)V_{dc} \quad (2.7)$$

$$N_{niveau} = 2n + 3 \quad (2.8)$$

Sur cette base, la décharge maximale de chaque condensateur (C_1 , C_2 et C_3) est déterminée en utilisant l'équation suivante [127] :

$$Q_{c_i} = \int_{t_{1_i}}^{t_{2_i}} I_s \sin(2\pi f_0 t) dt \quad (2.9)$$

I_s est l'amplitude du courant de sortie.

f_0 est la fréquence de sortie fondamentale.

$[t_{1_i}, t_{2_i}]$ est la plus longue décharge période pour le condensateur C_i .

Les signaux de commutations peuvent être générés par une technique de modulation (MLI) basée sur la porteuse haute fréquence.

2.4.4.3 Modélisation d'un onduleur neuf niveaux à condensateur commuté

La figure 2.15 indique la structure de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté [170], qui est réalisé en mettant en cascade deux circuits, un convertisseur à condensateur commuté C-CC (switched capacitor converter SCC en Anglais) et un onduleur à deux niveaux (pont complet) [148, 171, 35]. Celui-ci doit d'abord être converti en une tension continue élevée avant d'être converti en courant alternatif. De ce fait, l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté est composé d'une source de tension issue des panneaux solaires V_{pv} , de trois condensateurs, de trois diodes et de huit interrupteurs de type IGBT [39].

Les condensateurs se chargent lorsqu'ils sont associés en parallèle avec la source de tension d'entrée. Lorsqu'ils sont connectés en série, les condensateurs se déchargent [165].

L'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté peut fournir une tension de sortie quatre fois supérieure à la tension d'entrée. Les états de commutation des différents interrupteurs et les états de charge des condensateurs de chaque mode de cet onduleur sont résumés dans le tableau 2.2 :

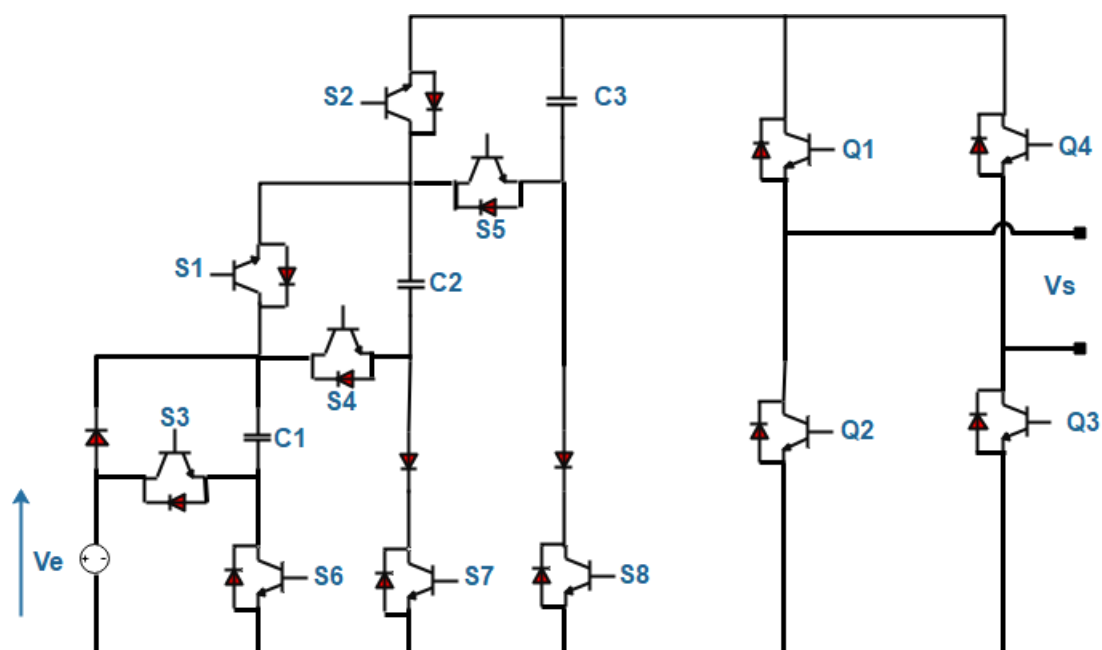


FIGURE 2.15 – Topologie d’une phase d’un l’onduleur neuf niveaux à condensateur commuté

TABLE 2.2 – États des commutateurs et des condensateurs.

	V_{pv}	$2V_{pv}$	$3V_{pv}$	$4V_{pv}$
C_1	C	D	-	-
C_2	-	C	D	-
C_3	-	-	C	D
S_1	1	1	0	1
S_2	1	1	1	0
S_3	0	1	0	0
S_4	0	0	1	0
S_5	0	0	0	1
S_6	1	0	0	0
S_7	0	1	0	0
S_8	0	0	1	0

Les nombres 0 et 1 dans le tableau 2.2 correspondent respectivement aux états de commutation OFF et ON, tandis que C et D font référence au condensateur mode de charge et de décharge, respectivement.

L’expression de la tension de sortie du convertisseur à condensateur commuté est donnée par les equations suivants [126] :

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

- **Mode 1** : Le condensateur C_1 est chargé à V_{in} lorsque l'interrupteur S_6 devient ON . Les interrupteurs S_1 et S_2 transfèrent simultanément ce niveau de tension à la sortie. L'expression de la tension de sortie du bus CC est :

$$V_{bus-DC} = V_{c1} = V_{in} \quad (2.10)$$

- **Mode 2** : Grâce au commutateur S_7 , le condensateur C_2 est chargé à partir de V_{in} et la tension V_{c1} aux bornes du condensateur C_1 (le condensateur C_1 est déchargé). Le deuxième niveau de la tension de sortie du bus CC est généré via S_1 , S_2 et S_3 :

$$V_{bus-DC} = V_{in} + V_{c1} = 2V_{in} = V_{c2} \quad (2.11)$$

- **Mode 3** : Dans ce mode, le condensateur C_3 est chargé par $V_{in} + V_{c2}$ via l'interrupteur S_8 et la décharge de C_2 . Les trois niveaux de tension générés à la sortie via S_2 et S_4 simultanément sont égaux à $3V_{in}$

$$V_{bus-DC} = V_{in} + V_{c2} = 3V_{in} = V_{c3} \quad (2.12)$$

- **Mode 4** : Dans ce mode, sans ajouter un autre condensateur au circuit, les interrupteurs S_1 et S_5 permettent de transférer la tension stockée de C_3 en sortie comme indiqué ci-dessous :

$$V_{bus-DC} = V_{in} + V_{c3} = 4V_{in} \quad (2.13)$$

Il est important de noter que le condensateur C_1 est rechargé directement par la source de tension d'entrée pour produire le premier niveau de tension et cette opération consécutive continue ainsi de suite.

La figure 2.16 donne une description détaillée du mode de fonctionnement du ONNCC selon le tableau 2.2, qui résume les états des interrupteurs de puissance à chaque niveau produit avec le cheminement du courant dans les quatre états différents.

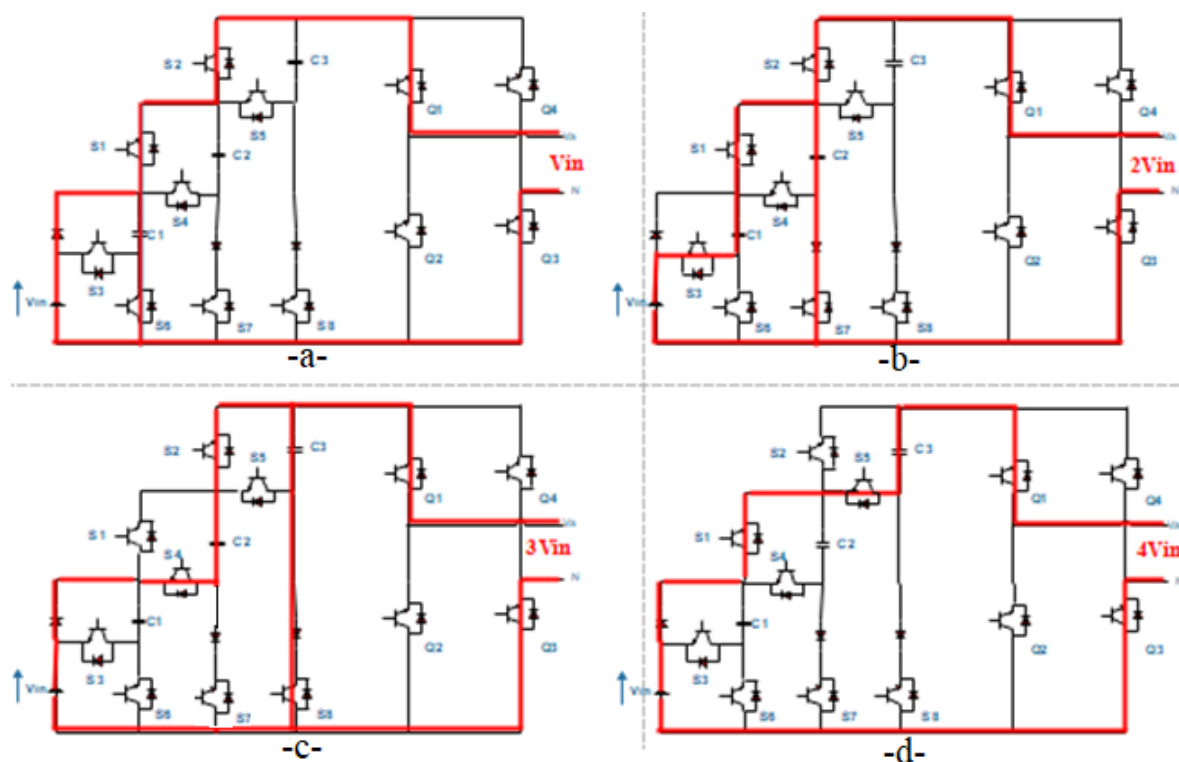


FIGURE 2.16 – Flux de courant : (a) premier niveau généré ; (b) deuxième niveau généré (c) troisième niveau généré (d) quatrième niveau généré

Il est évident que la polarité de la tension de sortie de circuit de condensateur commuté est positive. Donc, une unité de pont en H sera nécessaire d'ajoutée à la sortie de ce convertisseur comme montre la figure ci-dessus pour obtenir la forme d'onde négative dans la deuxième moitié de période T .

2.4.5 Comparaison des topologies des onduleurs multi niveaux

Dans le tableau 2.3, nous comparons les différentes topologies des onduleurs à neuf niveaux y compris les onduleurs à diode bloquée, les onduleurs à condensateur flottant, les onduleurs à pont en H en cascade et les onduleurs à condensateur commutés. Cette étude comparative est réalisée en termes de gain, de nombre de diodes et d'IGBT utilisés, de nombre de condensateurs et de nombre de source DC utilisé pour une phase.

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

TABLE 2.3 – Comparaison de différentes topologies d'un onduleur à neuf niveaux

Topologie	NPC	FC	CHB	CC
Transistors IGBT	16	16	16	12
Diodes	14	0	0	3
Condensateurs du bus DC	8	8	4	1
Condensateur Principeaux	0	9	0	3
Sources DC	1	1	4	1
Gain de V	1/2	1/2	1	4

D'après ce tableau, on peut remarquer que l'onduleur CC à neuf niveaux proposé permet de produire une amplification de gain de conversion très élevée sans utiliser un transformateur avec un nombre de semi-conducteurs et de condensateurs très réduits. Par conséquent, il nécessite moins de panneaux photovoltaïques connectés en série pour maintenir la tension de liaison CC requise, ce qui améliore les performances du MPPT ainsi que son efficacité. De plus, la structure modulaire de cette topologie permet facilement d'augmenter le nombre de niveaux de tension de sortie, ce qui conduit à une amélioration de la qualité de la sortie avec taille de filtre réduite [36].

Pour les onduleurs multi niveaux à topologie NPC et FC, la tension avant le filtrage a la forme d'onde en escalier avec une valeur maximale égale $V_{dc}/2$. Ils ont donc besoin de transformateur élévateur pour les systèmes photovoltaïques de basses tension. Par contre, l'onduleur en cascade à pour obtenir la même valeur de tension de sortie, il n'a besoin que la moitié de la valeur d'entrée de deux topologies. L'un des avantages de ce dernier est qu'il utilise moins de composants par rapport à l'onduleur à topologie à diodes clampées et à condensateur flottant, de sorte que le prix et le poids de l'onduleur en cascade sont inférieurs à ceux de ces types[172]. Quant à la topologie de condensateur commuté, elle n'a besoin que d'un seul générateur et le nombre total de composants actifs et passifs nécessaires à la réalisation d'une sortie à neuf niveaux est inférieur à celui des OMN conventionnels. Par conséquent, le coût et la taille de l'onduleur proposé sont inférieurs. Mais jusqu'à présent, il n'y a pas de structure unique qui puisse répondre à différentes exigences des charge, chaque topologie a des avantages et des inconvénients.

2.5 Les stratégies de commande des convertisseurs multi niveaux

Les efforts de recherche dans le domaine des convertisseurs multi-niveaux se concentrent principalement sur les techniques de modulation [62, 27] et les méthodes d'équilibrage de tension de condensateur[151, 152], alors que peu d'attention est accordée au potentiel de densité de puissance élevée[19].

Dans cette partie, nous présentons quelques techniques de commande des onduleurs à plusieurs niveaux, de nombreuses stratégies de modulation sont très efficaces et plus intéressantes [10]. Ces stratégies sont généralement dérivées de celles du contrôle de structure à deux niveaux. La performance d'une technique de modulation est caractérisée par sa capacité à générer un signal proche du signal de référence [26].

Une étude approfondie réalisée par des chercheurs dans l'article[22] dans laquelle ils ont présenté toutes les méthodes possibles pour contrôler les onduleurs multi-niveaux et mis en évidence la technique MLI. Une classification de ces méthodes de modulation bien décrit par ces chercheurs est présentée dans la figure 2.17. Les algorithmes de modulation sont divisés en deux groupes principaux selon le domaine dans lequel ils opèrent : le domaine vectoriel de l'espace d'état, dont le principe de fonctionnement est basé sur la génération de vecteur de tension, et le domaine temporel, dans lequel la méthode est basée sur le niveau de tension générer sur une période donnée[22].

De plus, les différentes méthodes peuvent être classés en fonction de la fréquence de commutation qu'ils produisent. En général, les méthodes à faible fréquence de commutation sont préférées pour les applications à haute puissance en raison à la réduction des pertes de commutation, tandis que la meilleure qualité de puissance de sortie des algorithmes à fréquence de commutation élevée convient mieux aux applications à plage dynamique élevée.

Donc, les techniques les plus populaires sont :

1. Les méthodes de modulation des largeurs d'impulsions aussi appelées MLI sinusoidal ;
2. Les méthodes de modulation vectorielle spatiale (SVM) ;
3. Les méthodes de modulation Sigma Delta (SDM) ;

4. Les stratégies de modulation hybride qui combinent deux ou plusieurs méthodes.

2.5.1 Technique de Modulation de Largeur d'Impulsions MLI

2.5.1.1 Définition

En raison de haute performance de la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI sinusoïdale (en Anglais : Sinusoidale Pulse Width Modulation SPWM) qu'est la plus souvent utilisée pour contrôler les onduleurs à deux niveaux, elle est aussi utilisée dans les onduleurs multi-niveaux. Son principe basé sur la modulation sinusoïdale classique[7]. Les techniques MLI traditionnelles ont été étendues avec succès aux topologies de convertisseurs multi-niveaux, en utilisant plusieurs porteuses pour contrôler les commutateurs de puissance du convertisseur[6]. Par conséquent, elles sont connues sous le nom de méthodes MLI multi porteuses, comme le montre la figure 2.17. Le contrôle MLI consiste à diviser la tension de sortie produite par le convertisseur en une série de modèles de base avec des périodes très courtes et des cycles de service variant dans le temps. Un signal modulant, généralement sinusoïdal, est utilisé pour calculer l'évolution temporelle du rapport cyclique de chaque interrupteur. La commande pour chaque cellule est générée par le croisement de la porteuse et de ce signal modulant. Chaque commutateur est commuté à une fréquence déterminée par la fréquence de l'onde porteuse. Cette méthode de commande nous permet de :

- Déplacer les harmoniques de la tension de sortie vers des fréquences plus élevées ;
- modifier la valeur de la composante fondamentale de la tension de sortie ;

Pour les onduleurs dont les étages N sont supérieurs à 3, la technique sinusoïdale classique utilisant un signal monoporteuse ne permet pas de générer tous les signaux de commande nécessaires. Il s'agit donc d'une modulation sinusoïdale multiporteuse. Cette technique nécessite (N-1) signaux porteuses de même fréquence f_p et de même amplitude A_p [151]. Toutes les stratégies de contrôle MLI multi-porteuses sont caractérisées par deux paramètres clés :

1. L'indice de modulation m_f est défini comme le rapport de la fréquence de tension de la porteuse f_p à la fréquence de la tension de référence f .

$$m_f = \frac{f_p}{f} \quad (2.14)$$

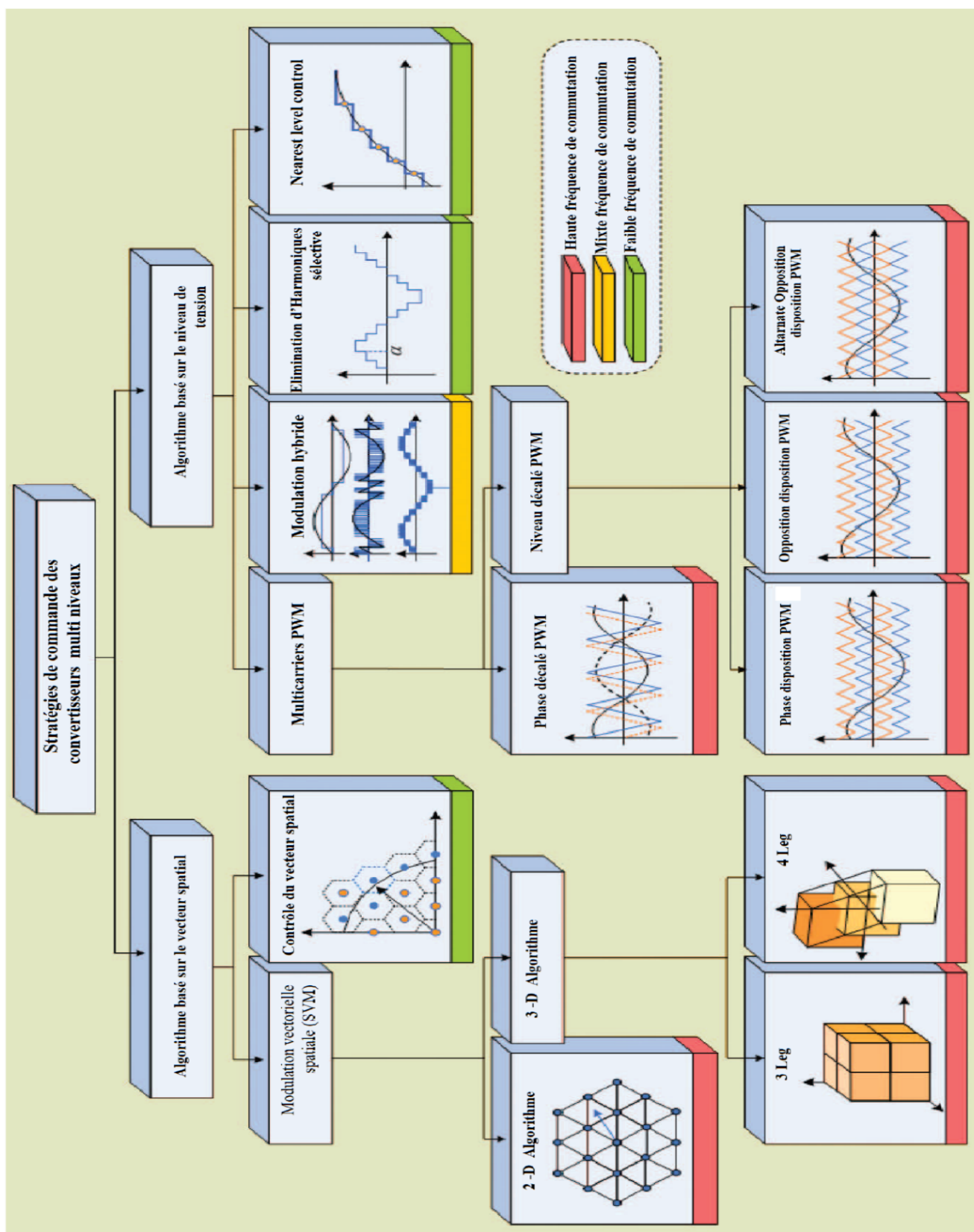


FIGURE 2.17 – Classification de la modulation de l'onduleur multi-niveaux

- l'indice de modulation m_a , qui est le rapport de l'amplitude maximale de la tension de référence V_m à l'amplitude maximale de la porteuse A_p .

$$m_a = \frac{v_m}{PA_P} \quad (2.15)$$

où : P est le nombre de porteuses utilisées.

2.5.1.2 Les différentes techniques MLI sinusoïdales

2.5.1.2.1 Classification des techniques MLI sinusoïdales selon le type de porteuse

Les techniques de modulation multi porteuses peuvent être classées selon le type de porteuse [173] à quatre types comme le montre la figure 2.18, telles que :

- 1. Modulation MLI avec porteuses triangulaires :**

Ce principe est de comparer le signal de référence $V_{réf}$ de forme sinusoïdal avec le signal de porteuses V_p de forme triangulaire figure 2.18(a), cette comparaison compte sur les intersections.

- 2. Modulation MLI avec porteuses en dents de scie :**

L'onde en dents de scie est le signal périodique qui est généré arbitrairement et peut être obtenu à partir de l'onde porteuse de la séquence répétée et il est illustré à la figure 2.18 (b). Dans cette technique, les signaux de commutations sont générés en comparant les ondes de dents de scie avec signal modulant sinusoïdal.

- 3. Modulation MLI multi porteuse unipolaire sinusoïdal :**

Dans cette technique, le signal sinusoïdal est converti en signal sinusoïdal unipolaire. Les demi-cycles négatifs entiers de la forme d'onde sont convertis en demi-cycles positifs avec la même amplitude et fréquence. Ce signal est le même que celui de la sortie de la redresseuse pleine onde. c'est-à-dire que le signal n'a que des demi-cycles positifs continus. Ceci est appelé onde sinusoïdale unipolaire et est illustré à la Figure 2.18(c).

- 4. Modulation Sinusoïdale MLI multi porteuse sinusoïdale :**

Dans cette technique, les impulsions MLI sont générées en raison de l'interférence des signaux de modulation et de porteuse sinusoïdaux. Ici, le signal modulant et le signal

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

porteur sont tous deux sinusoidaux. La forme d'onde porteuse sinusoidale est illustrée à la Figure 2.18(d). En ce que l'amplitude et la fréquence des deux signaux est différente. Les impulsions sont générées lorsque l'amplitude du signal modulant est supérieure à celle du signal porteur.

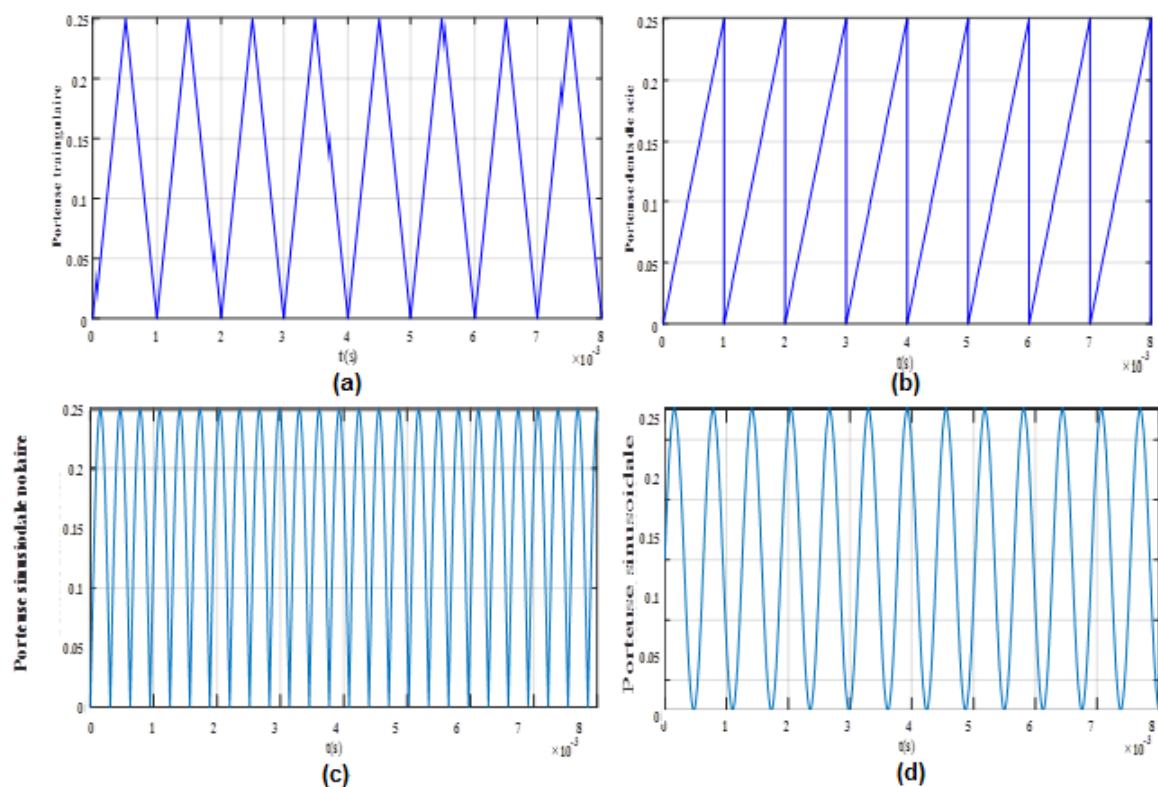


FIGURE 2.18 – différents signaux de Porteuses : (a) triangulaire, (b) dents de scie , (c) sinusoidale unipolaire, (d) sinusoidale

Pour un onduleur à trois niveaux, il est suffi d' utiliser deux signaux porteuses de même fréquence f_p et de même amplitude A_p avec une disposition differente . Pour chaque phase, ils sont comparés à l'aide d'un signal de référence d'amplitude V_m et de fréquence f . Il s'agit d'une modulation sinusoidale à double porteuses..

2.5.1.2.2 Classification des techniques MLI sinusoidales selon le décalage des porteuses

Les techniques de modulation de largeur d'impulsion MLI peuvent être classées en deux groupes principaux selon le décalage des porteuses utilisées :

1. Modulation de largeur d'impulsion déphasée (MLI-DP)

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

La modulation de la largeur d'impulsion déphasée, également connue sous le nom de PS-PWM, est une méthode de commutation bien connue pour les onduleurs à plusieurs niveaux qui utilise la technique du décalage de phase pour diminuer les harmoniques de tension de sortie d'onduleur.[36]. Elle assure une distribution de puissance égale (entre les modules opérationnels) et des commutations égales dans tous les semi-conducteurs de chaque module donné, mais cette technique sera plus difficile pour un nombre plus élevé de commutation.

2. Modulation de largeur d'impulsion à décalage de Niveaux(MLI-DN)

La méthode MLI sinusoïdale avec des porteuses décalées l'une par rapport à l'autre d'un niveau de tension est la plus populaire dans les applications industrielles(En Anglais appelé :LS-PWM)[155].

Par exemple, un onduleur à neuf niveaux utilise huit porteuses identiques, décalées l'une par rapport à l'autre d'un niveau de tension U_p . Le système d'équations suivant représente les équations de ces huit porteuses :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{p1}(t) = \begin{cases} 2U_{pm}\frac{t}{T_p} & : 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ 2U_{pm}(\frac{t}{T_p} - 1) & : \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \\ U_{p2} = U_{p1}(t) + U_{pm} \\ U_{p3} = U_{p1}(t) + 2U_{pm} \\ U_{p4} = U_{p1}(t) + 3U_{pm} \\ U_{p5} = U_{p1}(t) - U_{pm} \\ U_{p6} = U_{p1}(t) - 2U_{pm} \\ U_{p7} = U_{p1}(t) - 2U_{pm} \\ U_{p8} = U_{p1}(t) - 4U_{pm} \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Les huit signaux de porteuses en phase de $m_f = 8$ et $m_a = 0.8$ avec le signal de référence $V_{réf}$ sont représentés dans la figure 2.19 :

2.5.1.2.3 Classification de MLI sinusoïdales selon la disposition des porteuses utilisées

Les techniques de modulation multi porteuses peuvent être divisées dans les catégories suivantes[126] :

1. Disposition de phase (PD) où toutes les porteuses sont en phase ; figure 2.20.(a) et figure

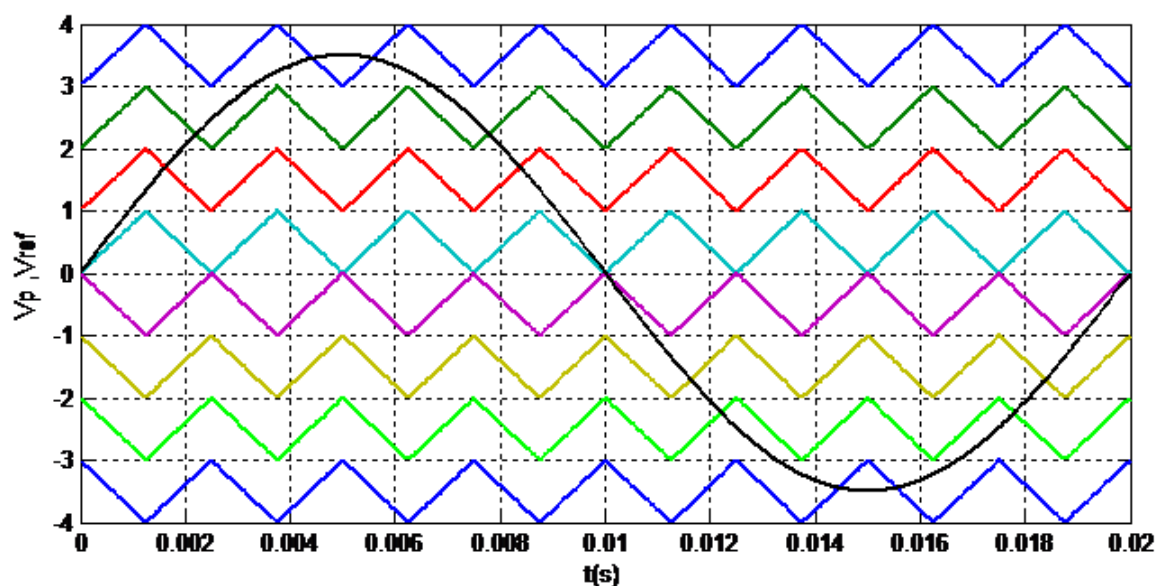


FIGURE 2.19 – Principe de la MLI triangulo-sinusoidal à 8 porteuses 2.21(a).

2. Disposition en phase inversée (IPD) où toutes les porteuses sont en phase et sont inversées ;figure 2.20(b) et figure2.21.(b).
3. Disposition en opposition de phase (POD) où les porteuses au-dessus de zéro sont en phase mais décalées de 180 degrés par rapport aux porteuses en dessous de zéro, figure 2.20.(c) et figure2.21.(c).
4. Disposition alternative en opposition de phase (APOD) où chaque porteuse est décalée de 180 degrés par rapport au porteuse adjacente[63] ; figure 2.20.(d) et figure 2.21.(d).

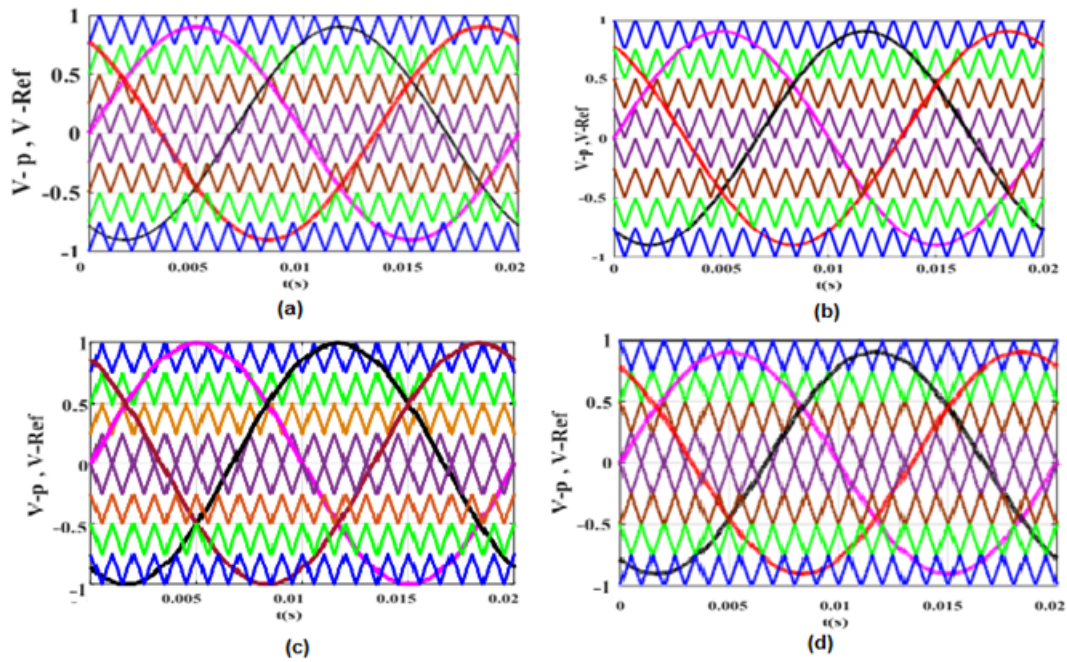


FIGURE 2.20 – Modélisation MLI triangulo-sinusoidal à 8 porteuses : (a)PD, (b)IPD, (c)POD, (d)APOD

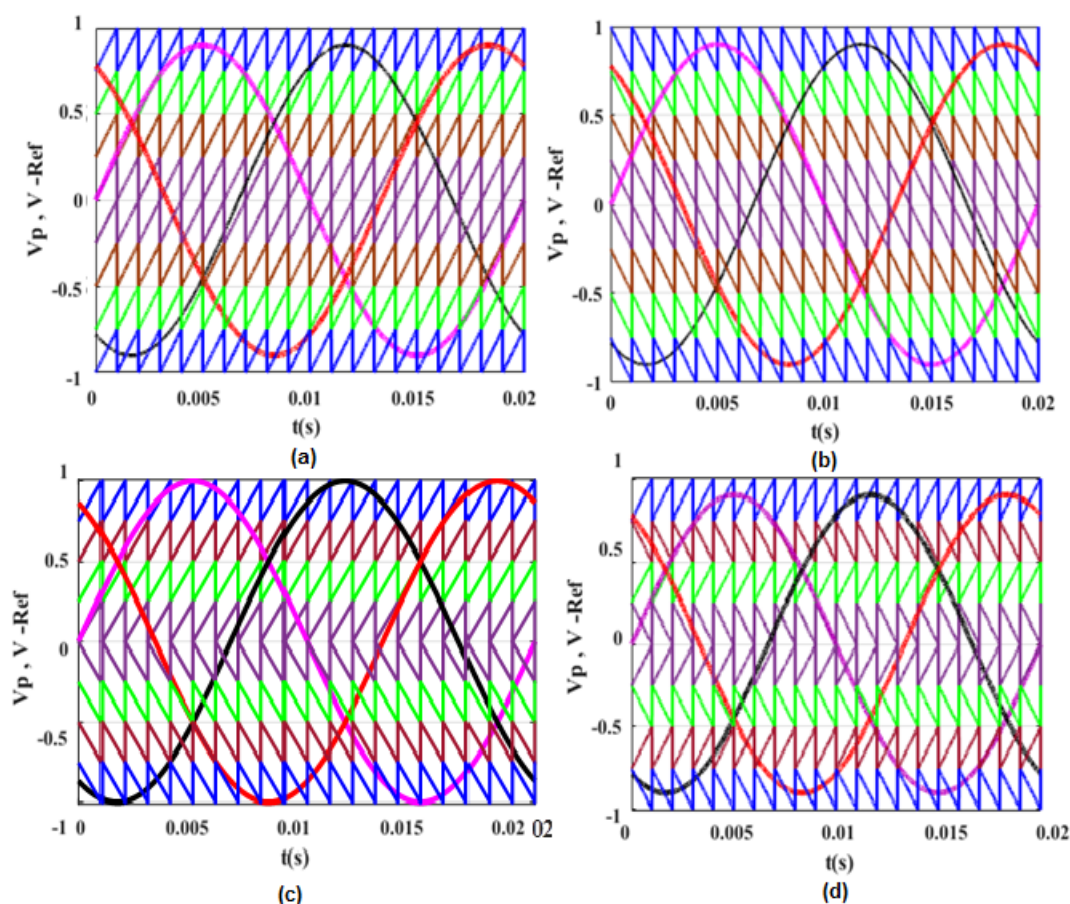


FIGURE 2.21 – Modulation MLI dents de scie -sinusoïdal à 8 porteuses : (a)PD, (b)IPD, (c)POD, (d)APOD

2.5.2 Modulation MLI vectorielle

La MLI vectorielle aussi appelée la modulation vectorielle spatiale (SVM) est une technique dans laquelle la tension de référence est représentée comme un vecteur de référence à générer par le convertisseur de puissance. En effet, à la différence de la MLI sinusoïdale, cette technique de modulation permet de calculer les vecteurs à appliquer et les temps d'application à partir des états de commutation de l'onduleur. La technique SVM génère le vecteur de référence de tension comme une combinaison linéaire des vecteurs d'état obtenant une tension de sortie moyenne égale à la référence sur une période de commutation [22]. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions de cet onduleur[22].

Il est possible d'obtenir une fréquence de commutation relativement élevée avec une fré-

Chapitre 2. Différentes topologies des onduleurs multi- niveaux

quence réduite au niveau de composante quant les vecteurs sont choisis correctement et appliqués dans l'ordre approprié.

Les signaux de commandes sont créés en tenant compte des états des trois bras de l'onduleur en même temps, ce qui la distingue des autres techniques intersectives. Tous les états de commutation possibles discrets du convertisseur conduisent à des tensions de sortie discrètes et ils peuvent également être représentés comme les vecteurs de tension possibles (généralement appelés vecteurs d'état) qui peuvent être atteints comme montre la figure 2.22.

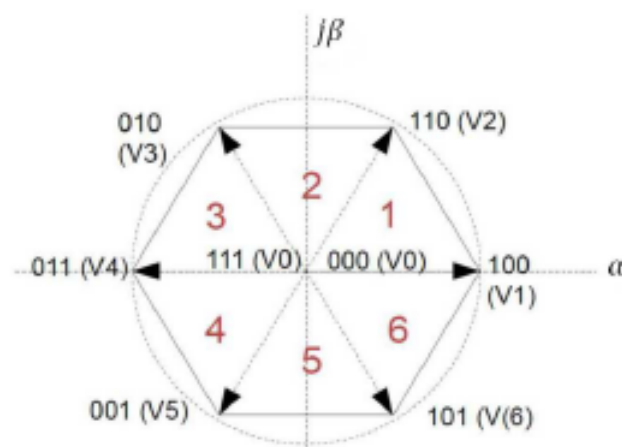


FIGURE 2.22 – Représentation des vecteurs de tension de l'onduleur.

Ces techniques fournissent les vecteurs d'état les plus proches du vecteur de référence formant la séquence de commutation et calculent les rapports cycliques correspondants à l'aide de calculs extrêmement simples sans impliquer de fonctions trigonométriques, de tables de consultation ou de transformations de système de coordonnées.

2.5.3 Élimination d'Harmoniques sélective

On peut citer parmi ces méthodes de commande celles appelées « MLI à Sélection d'Harmoniques à éliminer SHE » dont elle est l'objet de plusieurs études. Les instants de commutation des interrupteurs (séquences de fonctionnement) sont calculés en fonction de certains critères qui affectent le spectre fréquentiel de l'onde produit par l'onduleur[17].

Ensuite, ces séquences de fonctionnement sont mémorisées et restituées de manière cyclique afin de garantir la commande des interrupteurs. Afin d'améliorer considérablement la qualité de leurs tensions de sortie, cette technique de modulation est une méthode très efficace et

cruciale pour la commande d'onduleurs à deux niveaux. Elle consiste à former l'onde de sortie de l'onduleur à partir d'une succession de créneaux de différentes largeurs [34].

2.5.4 Modulation de niveau le plus proche

Les commutateurs IGBT du OMN sont contrôlés à l'aide d'un schéma de commutation de fréquence fondamentale appelée modulation de niveau le plus proche MNP. Dans cette méthode (En Anglais NLM), les impulsions de commutation pour déclencher les IGBT pour synthétiser un niveau de tension donné sont obtenues en comparant l'onde sinusoïdale de référence avec le niveau de tension précédent ajouté à la valeur constante la plus proche pouvant aller de 0,1 à 1, comme illustré à la Figure 2.23. Il a été établi qu'une valeur constante NLM de 0,4 est optimale puisque la distorsion harmonique totale et l'amplitude des harmoniques d'ordre inférieur sont inférieures à une valeur de 0,4 comme observé sur la figure suivante :

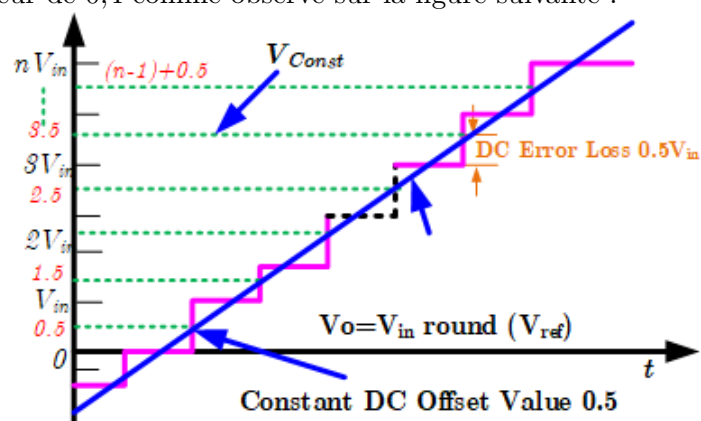


FIGURE 2.23 – Représentation de modulation de niveau le plus proche

2.6 Conclusion

Les convertisseurs multi-niveaux ont ouvert la voie aux progrès dans la technologie de conversion d'énergie photovoltaïque, non seulement dans les applications de haute puissance, mais aussi pour les applications de moyenne et basse puissance, car ils ont une plus grande efficacité par rapport aux convertisseurs à deux niveaux conventionnels. Ils représentent les avantages d'une faible distorsion harmonique. Dans ce chapitre, on a présenté les différents types des onduleurs multi-niveaux classiques. Les limites de ces OMN sont le plus grand nombre des composants, plusieurs tensions d'entrée et souffrent des problèmes d'équilibrage de l'auto-tension des condensateurs, des problèmes d'équilibrage de tension CC et une complexité de contrôle pour des niveaux accrus lors de l'injection de l'énergie PV dans le réseau.

Par conséquent, une autre branche des OMN pour remédier à ces contraintes est l'onduleur à condensateur commuté (OMCC). Il combine les fonctions d'amplification de tension et de produire plusieurs niveaux de tension auto-équilibrés en courant alternatif à partir d'une seule source CC et moins composants. Par rapport aux topologies existantes, cette topologie comprend un nombre minimum de commutateurs et un certain nombre minimum de signaux de porteuse afin de générer les niveaux requis. Cela réduit à son tour la complexité globale du système. Il ne nécessite pas de réseaux d'équilibrage de tension. Les approches de contrôle d'un système PV raccordé au réseau électrique via à un onduleur à neuf niveaux à condensateur commuté CC sont présentées dans le chapitre qui ce suit.

**CHAPITRE III : Nouvelle stratégie
de minimiser les harmoniques des
onduleurs multi-niveaux**

« la spécialisation est la base
de l'excellence à l'ère de la
science. »

Ahmed Zewail

3

Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

Sommaire

3.1	Introduction	97
3.2	Les harmoniques dans les réseaux électriques	98
3.2.1	Définition des harmoniques	98
3.2.2	L'origine des harmoniques	98
3.2.3	L'étude analytique du harmoniques	99
3.2.4	Les effets des harmoniques sur les réseaux électriques	102
3.3	Différentes techniques de minimiser les harmoniques	103

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

3.3.1	Techniques de filtrage des harmoniques	103
3.3.2	Réduction des harmoniques par les onduleurs MN	103
3.3.3	Les techniques basées sur la Modulation de commande	104
3.3.4	Réduction des harmoniques par des techniques d'optimisation	106
3.4	Nouvelle technique de Réduction des harmoniques	107
3.4.1	Le principe de la nouvelle technique MLIS	107
3.4.2	La description de la stratégie proposée	108
3.5	L'algorithme d'optimisation de RTO	109
3.5.1	Définition	109
3.5.2	Paramètres de l'algorithme RTO	110
3.5.3	Processus de l'algorithme RTO appliqué sur la technique MLIS	113
3.6	Les stratégies de commande de notre système PV	115
3.6.1	Contrôle côté générateur PV	117
3.6.2	Contrôle coté réseau	122
3.7	Conclusion	132

3.1 Introduction

L'exceptionnelle croissance des systèmes PV connectés au réseau de distribution se traduit clairement par les importantes innovations technologiques en particulier dans le secteur de l'électronique de puissance et des réductions du coût des modules PV. Ainsi, à cause que l'énergie solaire, abondante et non polluante, est l'une des sources les plus prometteuses et sa qualité doit être maintenue en utilisant des composants de conversion de puissance très efficaces qui peuvent éliminer toute distorsion ou encombrement dans le système[53]. En effet, les problèmes de qualité d'énergie tels que la distorsion de la forme d'onde (tension/courant), la dégradation du facteur de puissance sont générées par les harmoniques qui ont affecté le réseau ainsi que le secteur des services publics [4]. Depuis plusieurs années, une importance a été donnée pour l'étude des techniques de commande des onduleurs multi niveaux [68, 148] afin de réduire les harmoniques. Ces techniques constituent un domaine de recherche relativement nouveau et nécessitent encore beaucoup de développement et d'optimisation du point de vue du contrôle afin d'augmenter l'efficacité et améliorer les signaux de sortie de ces convertisseurs [16].

Nous avons étudié dans le chapitre précédent l'onduleur multi niveaux à condensateur commuté qu'il offre des avantages en termes de qualité et de prix, de plus, dans ce chapitre nous allons améliorer son efficacité en appliquant une nouvelle technique MLI sinusoïdale basée sur le calcul optimum des angles initiaux du signaux des porteuses afin de commander les différents interrupteurs semi-conducteurs de l'onduleur neuf niveaux à CC. La nouvelle méthode appelée Rooted Tree Optimisation (RTO)[174]est proposée comme une technique d'optimisation de résolution des systèmes d'équations non linéaires pour déterminer les optimaux angles initiaux des porteuses qui permet de minimiser les harmoniques injectés au réseau électrique. Ce chapitre commence par le concept général des harmoniques et des solutions de les diminuer, ensuite, nous aborderons en détail l'élaboration de la nouvelle stratégie de modulation RTO-MLI proposée. Ainsi, on a entamé également les techniques de contrôle utilisées dans le système PV raccordé au réseau électrique à la fin de ce chapitre.

3.2 Les harmoniques dans les réseaux électriques

3.2.1 Définition des harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes qui affectent la forme d'onde de la tension ou du courant. De manière générale, les harmoniques ne proviennent pas de la source d'alimentation, la centrale produisant une tension parfaitement sinusoïdale, ils sont provoqués par la présence des charges électriques non linéaires dans le réseau [175]. En effet, le problème de la pollution harmonique dans le réseau de distribution est devenu en plus inquiétant avec l'utilisation accrue des charges non linéaires. Ces perturbations sont dues au fait que l'onde polluante superposée à l'onde fondamentale est aussi l'onde polluante est sinusoïdale mais dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale (100, 150, 200, 250... etc.). En pratique on s'intéresse qu'aux harmoniques significatifs [175, 176]. Ainsi, il y a d'autres types des harmoniques [177], la première appelée les inter-harmoniques qui sont des signaux de fréquence non multiples entiers de la fréquence fondamentale (130Hz, 170Hz, 220Hz...) c'est-à-dire situées entre les harmoniques. Les autres ce sont les infra harmoniques dans lequel représentent des composantes sinusoïdales des fréquences inférieures à celles du fondamentales : 10Hz, 20Hz, ...ect.

3.2.2 L'origine des harmoniques

Les principales sources des harmoniques sont les lampes fluorescentes, les équipements informatiques, les appareils électroménagers (télévisions, nombreux appareils électroménagers), les arcs et tous les convertisseurs statiques connectés au réseau, tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes provoquent une pollution harmonique des réseaux auxquels connectés. En effet, ces systèmes tirent des courants non sinusoïdaux malgré qu'ils sont alimentés par des tensions sinusoïdales. Les charges non linéaires de ces appareils produisent des courants harmoniques qui sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale [175].

3.2.3 L'étude analytique du harmoniques

Afin de faciliter l'étude et l'analyse du signal déformé, celui-ci peut être décomposé en somme des signaux sinusoïdaux, **JOSEPH FOURIER** au début du 19^{ème} siècle[175] a prouvé que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou une série d'ondes sinusoïdales du fréquences discrètes (multiples) dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale (typiquement 50 ou 60 Hz)[178] :

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)) \quad (3.1)$$

On note que :

$\frac{a_0}{2}$ est la composante continue.

a_n et b_n sont les amplitudes crêtes des composantes harmoniques de rang n.

ω est la pulsation fondamentale.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \quad (3.2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (3.3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (3.4)$$

Donc, la transformée fréquentielle de Fourier (FFT) permet de convertir un signal dans le domaine fréquentiel à partir du domaine temporel, elle est plus adaptée à l'analyse de l'état d'équilibre[179]. La décomposition en série de Fourier permet de calculer la valeur de chaque raie paire et impaire du spectre. En milieu industriel, les harmoniques paires peuvent généralement être ignorées car elles s'annulent en raison de la symétrie du signal et n'existent qu'en présence d'une composante continue. D'autre part, les harmoniques impairs (3, 5, 7, 9, ..., ∞) se produisent fréquemment dans les réseaux électriques [180].

Le courant dans le réseau est périodique, mais pas toujours sinusoïdal. La superposition du courant harmonique sur le courant fondamental fait que la forme résultante n'est pas sinusoïdale en présence des charges non linéaires.

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

Donc le courant polluant absorbé a pour expression :

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(\omega_h t + \phi_h) \quad (3.5)$$

Où :

h représente $h^{\text{ème}}$ rang d'harmonique ; $h = 1, 2, 3, \dots, \infty$.

Ainsi, on peut écrire l'équation 3.5 sous la forme suivante :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(\omega_h t + \phi_h) \quad (3.6)$$

Avec :

I_1 est la valeur efficace du courant du fondamental ;

I_h Valeur efficace du courant harmonique de rang h ;

ϕ_1 Déphasage du courant fondamental ;

ϕ_h est le Déphasage de l'harmonique de rang h .

La figure 3.1 montre l'allure d'un courant de fréquence fondamentale à $50Hz$ contient une seule harmonique de rang 3 élevée en amplitude de fréquence de $3f_0$ c'est à dire égal à $150Hz$.

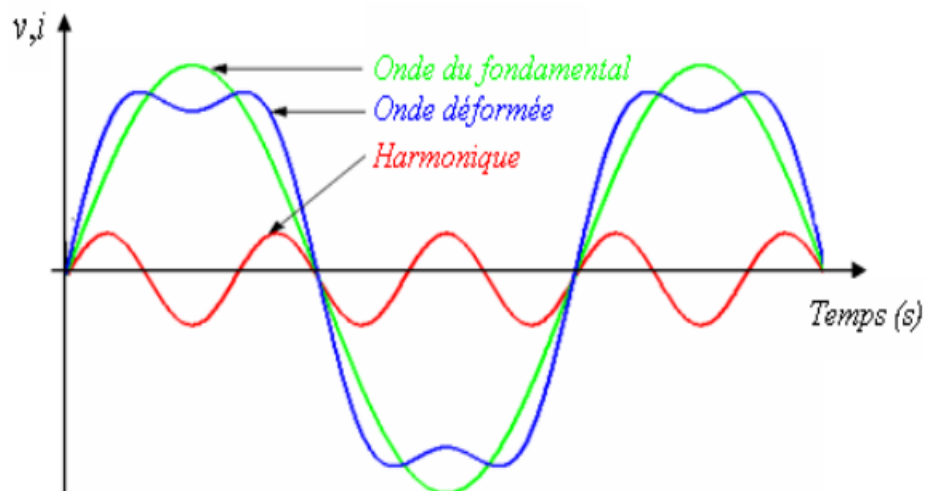


FIGURE 3.1 – Représentation de l'effet d'un 3ème harmonique sur le courant de réseau à 50 Hz

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

3.2.3.1 Rang d'un harmonique

Le rang harmonique est le rapport de sa fréquence f_h à la fréquence fondamentale f_1 [177]

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (3.7)$$

f_1 la fréquence fondamentale est généralement égale de $50Hz$ ou $60Hz$.

f_h est la fréquence de la $h^{\text{ème}}$ harmonique, il est égale hf_1 .

De plus, la plupart des appareils qui génèrent des harmoniques ont des spectres d'émission inférieurs à $2500Hz$ [4]. C'est pourquoi le domaine d'étude des harmoniques correspond généralement à une gamme de fréquence comprise entre 100 et $2500Hz$, c'est-à-dire de la $2^{\text{ème}}$ harmonique à la $50^{\text{ème}}$ harmonique, et les amplitudes de ces harmoniques sont variées en fonction de la fréquence [180].

3.2.3.2 Représentation spectrale

C'est un histogramme qui affiche l'amplitude de chaque harmonique en fonction de son rang. Une valeur déposée par l'onde fondamentale au point spécifié fournit l'amplitude. La figure ci-dessous montre un exemple de spectre :

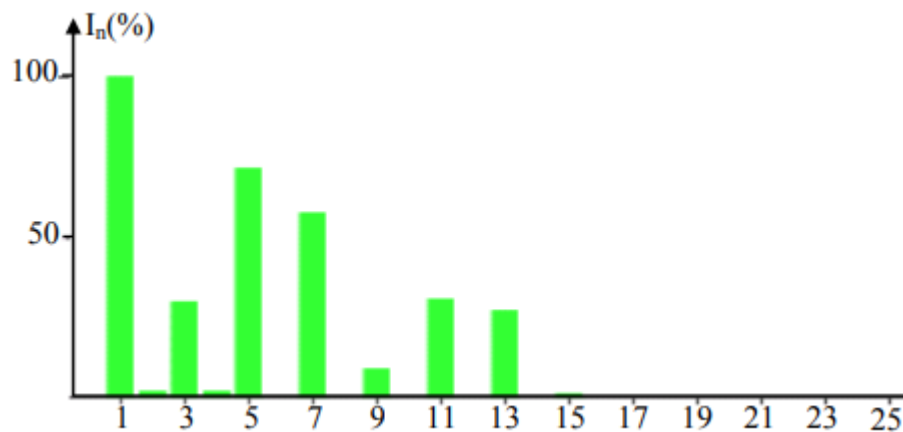


FIGURE 3.2 – Représentation harmonique spectral d'un signal

Dans un réseau triphasé, les principales composantes harmoniques sont le troisième, le cinquième, le septième, le neuvième, onzième et treizième [175, 177].

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

3.2.3.3 Taux de distorsion harmonique

Pour calculer les harmoniques, une des solutions visant à détecter la présence d'harmoniques est de calculer le taux de distorsion harmonique THD . Il en existe 2 types de taux de distorsion : taux de distorsion de tension (apparaît à la source) ou taux de distorsion de courant (dû à la charge). Ce taux de distorsion harmonique correspond au rapport entre la valeur efficace réelle d'un signal harmonique (U ou I) et sa valeur efficace à la fréquence fondamentale comme montre les équations ci-dessous :

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.8)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.9)$$

Où :

V_n est le $n^{ème}$ harmonique de tension.

V_1 est la valeur du fondamental de tension.

I_n est le $n^{ème}$ harmonique de courant.

I_1 est la valeur du fondamental de courant

3.2.4 Les effets des harmoniques sur les réseaux électriques

L'existence des harmoniques dans les réseaux électriques constitue un sérieux problème de qualité de l'énergie. En effet, les interférences harmoniques peuvent provoquer de nombreux effets néfastes. De nombreuses publications ont traité de cas où ces effets ont atteint des niveaux intolérables [175], tels qu'une perte d'énergie accrue, des risques de résonance entre éléments inductifs et capacitifs à certaines fréquences harmoniques, la surchauffe, les perturbations des réseaux de télécommunication, les pannes électroniques... etc.

3.3 Différentes techniques de minimiser les harmoniques

3.3.1 Techniques de filtrage des harmoniques

Différentes solutions classiques ont été utilisées pour éliminer ou réduire les effets des harmoniques, notamment les filtres passifs. Ce dernier repose sur le procédé de filtrage des harmoniques, qui consiste à mettre en parallèle une très faible impédance aux bornes du réseau d'alimentation, proche de la fréquence à filtrer et suffisamment élevée à la fréquence fondamentale du réseau. Le filtrage passif représente la solution la moins chère, mais il est en effet une opération délicate, car l'impédance du réseau peut non seulement modifier ses performances [4]. Ainsi, il ne peut pas être la plus efficace (impossible de couvrir de larges bandes harmoniques, résonance série et parallèle avec le réseau, équipement encombrant).

Pour remédier ces inconvénients, les avancées de la technologie des semi-conducteurs, grâce à de nouveaux composants tels que les IGBT ou les GTO, permettent de répondre par des nouvelles solutions aux perturbations du réseau. Il s'agit notamment des redresseurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI) et des filtres actifs[12].

3.3.2 Réduction des harmoniques par les onduleurs MN

Au cours des dernières décennies, les topologies d'onduleurs multiniveaux ont gagné la popularité dans les applications industrielles en raison de plus faible taux de distorsion harmonique et une meilleure qualité d'onde d'alimentation supérieure par rapport à l'onduleur conventionnel à deux niveaux[24]. La configuration d'onduleur multi niveaux proposée dans notre étude est l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté qui nécessite moins de dispositifs à semi-conducteurs de puissance par rapport aux configurations d'onduleurs à plusieurs niveaux conventionnels pour générer un niveau de tension de sortie plus élevé avec une distorsion harmonique totale plus faible. Donc, la meilleure qualité d'onde par cette topologie d'onduleur ressemblant à une onde sinusoïdale et une contrainte de tension moindre sur les commutateurs grâce à une commande adéquate [181]. Une nouvelle technique de modulation de largeur d'impulsion qui contient une référence

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

sinusoïdale avec des porteuses triangulaires à disposition de phase est utilisée pour générer les impulsions de commutation de l'onduleur multi niveau proposé. Cette technique est expliquée en détail à la prochaine section qui permet de minimiser le taux de distorsion harmonique par une technique d'optimisation de recine de l'arbre RTO pour obtenir une tension de sortie de haute qualité.

3.3.3 Les techniques basées sur la Modulation de commande

Les performances de l'onduleur pour n'importe stratégie de contrôle sont liées au contenu harmonique de sa tension de sortie. De nombreuses techniques ont été étudiées pour réduire ces harmoniques. Le choix de la technique de modulation approprié est un critère très important car elle influence la dynamique de commande, les harmoniques, la taille du filtre, la perte de commutation et améliorer de tel sort le rendement du système[7]. Par conséquent, les résultats montrent que l'augmentation du nombre de niveaux de l'onduleur réduira inévitablement la distorsion harmonique totale THD [156]. Plusieurs types de techniques de commutation sont utilisés pour contrôler les onduleurs multi niveaux afin d'obtenir le fondamental requis avec une distorsion harmonique minimale.

Au cours des dernières années, diverses études ont été présentées qui répondent aux exigences de raccordement de générateur PV au réseau électrique basé sur la modulation de largeur d'impulsion classique avec diverses méthodes MLI, telles que la porteuse MLI déphasée PSC-PWM et les porteuses MLI décalée de niveau LSC-PWM (Voir la section 2.5.1.2.1 de chapitre 2). En fonction de la porteuse ,il y a quatre techniques classiques de modulation de largeur d'impulsion pour la commande d'un onduleur multi niveaux qui sont utilisées une forme d'onde porteuse triangulaire, une forme d'onde porteuse en dents de scie, une forme d'onde porteuse sinusoïdale unipolaire ou des formes d'onde porteuses sinusoïdales. (Ils sont présentées dans la figure 2.18). Pour chaque forme d'onde de porteuse, différentes dispositions sont présentées dans[156] telles que la disposition de phase (PD), la disposition de phase inversée (IPD), la disposition d'opposition de phase (POD) et la disposition d'opposition de phase alternative (APOD). (Voir les figures 2.20 et 2.21).

Dans la littérature, la plupart des études sont utilisées les méthodes MLI de la porteuse triangulaire pour contrôler les convertisseurs statiques. Les tensions sinusoïdales de références

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

sont comparées avec les ondes porteuses triangulaires pour générer les signaux de commande de différents interrupteurs semi-conducteurs comme montre la figure ci-dessous.

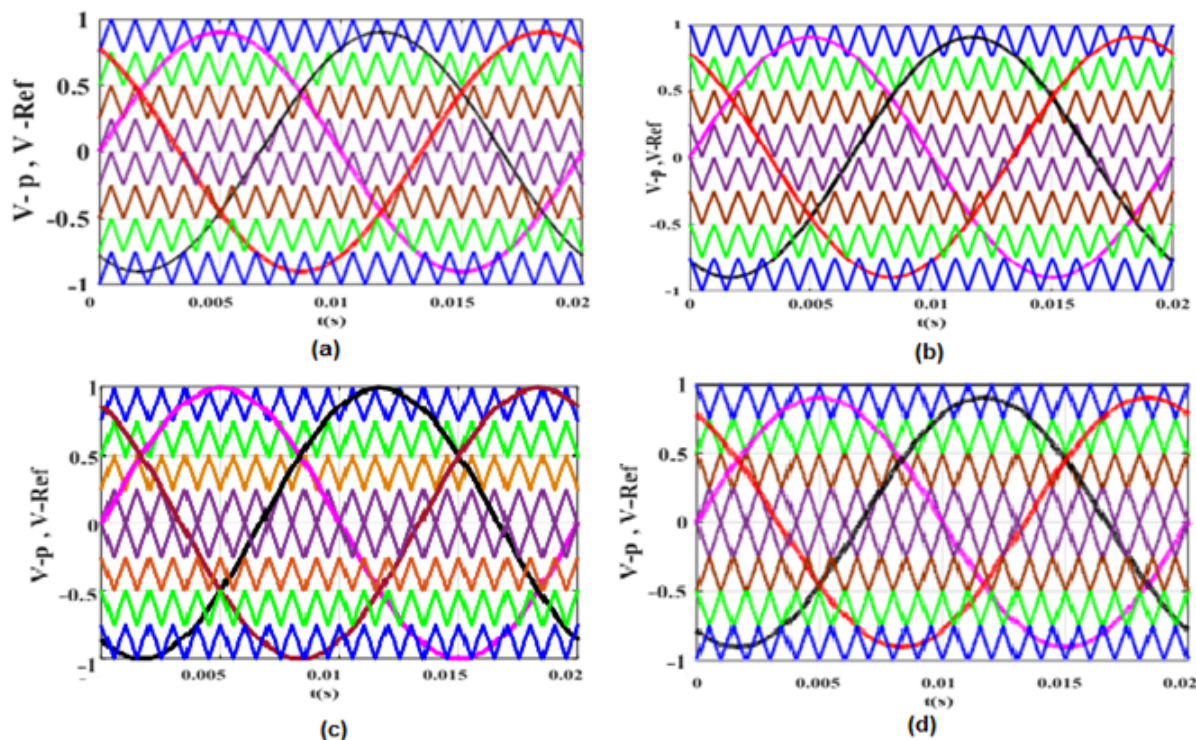


FIGURE 3.3 – Différents dispositions des porteuses triangulaires de MLI décalé au niveaux LS-PWM : (a)PD, (b)IPD, (c)POD, (d)APOD

Parmi tous ces techniques ,la MLI déphasée triangulaire (PS-PWM) et la technique MLI triangulaire décalée au niveaux (PS-PWM) sont largement utilisés en raison que la distorsion de tension harmonique est plus faible et la fréquence de commutation équivalente la plus élevée, respectivement[156]. Dans le deuxième chapitre, nous avons expliqué ces deux méthodes de modulation MLI multi porteuse en détail.

En ce qui concerne la procédure de MLI décalée au niveau comme montre la figure 3.3.a, $N - 1$ signaux porteuses sont exigées. Ces ondes porteuses sont disposées par une façon l'une au-dessus de l'autre décalé par un niveau de tension égale A_p . Donc, la technique MLI décalé au niveau (LS-PWM) permet d'assurer une commutation optimale avec une souplesse de manipulation mais elle souffre d'une répartition inégale de la puissance entre tous les modes de fonctionnement. Par contre, dans la technique MLI déphasée comme le montre la figure 3.4.b, on constate que toutes les porteuses ont la même amplitude de tension A_p mais n'ont pas le

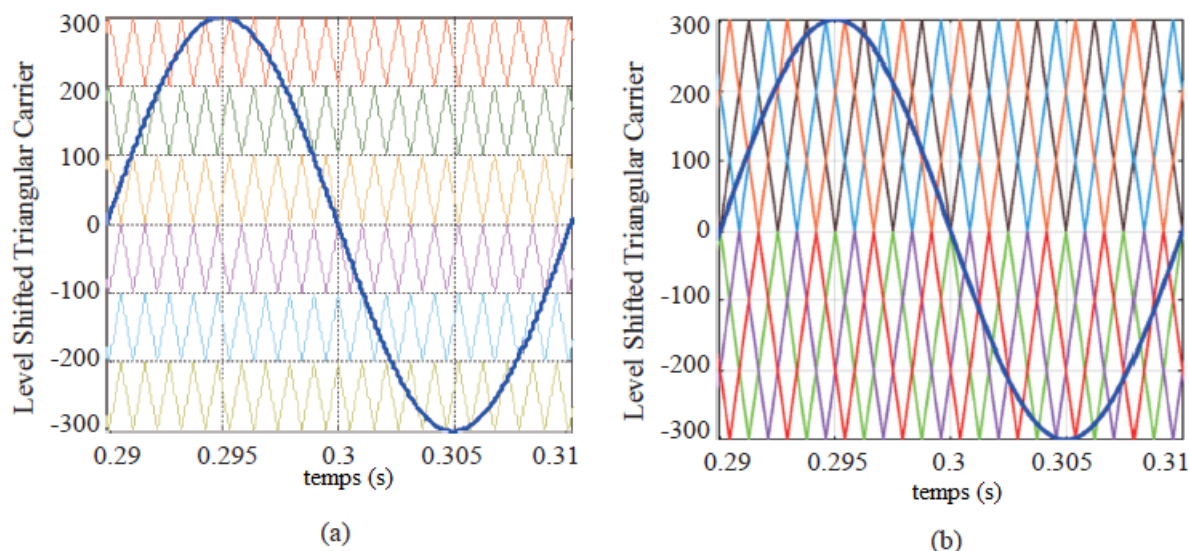


FIGURE 3.4 – (a) MLI décalé en niveau (LSPD-PWM) et (b) MLI déphasé (PS-PWM) même déphasage. Pour cela, cette technique assure une distribution de puissance égale (entre les modes opérationnels) et des commutations égales dans tous les semi-conducteurs de chaque mode donné, mais elle sera plus difficile pour un nombre plus élevé de commutation. Dans notre étude, on propose une nouvelle technique de commutation qui combine les deux techniques du PS-PWM et du LS-PWM, telle qu’une distribution de puissance égale (entre les modes d’exploitation) et une séquence de commutation optimale.

3.3.4 Réduction des harmoniques par des techniques d’optimisation

Dans la littérature, il existe différentes techniques d’optimisation pour trouver les valeurs les plus basses de THD. Pour cela, une stratégie hybride modifiée de modulation de largeur d’impulsion a été modélisée dans [182] pour réduire le THD dans les onduleurs à sept niveaux. La technique MLI modifiée, optimisée et basée sur l’évolution différentielle. En [156], l’auteur consiste à développer et mettre en œuvre un programme de pic génère une technique de contrôle qui réduit le Taux de distorsion harmonique (THD) d’un onduleur à cinq niveaux. L’algorithme d’optimisation de l’essaim de particules (PSO) est utilisé pour minimiser les harmoniques dans l’OMN basé sur la technique MLI à Sélection d’Harmoniques à éliminer SHEPWM [183] qui est un problème d’optimisation complexe lié à une équation transcendante non linéaire. De plus,

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

les auteurs en [164] ont utilisé un algorithme génétique pour résoudre l'optimisation de la technique SHEPWM sur l'onduleur en cascade à sept niveaux basé sur la sélection naturelle pour réduire le THD. En outre, un algorithme génétique assisté a été appliqué dans l'interface PV pour réduire le THD d'un onduleur à sept niveaux contrôlé par la technique SHEPWM dans [155]

3.4 Nouvelle technique de Réduction des harmoniques

La plupart des techniques utilisées dans la littérature pour optimiser les convertisseurs statiques sont appelées stochastiques [184]. Des méthodes d'optimisation déterministes peuvent également être utilisées, qui permettent une convergence plus rapide vers une solution, en particulier pour les systèmes avec plus de contraintes. Pour rendre ces techniques continues et différentiables, les modèles doivent être ajustés. Dans cette étude, nous nous limiterons au développement des commandes sinus triangulaires et dans un souci d'économie, il a été décidé d'utiliser le moins de circuits de commande possible. En utilisant contrairement à d'autres travaux avec la même orientation, quatre porteuses triangulaires pour commander tous les commutateurs de cet onduleur triphasé en même temps.

3.4.1 Le principe de la nouvelle technique MLIS

La technique de commutation proposée dans ce travail afin d'améliorer la composante fondamentale de la tension de sortie et de minimiser la distorsion harmonique totale est basée sur la technique classique MLI dont les différentes méthodologies MLI adoptant la multi porteuses à fréquence de commutation constante avec différents indices de modulation et des angles initiaux nuls. Dans celui-ci, une nouvelle technique MLI de disposition de phase PD est appliquée pour contrôler chaque semi-conducteur de l'onduleur neuf niveaux à CC qu'ils ont la même fréquence f_P et la même amplitude A_P , mais pas le même déphasage cela signifie que les angles initiaux des porteuses sont des variables peuvent être calculées par un programme d'optimisation.

Dans la topologie OMNCC, pour générer une tension de sortie de N niveaux, $\frac{N-1}{2}$ signaux porteurs sont nécessaires. Il est basé sur la comparaison de chaque signal porteur avec

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

une forme d'onde de référence sinusoïdale[155]. Donc, pour commander les douze interrupteurs de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté, nous avons besoin de quatre porteuses triangulaires (V_{P1} à V_{P4}) agencées avec un décalage au niveau d'amplitude afin de générer les impulsions de déclenchement de tous les commutateurs. comme le montre la figure 3.5

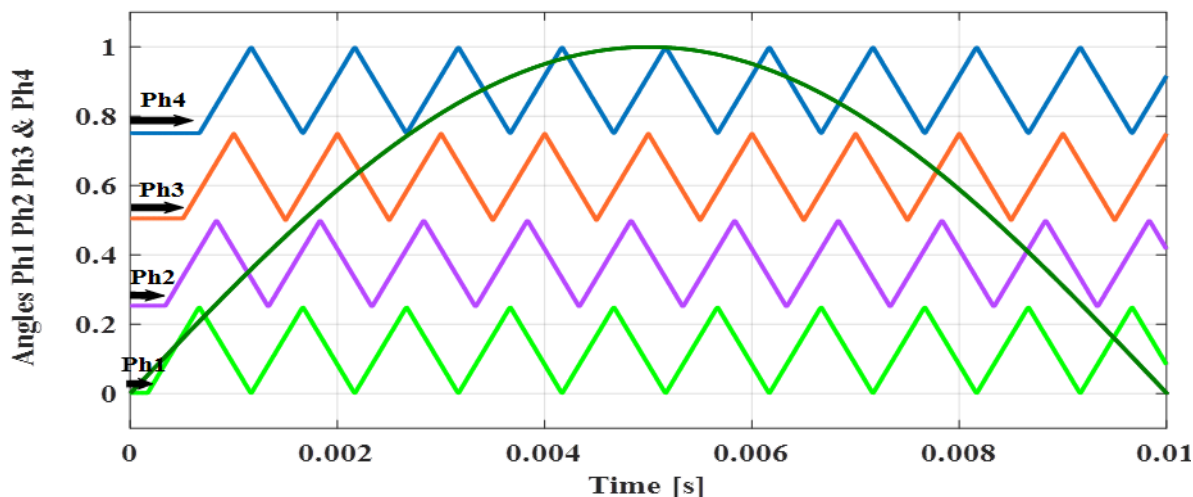


FIGURE 3.5 – Les porteuses et le référence de MLI sinusoïdale proposé

3.4.2 La description de la stratégie proposée

Afin d'obtenir les impulsions de grille des commutateurs de puissance utilisés dans le circuit de l'ONNCC en tenant compte les états des commutation indiqués dans le tableau 2.2, nous avons appliqué la technique de modulation MLI sinusoïdale. Elle est basée sur la comparaison d'un signal sinusoïdal de référence V_{ref} d'une fréquence de 50Hz de chaque phase avec quatre (04) signaux porteuses triangulaires de haute fréquence (P_1 , P_2 , P_3 et P_4) et des angles initiaux variables.

Ces porteuses sont comparées à une forme d'onde de référence V_{ref} sinusoïdale polaire, ce qui génère des impulsions appropriées pour tous les commutateurs. La valeur de l'indice de modulation m_a et la fréquence de commutation f_c sont définies au début. Cependant, les quatre angles initiaux θ_i sont calculés par un programme d'optimisation afin de produire un minimum valeur de THD. Cela nous motive à développer un nouvel algorithme d'optimisation d'arbre enraciné (RTO) efficace sur le plan informatique pour traiter le problème d'incorporation stratégique [185].

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

Au cours des dernières années, un nouveau programme stratégique pour résoudre le problème de l'optimisation via un algorithme facile à mettre en œuvre est l'algorithme d'optimisation de l'arbre enraciné inspiré de la nature, basé sur l'imitation du comportement naturel des racines des arbres à la recherche d'un endroit qui a le plus de l'eau[174]. Pour vérifier l'efficacité et la précision de ce nouvel algorithme d'optimisation, notre travail porte sur l'utilisation d'un algorithme RTO pour la recherche des angles initiaux de la technique MLI Sinusoïdale multi-porteuses pour contrôler l'ONNCC d'un système PV connecté au réseau. Cet algorithme est inspiré du mouvement aléatoire des racines des arbres pour trouver l'emplacement optimal de l'eau qui représente le THD le plus bas du courant de réseau dans notre système. Par conséquent, cette étude peut développer la technique RTO-PD pour trouver les angles initiaux optimaux de commande de stratégie MLI multi porteuses triangulaires.

3.5 L'algorithme d'optimisation de RTO

3.5.1 Définition

La technique d'optimisation des racines des arbres ou ce qu'on appelle en Anglais " Rooted Tree Optimization RTO" est l'une des techniques d'optimisation méta-heuristiques pour résoudre des complexes problèmes dans laquelle le concept principal s'inspire du comportement naturel d'un groupe de racines d'arbres dans leur recherche de source de l'eau comme il est présenté dans la figure 3.6. Une seule racine a une capacité limitée, mais un paquet de racines peut trouver le meilleur moyen d'arroser. On peut dire qu'elles se situent autour de ce lieu ou de la manière qui lie la plante à la ressource en eau [174, 186]. La robustesse et l'efficacité de cette méthode sont validées sur des fonctions non linéaires dans tous les recherches[185, 187]

Donc, pour créer le comportement hypothétique de l'algorithme RTO par lequel les racines décident ensemble de choisir leur direction vers la source de l'eau (la solution technique de notre problème) en fonction du degré d'humidité, les racines de RTO se déplacent vers un nouvel espace de recherche sans évaluer un tel mouvement pour les meilleures valeurs de forme physique car RTO est un algorithme bio inspiré fiable pour résoudre les problèmes linéaires, non linéaires et problèmes complexes d'optimisation sous contrainte[188]

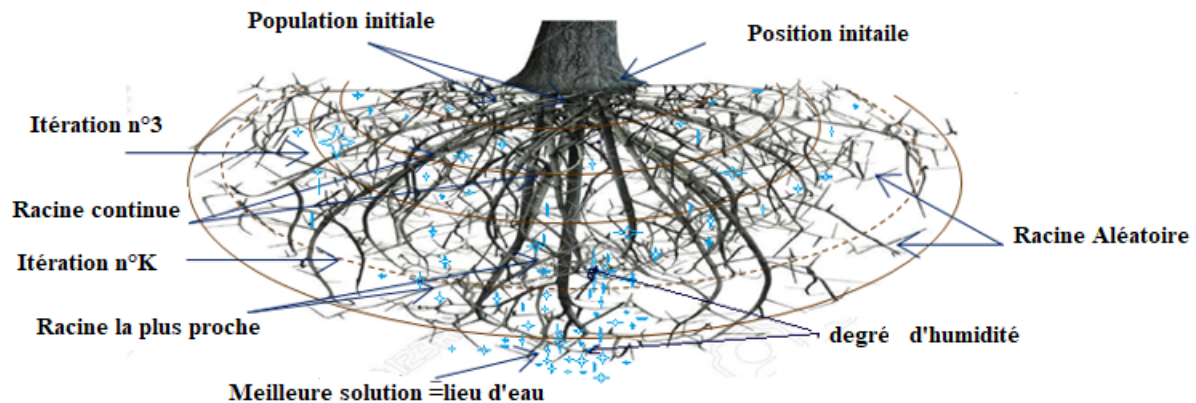


FIGURE 3.6 – Le comportement des racines des arbres lorsqu’elles recherchent de l’eau

La meilleure racine de l’algorithme RTO qui agit de manière similaire à celle de la meilleure globale dans l’optimisation de l’essaim de particules, est utilisée pour influencer le mouvement du reste des racines vers une région prometteuse. Cette influence peut conduire l’algorithme à une convergence prématurée[16]. Certains termes sont introduits pour déterminer comment l’algorithme RTO se déplace à partir d’une population initiale à un nouveau, en fonction des paramètres ci-dessous.

3.5.2 Paramètres de l’algorithme RTO

3.5.2.1 Population initiale

L’algorithme de RTO commence sa recherche par un ensemble aléatoire de solutions (groupe de racines), au lieu d’une solution unique comme l’algorithme génétique GA[174]. Chaque membre de la population est ensuite évalué pour la fonction objective donnée et se voit attribuer sa condition physique.

3.5.2.2 Fonction de fitness – La fonction objective

Il est important que la fonction de fitness soit correctement définie car le choix approprié de son équation permet une évaluation des éléments de manière efficace. La détermination de l’équation la plus appropriée est fortement influencée par le facteur d’expérience dans la spécialité.[189]. La minimisation harmonique dans les onduleurs multiniveaux est un problème d’optimisation complexe qui implique des équations transcendantales non linéaires ayant plu-

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

sieurs minima locaux. Dans notre recherche, le système de contrôle d'un onduleur multiniveaux qui lie le générateur PV au réseau électrique consiste à chercher à meilleurs résultats de distorsion d'harmonique totale THD de courant qui est un paramètre qui définit la déformation générale du courant alternative du réseau.

Donc, la fonction de fitness représente le THD du courant qui est défini comme le rapport de la somme de toutes les composantes harmoniques (supérieures à 2) du courant au fondamental du courant I_1 , exprimé en pourcentage, calculé comme suit[175] :

$$f_{Obj}(RTO) = \frac{\sqrt{(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2)}}{I_1} \% = \frac{I_h}{I} \quad (3.10)$$

I_1 est la valeur efficace de $i(t)$

I_h est le résultante des composantes harmoniques.

3.5.2.3 Degré d'humidité WD

Afin d'évaluer tous les membres de la population, il faut mesurer leur degré d'humidité (Witness Degree en Anglais WD). D'après la situation de chaque problème, on peut prendre la meilleure condition physique des membres de cette génération comme suit :

$$WD(k) = \begin{cases} \frac{f_k}{Max(f_k)} & \text{pour maximum objective} \\ 1 - \frac{f_k}{Max(f_k)} & \text{pour minimum objective} \end{cases} \quad (3.11)$$

Où

f_k : représente la fonction de fitness du candidat k .

$Max f_k$: représente la valeur maximale de fitness de toute la génération k .

On note que le degré d'humidité WD est varié entre $[0 - 1]$.

3.5.2.4 Les fonctions des racines de l'arbre

L'algorithme RTO utilise trois fonctions pour mettre à jour les racines, la manière de choisir la méthode de mise à jour doit être déterminée par R_n , R_c et R_r avant que la méthode de sélection ne doive réorganiser toutes les racines[186].

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

3.5.2.4.1 Le taux de la racine la plus proche de l'eau (R_n)

R_n est le nombre des racines parmi la population totale qui devraient s'orienter vers l'endroit le plus humide, c'est-à-dire la racine la plus proche de solution (En Anglais Root Neatest). Ces racines ont les meilleurs degrés d'humidité WD [187] :

$$Y_n(k, it + 1) = Y_{op}(it) + \frac{b_2 WD(k) randn(Y_{max} - Y_{min})}{Nit} \quad (3.12)$$

k : est compris entre $(NR_r + 1)$ et $N(R_r + R_n)$.

Y_{op} est la meilleure solution de la précédente génération.

$randn$ est un hasard nombre entre $[-1, 1]$.

3.5.2.4.2 Le taux de la racine continue R_c

Ce taux représente le nombre de racines qui ont un meilleur WD . Puisque ces racines apparaissent près de l'eau, elles sont continues en leur orientation comme c'était le cas à la génération précédente.

$$Y_n(k, it + 1) = Y_k(it) + b_3 WD(k) rand(Y_{op} - Y_k) \quad (3.13)$$

k : est compris entre $NR_n + 1$ et $N(R_n + R_c)$.

$rand$ est un hasard nombre entre $[0, 1]$.

3.5.2.4.3 Le taux de la racine aléatoire (R_r)

R_r est le nombre de racines qui s'étalent aléatoirement dans l'espace de recherche dans le but d'augmenter la diversification. Ensuite, les racines nouvellement orientées ont les racines avec moins de WD de la génération précédente. La nouvelle population de la racine aléatoire est donnée par :

$$Y_n(k, it + 1) = Y_r(it) + \frac{b_1 WD_k(it) randn(Y_{max} - Y_{min})}{it} \quad (3.14)$$

k : compris entre $(1 - R_r)N + 1$ et N

Y_r est un individu sélectionné au hasard parmi la génération précédente.

c_1 , c_2 et c_3 sont des paramètres ajustables.

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

On peut résumer les étapes du processus d'optimisation par l'algorithme RTO comme suite :

- Tout d'abord, définir les contraintes et les paramètres de RTO (b_1, b_2, b_3 et N);
- Produire la génération initiale des racines de façon aléatoire;
- Calculer le fitness de chaque racine;
- Trier les racines selon le degré d'humidité;
- Calculer les nouvelles racines en utilisant les formules de RTO;
- Former une boucle pour mettre à jour les racines;
- Enfin, la boucle s'exécute en continu jusqu'à atteindre le nombre d'itérations maximum.

3.5.3 Processus de l'algorithme RTO appliqué sur la technique MLIS

L'objectif principal de cette étude est d'implémenter la technique d'optimisation RTO au sujet du contrôle de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté dans le système PV raccordé au réseau électrique basse tension. Cette technique a été proposée afin d'obtenir un minimum de THD possible par la détermination des angles initiaux optimaux Ph_1, Ph_2, Ph_3 et Ph_4 des porteuses de la technique MLI Sinusoïdale (comme il est déjà illustré à la figure 3.5). Donc, les différents déphasages des porteuses sont calculés en utilisant la technique d'optimisation de l'arbre enraciné (RTO) pour commander les interrupteurs de l'onduleur à neuf niveaux à condensateur commuté de manière efficace. Pour cela, nous devons suivre certaines étapes résumées dans l'organigramme présenté à la Figure 3.7 Le processus de l'algorithme RTO commence par générer aléatoirement une population initiale de N racines qui représentent les initiaux angles des porteuses de la MLI[190]. Dans un premier temps, les valeurs de fitness pour toutes les racines sont calculées (Dans notre cas est le THD du courant de réseau). Après cela, le degré d'humidité (WD_i) de chaque racine est évalué par l'équation 3.11. Les solutions de chaque population sont d'abord réordonnées dans leur ensemble selon WD_i correspondant afin de trouver la meilleure solution dans cette itération, c'est-à-dire, ces racines sont triées de manière croissante selon les valeurs de WD_i . Par conséquent, la meilleure solution est la racine qui possède la plus minimale valeur de THD de chaque génération[187]. Ainsi, le scénario de l'algorithme RTO est basé sur le choix des meilleures solutions de la population actuelle en tant que les individus de la génération

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

suivante et ainsi de suite. Des éclaircissements supplémentaires concernant l'algorithme RTO appliqué pour rechercher les angles optimaux de la stratégie MLIS multi-porteuses pour contrôler l'ONNCC sont présentés dans l'organigramme suivant :

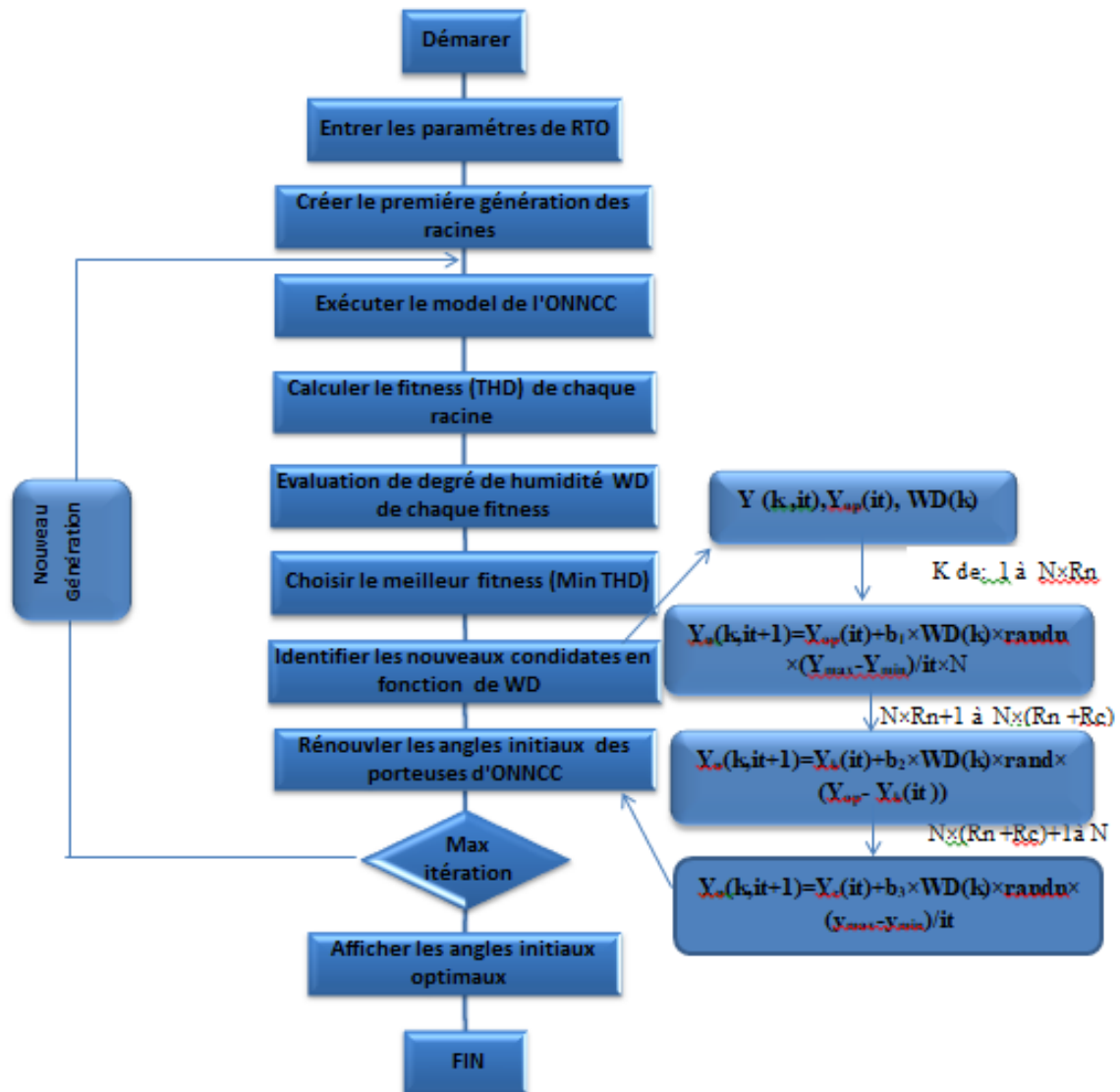


FIGURE 3.7 – L'organigramme de l'algorithme d'optimisation RTO pour caluler les optimaux angles initiaux

N : nombre de candidats dans la population.

It : nombre d'itérations.

K : le numéro du candidat.

$Y_r(it)$: Le candidat sélectionné par hasard.

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

$Y_{op}(it)$: Le meilleur candidat pour chaque génération.

$Y_k(it)$: Le candidat k pour l'itération précédente .

Y_{min}, Y_{max} : Le minimum et le maximum de la valeur d'un candidat, respectivement.

R_c : basé sur la continuité des racines dans la génération suivante.

R_n : présente le coefficient de la racine la plus proche de solution.

R_r : cette valeur dépend de la racine aléatoire.

Sachant que les variables (R_r, R_c, R_n) doivent être choisies pour vérifier la condition :

$$R_n + R_c + R_r = 100\%$$

Les angles initiaux des porteuses qui permettant de donner la meilleure valeur de THD sont sauvegardées et utilisées dans un programme de génération de signaux de porteuses nécessaires pour commander les interrupteurs semi-conducteurs de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté utilisé.

Le contrôle de chaque composant de notre système est détaillé dans la section suivante, en commençant par la commande MPPT qui permet l'extraction de puissance maximale dans des conditions d'éclairément variable, puis en passant au commande de bus continu qui permet de maintenir l'entrée de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté à une valeur constante afin de donner des résultats de meilleur qualité.

3.6 Les stratégies de commande de notre système PV

Notre système se compose d'un générateur photovoltaïque (PV), un convertisseur DC-DC élévateur qu' est considéré comme un étage d'adaptation entre le PV et la charge, un onduleur neuf niveaux à condensateur commuté qui consiste à mettre en cascade séquentiellement un convertisseur DC-DC à gain de tension élevé et un onduleur DC-AC d'une forme d'onde de tension de sortie sinusoïdale acceptable qui est alimenté par une tension de bus continu V_{dc} de 100 V. En effet, ce type d'onduleur à neuf niveaux est composé à deux circuits principaux : le premier circuit représente un convertisseur DC/DC qui permet de produire quatre niveaux DC à partir d'une seul source d'entrée grâce à la technique de connexion de série/parallèle des trois condensateurs. Le deuxième circuit est un onduleur en pont permet de produire l'alternance négative de cet

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

onduleur [167]. Donc les condensateurs C_1 , C_2 et C_3 sont introduits afin d'augmenter la tension et de créer plus de niveaux de tension. Les valeurs des condensateurs sont déterminées selon la valeur de tension qui peuvent la supporter [191]. La figure 3.8 montre le raccordement de notre système PV avec l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté.

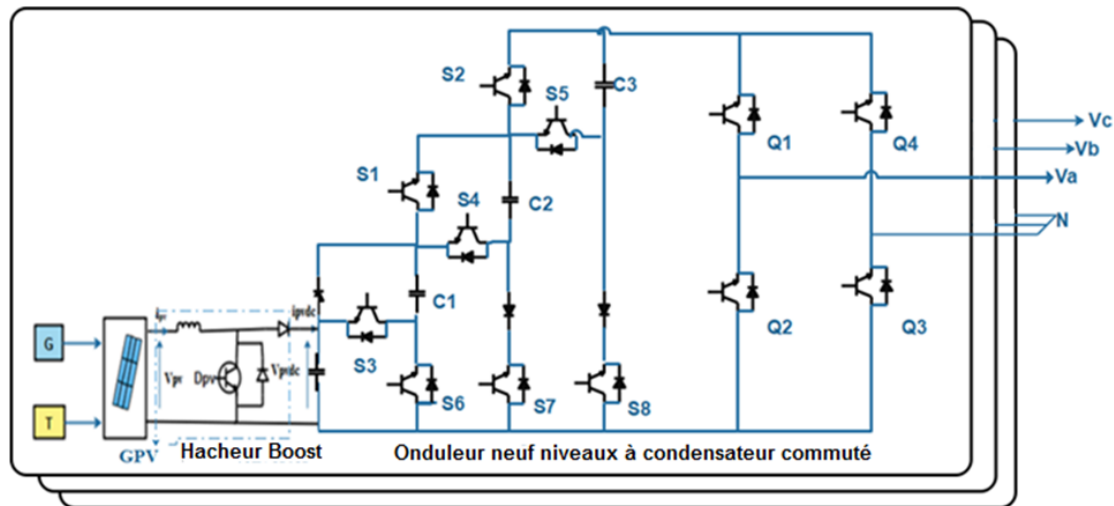


FIGURE 3.8 – La structure d'un système PV raccordé au réseau grâce l'ONNCC

Les tensions des points connectés à la ligne de distribution du réseau électrique ou à la charge alternative sont représentées par les tensions simples (V_a, V_b, V_c). La tension V_{dc} représente la tension de sortie du hacheur boost lié au générateur PV et à la fois représente la tension de bus continu de l'entrée de l'onduleur à neuf niveaux[30]. Les avantages d'utilisation des convertisseurs multi-niveaux classiques dans les systèmes PV raccordées aux réseaux électriques sont qu'ils peuvent générer de très bonnes formes d'onde, réduire la fréquence de commutation, réduire les pertes d'énergie [184]. Mais, l'inconvénient majeur est l'utilisation des grand composants tels que : plusieurs commutateurs de puissance, plusieurs condensateurs et ainsi plusieurs sources DC dans le cas de topologies multi niveaux en cascade [40, 166]. Cela entraîne une augmentation significative du coût du système.

Dans notre étude, l'objectif principal d'utiliser l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté est l'obtention d'un haut gain de tension $\frac{V_s}{V_e}$ avec moins des composants[130] et réduire le nombre des sources DC isolées dont elles sont remplacées par des condensateurs. Par conséquence, le nombre des composants de circuit, tels que les commutateurs actifs et les diodes, est diminué donc le coût global de notre système est diminué considérablement avec une haute performance.

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

Une technique de commande MLI basée sur la méthode d'optimisation RTO, que nous avons expliqué en détail précédemment, a été proposée en raison des nombreux avantages, tels que l'efficacité et la simplicité de mise en œuvre.

La chaîne de contrôle de notre étude se compose de deux parties principales, y compris le contrôle côté GPV qui permet d'assurer une extraction maximale de la puissance photovoltaïque en utilisant l'algorithme MPPT approprié et le contrôle côté réseau qui s'intéresse par la commande de tension de bus continu V_{DC} de l'entrée de l'onduleur et la commande de différents interrupteurs de l'ONNCC pour injecter la puissance désirée dans le réseau électrique. Les stratégies de commande proposées dans notre travail sont expliquées ci-dessous.

3.6.1 Contrôle côté générateur PV

3.6.1.1 Définition

Lorsque le système PV est raccordé au réseau de distribution ou est un système autonome, le GPV doit être contrôlé pour maintenir la stabilité et la qualité d'énergie fournie aux consommateurs [102]. En fait, la non-linéarité des systèmes photovoltaïques et les changements intrinsèques atmosphériques imprévisibles qui font varier le point de fonctionnement. Le choix d'unité de commande et les erreurs paramétriques sont les deux facteurs clés qui doivent être examinés de manière approfondie [192].

Le générateur photovoltaïque est dimensionné en fonction de la puissance de charge dans ce travail. Il est nécessaire d'extraire sa puissance maximale pour obtenir un rendement adéquat. Diverses approches de contrôle MPPT ont été rapportées dans la littérature, que nous avons mentionné dans le premier chapitre, pour améliorer l'efficacité des panneaux solaires photovoltaïques. Chaque méthode MPPT a des avantages et des inconvénients. Parmi les méthodes MPPT existantes, la méthode de perturbation et l'observation (PO) est largement utilisée dans l'industrie en raison de sa simplicité, mais elle souffre lors d'un changement rapide d'irradiation solaire. Pour remédier à ce problème, un algorithme MPPT qui repose sur la théorie de la logique floue tiré et extrait de nombreuses études comme [193, 114] est utilisé. Ce choix est justifié par ses différents avantages, en termes de robustesse, de simplicité de conception, et d'exigences minimales pour des modèles mathématiques précis.

3.6.1.2 Le régulateur MPPT par Logique flou (RLF)

Le contrôleur flou proposé pour l'MPPT permet d'optimiser l'amplitude du rapport cyclique du hacheur boost D afin de minimiser les oscillations et pour avoir une réponse rapide comme montre la figure 3.9.

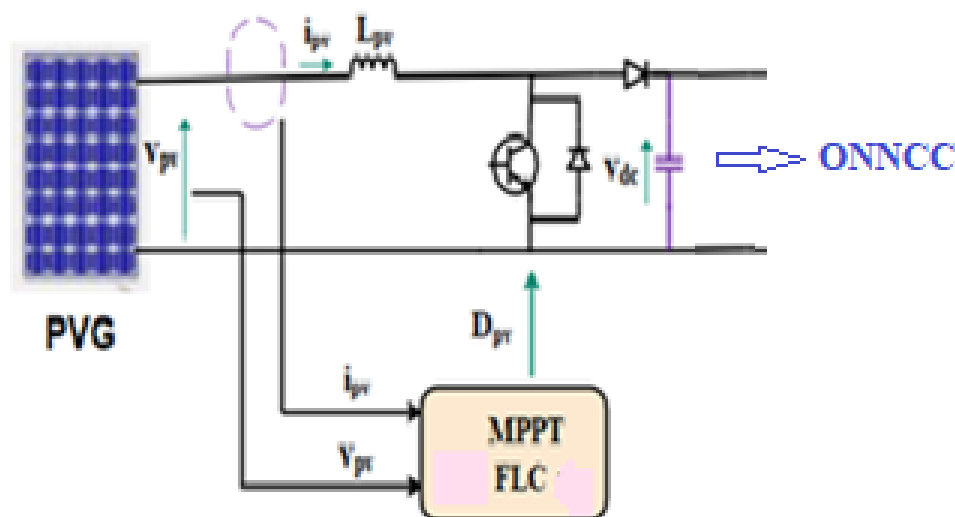


FIGURE 3.9 – Schéma fonctionnel d'un contrôleur logique flou de la MPPT

La logique floue a le même objectif qu'une commande automatique classique. Mais elle en diffère dans les points suivants[78] :

- Aucune connaissance mathématique du fonctionnement du processus n'est requise.
- La maîtrise du système difficile à modéliser et fortement non linéaire.
- Piloter un processus avec les connaissances et l'expérience d'un opérateur humain qualifié « expert ».
- Le régulateur flou utilise plusieurs inférences basées sur des variables linguistiques pour traiter différents problèmes.

Pour maximiser la puissance du générateur photovoltaïque dans notre étude, le contrôleur flou génère le rapport cyclique requis D du convertisseur élévateur DC/DC qui correspond à la puissance maximale pour tout changement de température ou d'irradiance. La modélisation des systèmes PV raccordés au réseau électrique coté source comprend la modélisation du module PV , la modélisation du convertisseur DC/DC avec un algorithme MPPT approprié[194].

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

Le courant généré par le module photovoltaïque (I_{pv}) est donné par [78, 2] :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nV_T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (3.15)$$

Dans le but de tester les techniques de commande opérant sur un système dynamique continu, on utilise généralement les modèles d'espace d'état moyen des convertisseurs de puissance. Nous obtenons le modèle dynamique continu du convertisseur DC via la combinaison des modes de commutation. Le convertisseur boost est composé de deux variables (I_L, V_c). Le modèle sera le suivant :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(1-D)}{L} & 0 \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{PV} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

La conception de la théorie de la logique floue FL pour maximiser la puissance de générateur photovoltaïque passe par l'ensemble de trois étapes classiques : la fuzzification, les règles d'inférence et la défuzzification, comme le montre la figure 3.10.

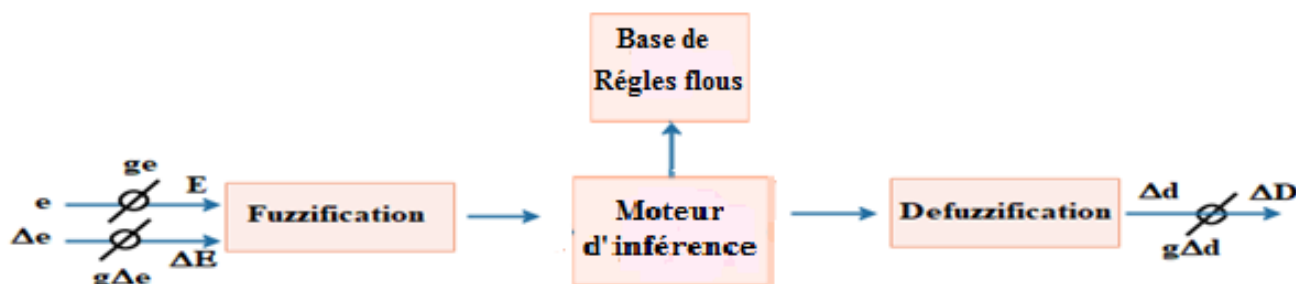


FIGURE 3.10 – Schéma fonctionnel d'un contrôleur logique floue de la MPPT

3.6.1.2.1 Fuzzification

La fuzzification est la première étape de la théorie de la logique floue qui est le processus qui permet le passage du domaine réel à un autre domaine flou par le changement de l'amplitude dans l'ensemble crisp (amplitude numérique de l'erreur et des valeurs d'erreur dérivées) à l'amplitude dans l'ensemble flou à l'aide des fonctions d'appartenance. En pratique, les fonctions d'appartenance peuvent avoir plusieurs types différents, comme la forme d'onde triangulaire, la forme d'onde trapézoïdale, la forme d'onde gaussienne, la forme d'onde en forme de cloche, la forme d'onde sigmoïde. Le choix de la forme de la fonction d'appartenance est hautement arbi-

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

traire et dépend des préférences de l'utilisateur. Les formes triangulaires et trapézoïdales sont généralement les plus couramment utilisées en raison de leur simplicité et de leur efficacité de calcul. Donc, pour une variable nette à fuzzifier, l'étape suivante consiste à la fuzzifier à l'aide d'une fonction d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale...) puis pour cette variable nous avons un degré d'appartenance dans l'intervalle de $[0, 1]$.

3.6.1.2.2 Règles floues

La base de règles floues est le composant principal du contrôleur flou; il est indiqué comment le contrôleur se comporte pour répondre à toutes situations d'entrée. Il est constituée par un ensemble de règles de la forme suivante :[195] :

$$R_j : \text{Si } e(k) \text{ est } A_j, \text{ et } de(k) \text{ est } B_j, \text{ Alors } \Delta D(k) \text{ est } C_j, j = 1 \dots m \quad (3.17)$$

où A_j , B_j et C_j sont des ensembles flous tels que : NB (grand négatif), NM (moyen négatif), PS (petit positive).. etc. définissant une partition floue sur l'espace d'entrée du contrôleur .

3.6.1.2.3 Défuzzification

La troisième étape d'un système de la logique floue est la défuzzification. Malgré le fait que la majeure partie des informations que nous assimilons chaque jour est floue, la plupart des actions ou décisions mises en œuvre par des humains ou des machines sont nettes ou binaires. Il faut donc défuzzifier les sorties pour avoir une seule valeur nette qui nous donne le résultat final de notre problème (le problème de classification par exemple)[78]. La sortie d'un processus flou peut être l'union logique de deux ou plusieurs fonctions d'appartenance floues définies sur l'univers de discours de la variable de sortie. Il existe de nombreuses méthodes de défuzzification dans la littérature, telles que le principe d'appartenance maximale, la méthode centroïde (également appelée centre de zone, centre de gravité), la méthode de la moyenne pondérée et l'appartenance moyenne-max (également appelée milieu des maxima). Parmi ceux , la méthode de centre de gravité est très populaire pour sa simplicité qui est déterminée par l'équation suivante :

$$S = \frac{\sum_{k=1}^m S_k \mu_k}{\sum_{k=1}^m \mu_k} \quad (3.18)$$

Où m est le nombre des règles

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

S_k est la valeur de crête de chaque sortie.

μ_k est le poids de la règle k .

Dans notre contrôleur MPPT flou, cinq fonctions d'appartenance sont déterminées à la figure 3.11 pour les variables d'entrée et de sortie d'un contrôleur MPPT flou, et comme on le voit, des étiquettes linguistiques telles que : PB (Grand Positif), PS (Petit Positif), EZ (Environ Zéro), NS (Petit Négatif) et NB (Grand négatif) sont utilisées pour ces fonctions d'appartenance.

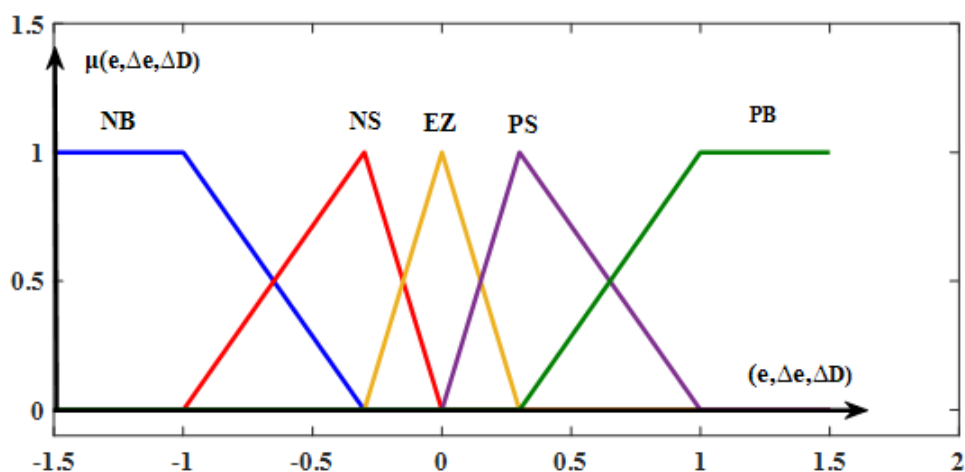


FIGURE 3.11 – Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur MPPT flou

Donc, vingt-cinq 25 règles floues listées dans le tableau 3.1 ont été choisies lors de changements significatifs de perturbation pour obtenir une vitesse de poursuite rapide et des oscillations réduites à l'état stable.

TABLE 3.1 – Table des règles de décision floues.

Δe_v	e_v				
	NB	NS	EZ	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	EZ
NS	NB	NS	NS	EZ	PS
EZ	NS	NS	EZ	PS	PS
PS	NS	EZ	PS	PS	PB
PB	EZ	PS	PS	PB	PB

Le contrôleur MPPT Flou fournit à chaque instant le rapport cyclique d'incrément

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

ΔD en fonction de la variation des deux entrées suivantes e et Δe [78] :

$$e = \frac{P_{pv}(n) - P_{pv}(n-1)}{V_{pv}(n) - V_{pv}(n-1)} \quad (3.19)$$

$$\Delta e = e(n) - e(n-1) \quad (3.20)$$

Où :

$P_{pv}(n)$, $P_{pv}(n-1)$, $V_{pv}(n)$, $V_{pv}(n-1)$ sont la puissance et la tension de panneaux PV détectées à deux temps d'échantillonnage n et $n-1$ respectivement.

En utilisant la méthode du centre de gravité pour calculer la valeur de rapport cyclique D à chaque variation de puissance afin d'obtenir la puissance maximale de générateur photovoltaïque :

$$\Delta D = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta_k \mu_k}{\sum_{k=1}^m \mu_k} \quad (3.21)$$

3.6.2 Contrôle coté réseau

Dans les systèmes PV connectés au réseau, l'étude d'échange de puissance active entre le générateur photovoltaïque GPV et le réseau est très nécessaire[196]. Pour cela, il est important de réguler le courant injecté au réseau par un contrôleur convenable. Les paramètres appropriés de ce contrôleur permettent d'améliorer la stabilité du système et d'obtenir des caractéristiques de réponse dynamique idéales.

En effet, le contrôle coté réseau comportait trois éléments principaux : régulateur de tension de bus continu V_{DC} , la boucle à verrouillage de phase PLL et contrôleur de courant de réseau. Un régulateur de tension V_{DC} a été appliqué pour réguler l'échange de puissance active entre le générateur photovoltaïque et le réseau. Pendant ce temps, la boucle à verrouillage de phase PLL devait suivre la phase de la tension. Cependant, les contrôleurs des courants étaient utilisés pour générer les impulsions des commutations de semi-conducteurs de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté ONNC.

Dans notre étude, le choix de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté permet de transmettre l'énergie continue à partir de la source photovoltaïque GPV au réseau à courant alternatif AC avec moins des composants de façon fiable, efficace et résolu le problème de qualité

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

produit par les pertes de commutation. Par conséquent, les impulsions de commutation pour les entraînements des interrupteurs IGBT's de cet onduleur ont été générés par la technique *MLI – PD* multi porteuses combinée avec l'algorithme d'optimisation *RTO* pour la recherche des angles initiaux optimaux qui peuvent maintenir la *THD* très minimal. La figure 3.12 montre la structure de contrôle de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté ONNC.

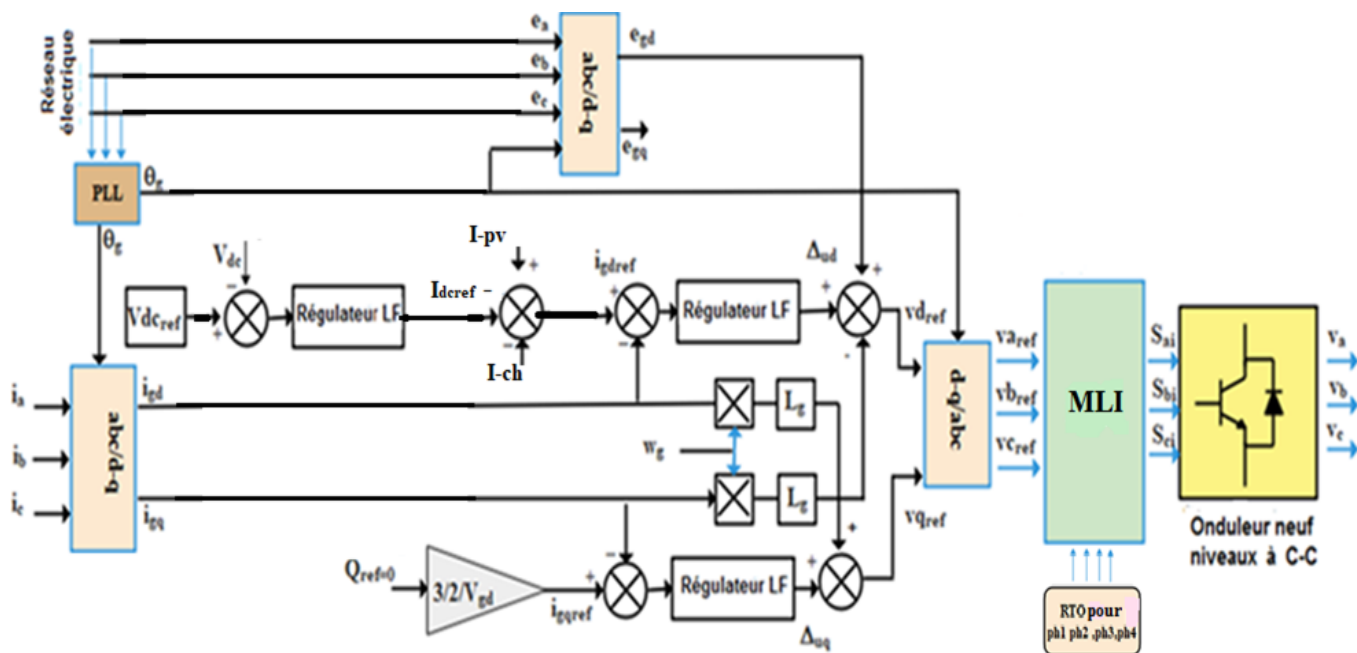


FIGURE 3.12 – La structure de commande de l'onduleur NNCC

3.6.2.1 Régulateur de tension de bus continu V_{DC}

La régulation de tension de bus continu est une étape très importante qui doit assurer par un condensateur connecté en parallèle à la sortie du hacheur (Boost dans notre étude). Ce condensateur joue le rôle de réservoir lors de l'échange d'énergie active entre le GPV et le réseau. Donc, il faut garder une tension stable aux bornes de condensateur afin de limiter les perturbations de la tension d'entrée de l'onduleur. Grâce à ce régulateur de tension V_{DC} , le flux d'énergie de réseau a été régulé comme montre la synoptique de la figure 3.13.

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

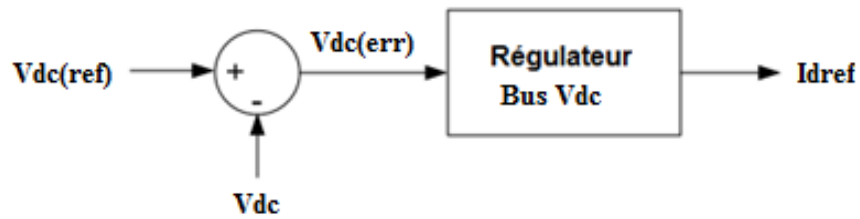


FIGURE 3.13 – Schéma synoptique du régulateur de tension V_{DC}

L'erreur de tension de liaison continue a été obtenue par

$$V_{dc}(err) = V_{dc}(ref) - V_{dc} \quad (3.22)$$

Nous calculons le courant du bus continu en appliquant la loi du courant de Kirchoff comme suit :

$$I_{dc} = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{PV} - I_{ond} \quad (3.23)$$

Où : I_{PV} : Le courant de sortie du hacheur.

I_{ond} : Le courant d'entrée de l'onduleur $I_{ond} = I_r + I_c$

C_{dc} : Le condensateur de bus continu.

Par conséquent, on peut modéliser le bus continu par l'équation suivante :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{I_{pv} - I_{rés} - I_{ch}}{C_{dc}} \quad (3.24)$$

Le schéma du moddèle de bus continu est illustré dans la figure suivante :

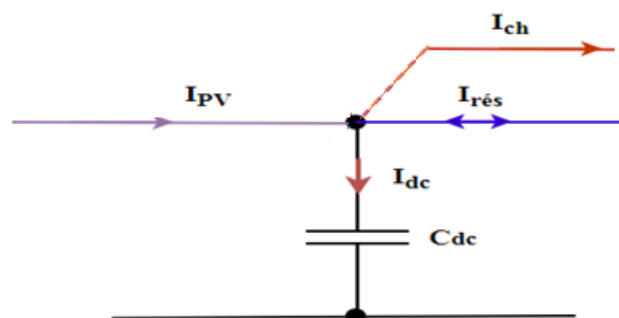


FIGURE 3.14 – Le modèle du bus continu de notre système

Le régulateur de tension du bus continu le plus populaire est le contrôleur PI pour

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

générer la valeur de crête du courant de réseau de référence. Un réglage optimal du gain PI était nécessaire pour obtenir les meilleures performances du contrôleur PI [196]. De plus, les paramètres de ce régulateur nécessitent un modèle mathématique précis du système à régler, alors que la technique basé sur la théorie de la logique flou LF ne nécessite pas de modèles mathématiques précis pour sa conception et son réglage, et elle fonctionne efficacement en cas de modèles imprécis, incertains et obscurs.

Dans le présent travail, un contrôleur basé sur la logique flou FLC est également proposé pour réguler la tension de bus continu V_{DC} du système d'interface PV. Il a été appliqué à la sortie du hacheur Boost pour maintenir la tension V_{DC} constante donc, ce régulateur permet d'éliminer les perturbations à l'entrée de l'onduleur $ONNCC$.

La figure 3.15 représente le schéma synoptique du régulateur FLOU du bus continu V_{DC} . La sortie du régulateur de tension de bus continue était le courant I_{dref} qui représente la valeur du courant direct de référence circulant dans le réseau.

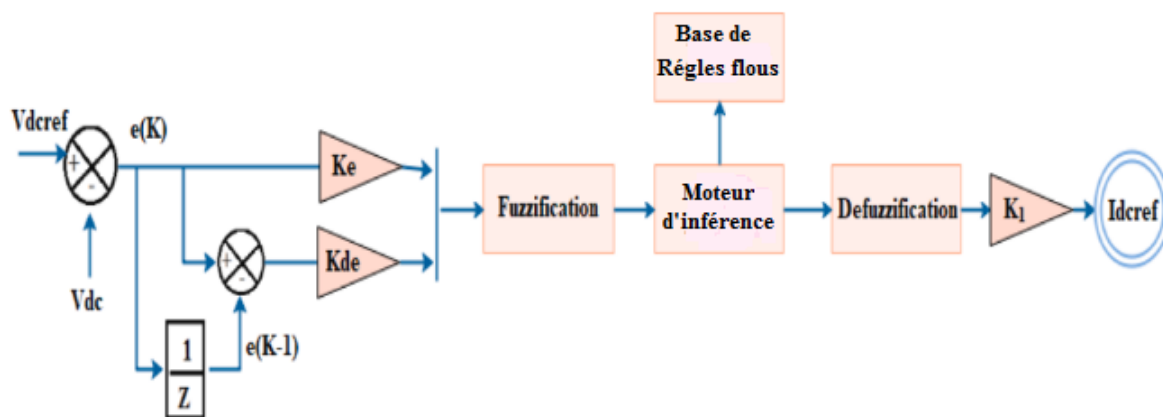


FIGURE 3.15 – Le modèle du bus continu de notre système

Les gains normalisés K_e , K_{de} peuvent convertir l'entrée réelle en quantité floue, tandis que K_i effectue l'opération inverse sur la sortie. Des fonctions d'appartenance trigonométriques sont choisies pour l'entrée et la sortie afin d'obtenir de bonnes performances (précision et temps de réponse), comme le montre la Figure 3.16[193]

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

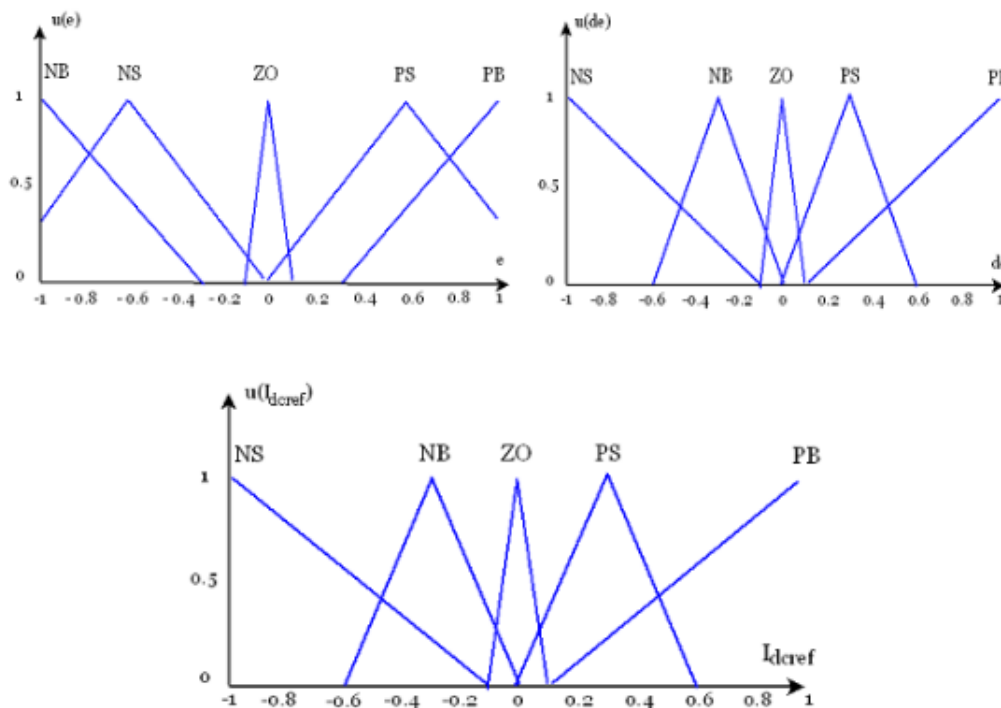


FIGURE 3.16 – Fonctions d’appartenance des entrées et de la sortie.

L’étape d’inférence floue est effectuée par la méthode Mamdani, tandis que la défuzzification utilise la fonction du centre de gravité pour calculer la sortie du contrôleur flou qui représente le courant de référence du réseau comme suit :

$$I_{dref} = \frac{\sum_{i=1}^{25} I_{drefi} \mu_i}{\sum_{i=1}^{25} \mu_i} \quad (3.25)$$

3.6.2.2 Contrôle de la boucle à verrouillage de phase

Dans les systèmes raccordés aux réseaux électriques , la boucle à verrouillage de phase (en anglais Phase-locked loop PLL) sert essentiellement à estimer la phase instantanée pour synchroniser les signaux de sortie d’onduleur avec le réseau de distribution . Le contrôle de la puissance active et réactive dépend principalement de cet angle. La Figure 3.17 montre la structure classique d’une PLL triphasée.

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

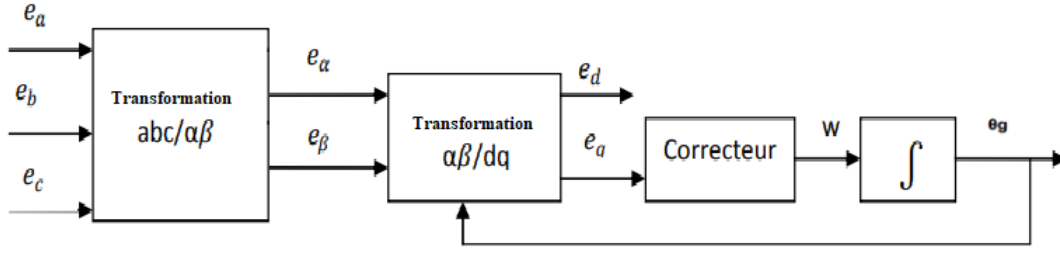


FIGURE 3.17 – Structure classique d'une PLL triphasée

Donc, le block PLL est constitué d'un détecteur de phase ,puis d'un correcteur de vitesse qui représente un contrôleur proportionnel-intégral (*PI*) amène v_q à zéro, comme est indiqué par la référence v_q , qui donne les grandeurs de vitesse angulaire et afin d'obtenir l'angle θ_g qui est égale à la phase du réseau en intégrant la vitesse angulaire. La fonction de transfert du modèle de PLL est de second ordre peut être présentée par :

$$H(s) = \frac{(K_p + \frac{K_i}{s})\frac{1}{s}}{1 + (K_p + \frac{K_i}{s})\frac{1}{s}} = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \quad (3.26)$$

$$K_p = 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \Rightarrow \zeta = \frac{K_p}{2 \cdot \omega_n} = \frac{K_p}{2\sqrt{K_i}} = \frac{\sqrt{K_p \cdot T_i}}{2} \quad (3.27)$$

$$K_i = \omega_n^2 \Rightarrow \omega_n = \sqrt{K_i} = \sqrt{\frac{K_p}{T_i}} \quad (3.28)$$

$$T_i = \frac{2\xi}{\omega_n} \quad (3.29)$$

La formule suivante donne le temps de stabilisation :

$$t_s = \frac{4.6}{\xi \omega_n} = \frac{4.6}{\sigma} \quad (3.30)$$

Les formules finales pour la conception des paramètres du régulateur PI :

$$K_p = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n = 2 \cdot \sigma = 2 \cdot \frac{4.6}{t_s} = \frac{9.6}{t_s} \quad (3.31)$$

$$T_i = \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} = \frac{2 \cdot \xi}{\frac{4.6}{\xi \cdot t_s}} = \frac{\xi^2 \cdot t_s}{2.3} \quad (3.32)$$

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

3.6.2.3 Régulateur de courant de réseau

3.6.2.3.1 Modélisation du réseau

Un réseau électrique peut être assimilé à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, appelée impédance de court-circuit, de sorte que le réseau est représenté par un système f.e.m et impédance triphasée série équilibrée.

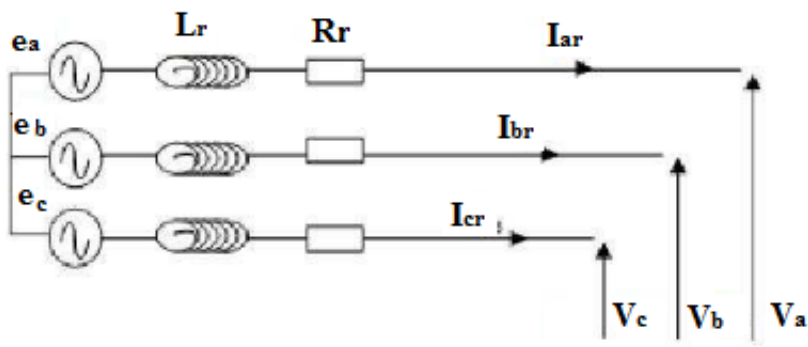


FIGURE 3.18 – Schéma symbolique d'un réseau triphasé

Les tensions du réseau électrique sont données par :

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.33)$$

On peut définir les hypothèses suivantes :

- la chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est supposée faible ;
- la charge est triphasée, couplée en étoile avec neutre isolé.

Alors on a :

$$\begin{cases} V_a + V_b + V_c = 0 \\ I_a + I_b + I_c = 0 \end{cases} \quad (3.34)$$

Pour modéliser le réseau électrique triphasé, un système biphasé virtuel peut être utilisé, les tensions dans le cadre tournant d-q sont représentées dans les équations suivantes[197] :

$$\begin{cases} V_{rd} = V_d - R_f \cdot i_d - L_f \frac{d}{dt} i_d + L_f \omega i_q \\ V_{rq} = V_q - R_f \cdot i_q - L_f \frac{d}{dt} i_q - L_f \omega i_d \end{cases} \quad (3.35)$$

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

Donc, les tensions de référence de l'onduleur nécessaires à la génération d'un système de tension biphasé équilibré sont définies par :

$$\begin{cases} V_{od} = R_f \cdot i_d + L_f \frac{d}{dt} i_d - L_f \omega i_q + V_{rd} \\ V_{oq} = R_f \cdot i_q + L_f \frac{d}{dt} i_q + L_f \omega i_d + V_{rq} \end{cases} \quad (3.36)$$

Où :

- L_f :présente l'inductance du filtre.
- R_f :présente la résistance du filtre.
- Ω_r est la vitesse angulaire de la tension du réseau.
- V_{od}, V_{oq} sont les tensions de l'onduleur,
- I_{rd}, I_{rq} les courants dans le cadre rotatif (d-q).
- V_{rd}, V_{rq} sont les tensions du réseau sur les axes d et q, respectivement.

Les deux termes de couplage sont : $(\omega_g L_f i_{gq}, \omega_g L_f i_{gd})$ que nous chercherons à compenser. L'axe d est confondu avec le vecteur tension V_{rd} , la composante V_{rq} est donc nulle (orientation de la tension sur l'axe d) . L'aspect principal de control d'un système PV raccordé au réseau est de réaliser une haute qualité de l'énergie produite pour assurer la stabilité de l'énergie en tension et fréquence au point d'interconnexion énergétique et respecter les plages de valeurs admissibles (respectant en valeur et en déphasage). Pour une bonne performance, on peut choisir un correcteur flou. L'expression de la puissance active et réactive du réseau peut être représentée à l'aide des composantes des tensions de Park après le filtre LC du réseau [79] :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(v_{gd}i_{gd} + v_{gq}i_{gq}) \\ Q = \frac{3}{2}(v_{gq}i_{gd} - v_{gd}i_{gq}) \end{cases} \quad (3.37)$$

On s'aperçoit que la puissance réactive est directement contrôlable par le courant i_q . Pour avoir un facteur de puissance unitaire, la puissance réactive de référence doit être nulle ($Q_{ref} = 0$) Donc La composante sur l'axe q du courant est nulle ce qui fait que le courant a juste une seule composante qui est sur l'axe d .L'expression des puissances actives et réactives devient :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}v_{gd}i_{gd} \\ Q = 0 \end{cases} \quad (3.38)$$

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

Les courants direct et quadrature sont contrôlés par un régulateur basé également sur la logique flou . Les FLC proposés ont été conçus de la même manière que le contrôle de bus continu. Les entrées pour ces contrôleurs *FLC* sont les erreurs des courants direct et quadratique comme exprimée en Eq. 3.39 :

$$\begin{cases} e_{id} = i_{rdref} - i_{rd} \\ e_{iq} = i_{rqref} - i_{rq} \end{cases} \quad (3.39)$$

Où :

- Le courant i_{rdref} est également généré par le régulateur flou *FLC* de la tension du bus continu DC Bus.
- Le courant i_{rqref} est estimé en terme de référence de puissance réactive à l'aide de l'équation suivante :

$$i_{qref} = \frac{2Q_{ref}}{3V_r} \quad (3.40)$$

Le contrôleur flou des courants comprend trois parties : la fuzzification, la base de règles floues et la défuzzification, comme illustré à la Figure 3.19. Les contrôleurs flous des courants ainsi utilisent la fonction de centre de gravité comme une fonction de défuzzification pour déterminer les valeurs des sorties du contrôle[198].

Les entrées des contrôleurs des courants de réseau FLC sont les erreurs de courants (e_i) et ses variations (Δe_i), et les sorties sont les incréments des tensions (Δu_i) exprimés comme suit :

$$\begin{cases} e_i(k) = i_{ref}(k) - i(k) \\ \Delta e_i = e_i(k) - e_i(k-1) \\ \Delta u_i = u_i(k) - u_i(k-1) \end{cases} \quad (3.41)$$

La sortie et les entrées de chaque contrôleur RLF sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} e_i = k_1 e \\ \Delta e_i = K_2 \Delta e \\ \Delta u_i = k_3 \Delta U \end{cases} \quad (3.42)$$

Où : k_1 , k_2 et k_3 sont les gains de normalisation comme montre la figure suivante :

Chapitre 3. Nouvelle stratégie de minimiser les harmoniques des onduleurs multi-niveaux

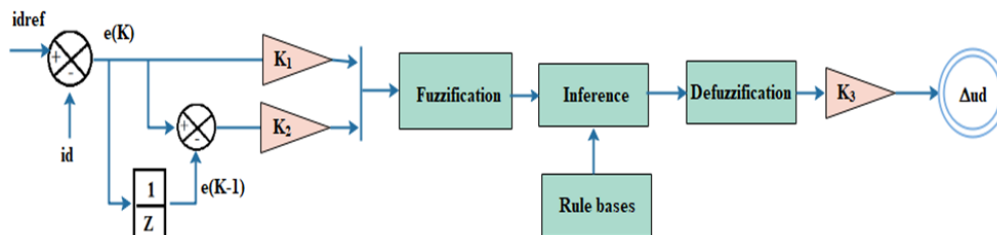


FIGURE 3.19 – Commande du courant de l’axe -d- par le régulateur FLC

Pour faciliter le calcul, nous avons choisi des ensembles de fonctions d’appartenance à un triangle équilatéral illustrées dans la figure 3.20 comme entrées et sortie pour les grandeurs e , Δe et Δu

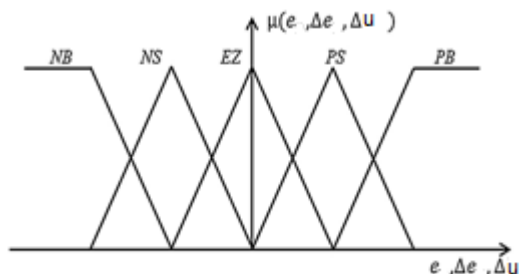


FIGURE 3.20 – Fonctions d’appartenance des régulateurs flou des courantes

A chaque instant, Le regulateur LF produit la variation de $\Delta u_d, \Delta u_q$ en fonction de la différence des deux entrées e et Δe . En général, la célèbre table des vingt-cinq règles de Mamdani, commune à plusieurs systèmes dynamiques, présente des formes symétriques et reflète une décision logique en termes de rapidité et de précision.

Donc, le circuit de commande complet de l’onduleur à condensateur commuté à neuf niveaux connecté au réseau est basé sur l’utilisation de trois régulateurs *RLF*.

- Le premier régulateur est utilisé pour réguler la tension du bus continu V_{DC} qui représente l’entrée de l’onduleur neuf niveaux à condensateur commuté *ONNCC*. IL permet de minimiser l’erreur entre V_{DC-Ref} et la tension détectée. La sortie de ce régulateur donne la référence de courant direct du réseau.
- Le deuxième *RLF* est introduit pour minimiser l’erreur entre le courant détecté I_d et le courant de référence produit I_{d-Ref} .
- Le troisième régulateur *RLF* permet d’ajuster le courant quadrature du réseau à la

valeur zéro.

3.7 Conclusion

Les harmoniques de tension sont repoussés vers des ordres élevés lorsque le rapport de fréquence m_f augmente, ce qui facilite leur élimination. Cependant, cette increase entraîne sans aucun doute une augmentation des pertes de commutation, ce qui rend nécessaire l'utilisation d'interrupteurs statiques de haute fiabilité. Mais l'utilisation d'onduleurs multi-niveaux permet de fonctionner sur un intervalle de fréquences très petit (environ 1000 Hz), ce qui réduit les pertes par commutation.

Dans ce chapitre, nous avons développé une nouvelle stratégie de commande *MLI* triangulo- sinusoidale à quatre porteuses d'un onduleur de tension à neuf niveaux à condensateur commuté.

Cette technique est basée sur l'optimisation des angles initiaux des porteuses par l'algorithme *RTO* pour produire les commutations de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté connecté au réseau. Pour cela, nous avons étudié la modélisation et la commande de différents composants du système PV proposé et particulièrement la stratégie de commande *MLI* triangulo-sinusoidale optimisée par la méthode *RTO*.

Pour valider les lois de commandes définies et tester les performances et l'efficacité de la technique de modulation *RTO-MLI* proposé, les résultats de simulation par l'outil de logiciel Matlab seront effectués dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE IV : Résultats de simulation de l'approche proposée

« Peu importe à quel point la science est douloureuse, elle ne sera pas plus douloureuse que l'ignorance. »

Munther Al-Qabbani

4

Résultats de simulation de l'approche proposée

Sommaire

4.1	Introduction	137
4.2	Dimensionnement du notre système PV	137
4.2.1	Les paramètres de notre système PV raccordé au réseau	138
4.2.2	Les conditions climatiques	139
4.2.3	Les variations de la charge	140
4.3	Résultats de simulation de système de commande	141
4.3.1	Commande de la puissance de GPV	141

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

4.3.2	Résultats de commande du bus continu V_{bus-DC}	143
4.3.3	Résultats de commande de l' onduleur neuf niveaux	144
4.3.4	Les résultats d'optimisation de l'approche RTO-MLIS proposée	156
4.4	Discussions des résultats	168
4.5	Conclusion	171

4.1 Introduction

Les convertisseurs multi-niveaux à condensateur commuté dans les systèmes PV raccordés aux réseaux ont ouvert une porte pour les progrès dans la technologie de conversion d'énergie électrique, car ils présentent les avantages d'une faible distorsion harmonique, et une plus grande efficacité par rapport aux convertisseurs à deux niveaux conventionnels. Ils ont un plus moins nombre de composants possibles avec une puissance de haute qualité.

Dans ce chapitre, et afin de montrer l'efficacité de fonctionnement d'une source PV associée à un réseau électrique via un onduleur triphasé neuf niveaux à condensateur commuté, le dimensionnement des différents composants du système est présenté et la simulation des différents étages est réalisée. Pour améliorer la qualité de l'énergie solaire qui est injectée dans le réseau électrique, un algorithme d'optimisation (RTO) que nous avons expliqué son principe de fonctionnement en détail dans le chapitre précédent, il est envisagé pour obtenir les valeurs optimales des angles initiaux des porteuses de la technique MLI Sinusoïdale. Ces derniers permettent de donner une valeur plus réduite possible de la distorsion harmonique totale (THD). La conception peut également maximiser l'efficacité de l'onduleur à plusieurs niveaux en réduisant le taux de THD et minimiser la taille et le volume de l'onduleur par l'utilisation de moins de composants et une seule source DC en comparant par l'onduleur multi-niveaux en cascade. L'efficacité et la précision supérieures de la technique RTO-MLIS proposée ont été testées et vérifiées sous l'environnement MATLAB.

4.2 Dimensionnement du notre système PV

Le dimensionnement est une étape très importante dans la conception et la simulation du systèmes d'énergie solaire , il nécessite la connaissance des données météorologiques du site, les données relatives aux utilisations, et les données relatives aux équipements[90]. Le système développé dans le cadre de ce présent travail est composé d'une source photovoltaïque de 15 kW_c raccordée au réseau électrique basse tension par l'intermédiaire d'un système de conversion DC/DC. Afin de suivre la puissance maximale du générateur photovoltaïque, un régulateur MPPT- flou est utilisé pour extraire le point de puissance maximale. Ce régulateur rend la réponse

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

du MPPT plus rapide afin de bloquer toute variation imprévue et rapide des conditions climatiques. La tension de sortie d'un hacheur boost représente également la tension du bus continu de 100V. Pour éviter la perturbation de l'énergie PV injectée au réseau, il faut garder une valeur constante de tension d'entrée de l'onduleur. Pour cela, on a choisit un régulateur flou pour contrôler le bus continu lié au l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté qui est connecté au réseau électrique. La figure 4.1 montre la structure de base d'un système PV raccordé au réseau électrique :

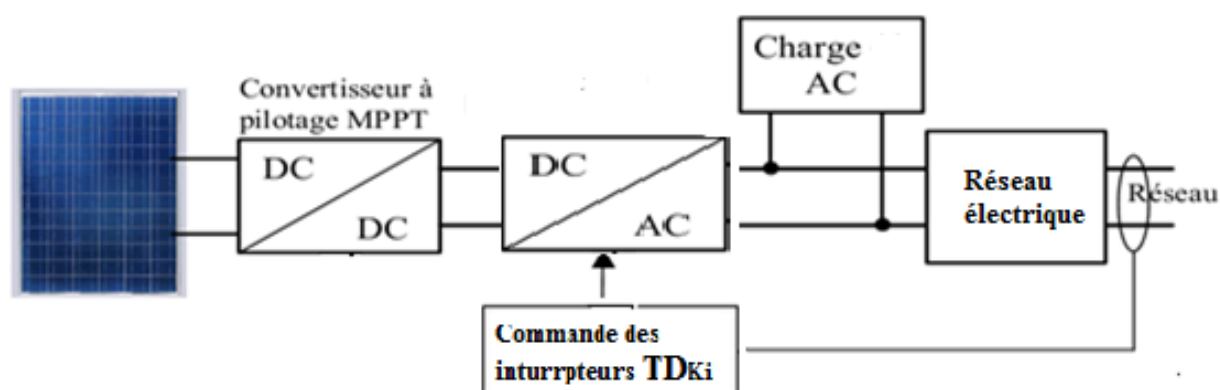


FIGURE 4.1 – Structure d'un système PV couplé au réseau électrique

4.2.1 Les paramètres de notre système PV raccordé au réseau

Le module **ENIESOLAR-75W** est choisit pour simuler notre système PV. Ce module peut produire une puissance maximale de 75 watts dans les conditions standards ($T = 25^{\circ}C$ et $E = 1000W/m^2$). Les différentes paramètres de panneau **ENIESOLAR-75** et de toutes les constituantes du système photovoltaïque proposé sont présentées dans le tableau 4.1 :

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

TABLE 4.1 – Paramètres du système proposé

Composant	Paramètre	Sympole	Valeur
GPV	Puissance Maximale	P_{MPP}	75 W
	Tension au point de P_{max}	V_{MPP}	17 V
	Courant au point de P_{max}	I_{MPP}	4.34 A
	Tension de circuit ouvert	V_{CO}	21 V
	Courant de court-circuit	I_{CC}	4.67 A
	Nombre de panneaux en série	N_s	5
	Nombre de panneaux en Parallèle	N_p	40
BOOST	Condensateur	C_B	4000 μ F
	L'inductance	L_B	200 mH
ONNCC	Condensateur 1	C_1	1500 μ F
	Condensateur 2	C_2	3000 μ F
	Condensateur 3	C_3	4500 μ F
	Tension d'entrée	V_{DC}	100 V
	Fréquence de porteuse	f_P	10 kHz
	Amplitude de porteuse	A_P	0.9 V
Filter LC	L'inductance de filtre	L_f	0.02 mH
	Resistance de filter	R_f	0.02 Ω
	Condensateur de filter	C_f	0.2 μ F
Réseau électrique	Tension crête d'une phase	V_{Max}	311 V

4.2.2 Les conditions climatiques

Dans ce travail, nous avons considéré que l'évolution de l'irradiation du *GPV* varie de la manière suivante : L'irradiance solaire prend la valeur de 500 W/m² entre (0et0.8s), 700 W/m² entre (0.8et1s), passe à 800 w/m² à t=1s, et prend sa valeur maximale de 1000W/m² dans le rest

de l'intervale comme montre la figure 4.2.

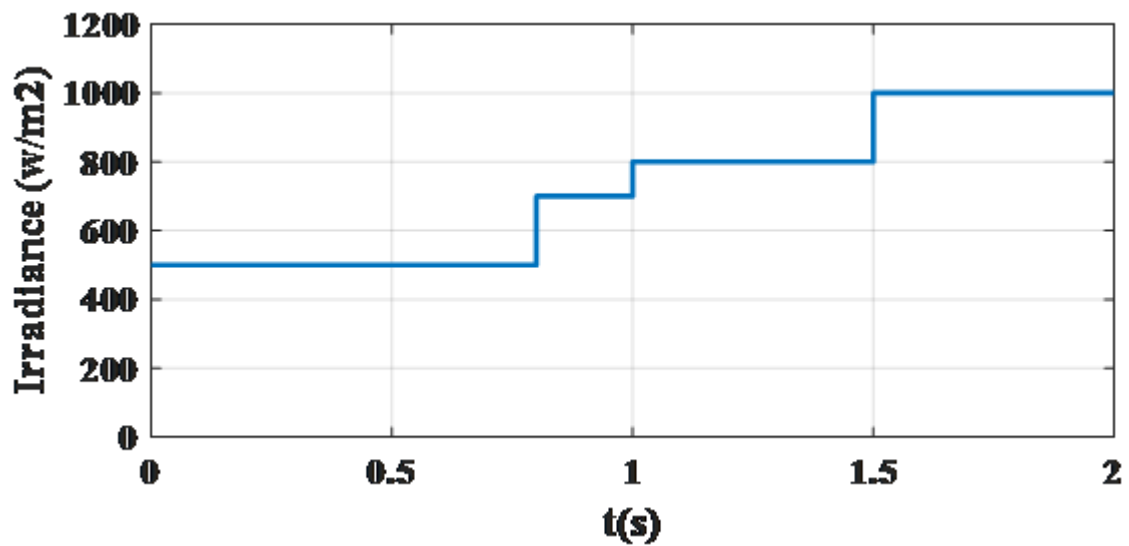


FIGURE 4.2 – Variation du niveau d'irradiation

4.2.3 Les variations de la charge

Le système proposé est simulé sous un changement du charge soudain afin de confirmer la performance de la commande proposée, la puissance de la charge varie sur une période de (2s) comme l'est indiquée sur la Figure 4.3 :

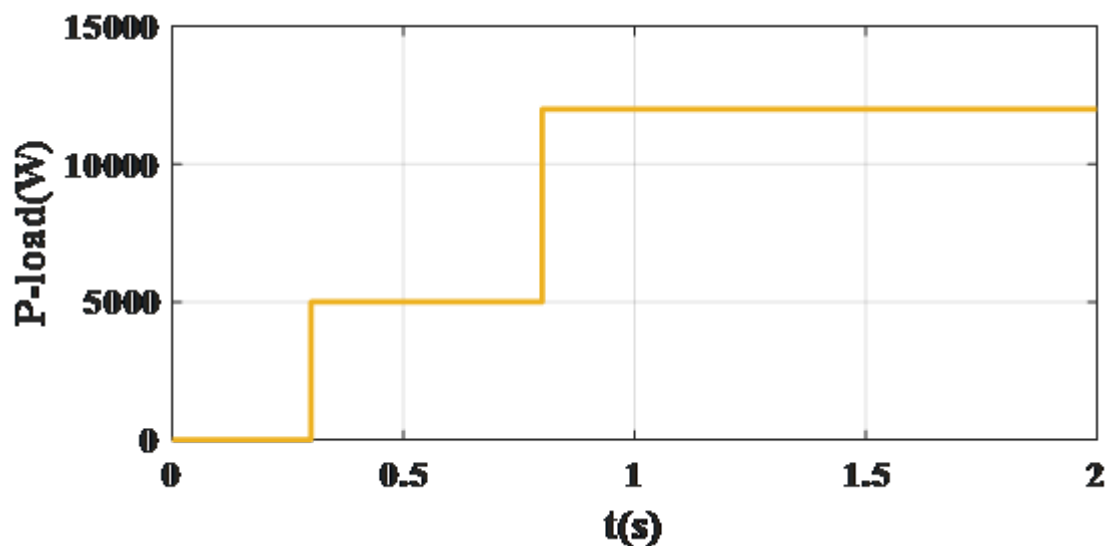


FIGURE 4.3 – Variation du niveau d'irradiation

4.3 Résultats de simulation de système de commande

Pour réaliser les différentes simulations d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique basse tension par l'intermédiaire d'un onduleur à condensateur commuté à neuf niveaux avec la stratégie de commande *MLI* sinusoïdale classique, on représente d'abord le schéma de simulation du circuit de puissance et de commande développés dans l'environnement MATLAB/Simulink dans la figure 4.4.

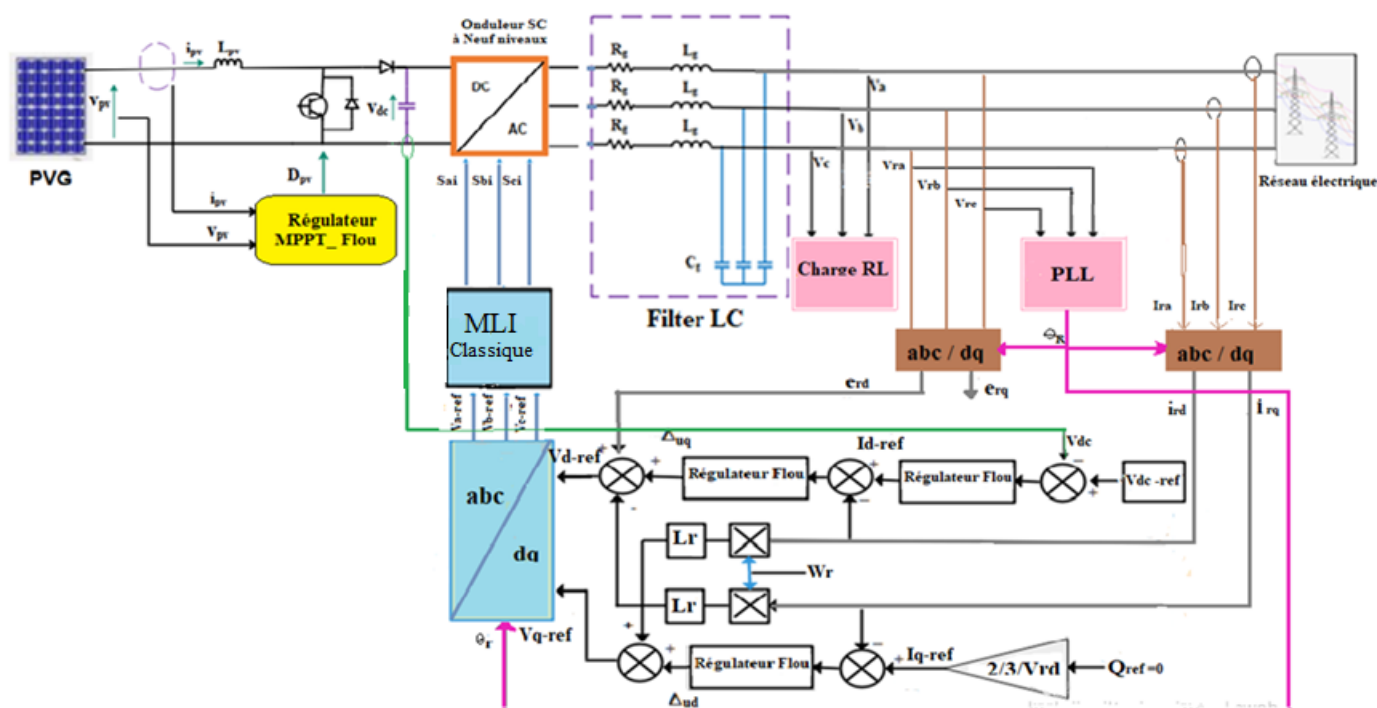


FIGURE 4.4 – Circuit de puissance et de commande de notre système PV

Le package Matlab/Simulink a été utilisé pour compiler les méthodes de contrôle et les tester pour les entrées prédécrites.

4.3.1 Commande de la puissance de GPV

Sur la figure 4.5, on a illustré les allures de la puissance de référence et la puissance du générateur photovoltaïque extraire par le régulateur de la logique floue qui peut suivi la point de puissance maximale pour divers changements de l'éclairément. On peut remarque que le contrôleur MPPT-Flou permet d'extraire la puissance optimale pendant toute l'intervalle de temps, malgré

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

que la demande de la charge est variable (le plus d'énergie injecté au réseau comme mentioné à la figure 4.6) ; ce qui prouve par conséquent l'efficacité de l'algorithme MPPT basé sur la théorie de la logique floue.

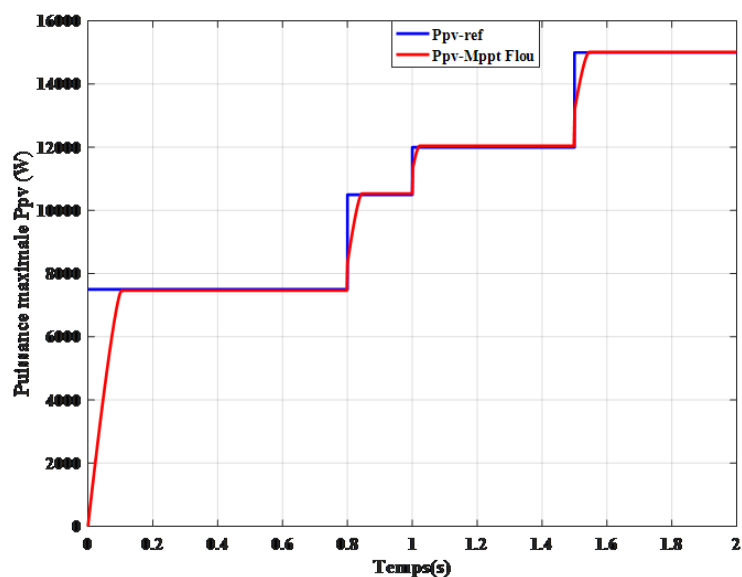


FIGURE 4.5 – La puissance maximale de générateur photovoltaïque

La figure 4.6 montre la puissance du générateur PV, la puissance de la charge demandée et la puissance du réseau correspondant chaque instant.

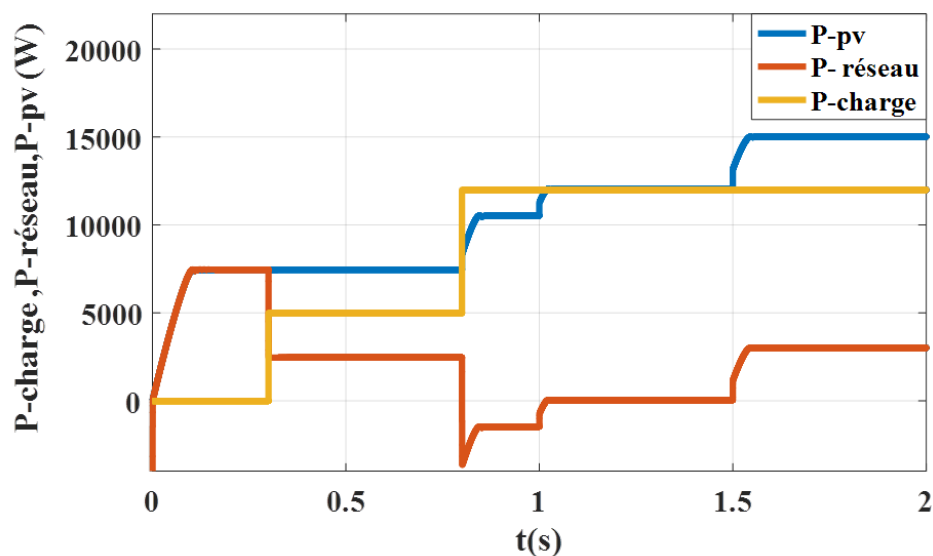


FIGURE 4.6 – Evolution de différentes puissances de notre système

4.3.2 Résultats de commande du bus continu V_{bus-DC}

Le contrôle de la tension du bus continu DC est très crucial pour la performance stable et souhaitée du système PV raccordé au réseau. Il est important de définir la tension du bus continu V_{dc} comme valeur de référence. Dans la plupart des systèmes PV raccordés aux réseaux, la tension du bus continu doit être supérieure à la valeur maximale de la tension entre phases du côté AC de l'onduleur. Donc, nous avons besoin d'une tension de bus DC élevée soit supérieure à 600V, peut atteindre 700V, pour pouvoir fonctionner dans toutes les conditions. Par contre, dans notre étude, quand on utilise l'onduleur à condensateur commuté, nous avons gagné un gain de tension très élevé et ne besoin que une valeur très petite de tension continue égale 100 V près de quart de la valeur crête de la tension de réseau.

La figure 4.7 montre que le régulateur LF réussit à suivre parfaitement sa référence en quelques millisecondes, sans dépassement suite à un changement d'irradiance du soleil ou à une variation de la puissance de charge. Autrement dit, le RLF fournit une action de contrôle non linéaire appropriée et efficace car il donne une réponse dynamique rapide de la tension de liaison CC par rapport au contrôleur PI, ce qui démontre la robustesse du RLF avec une grande rapidité.

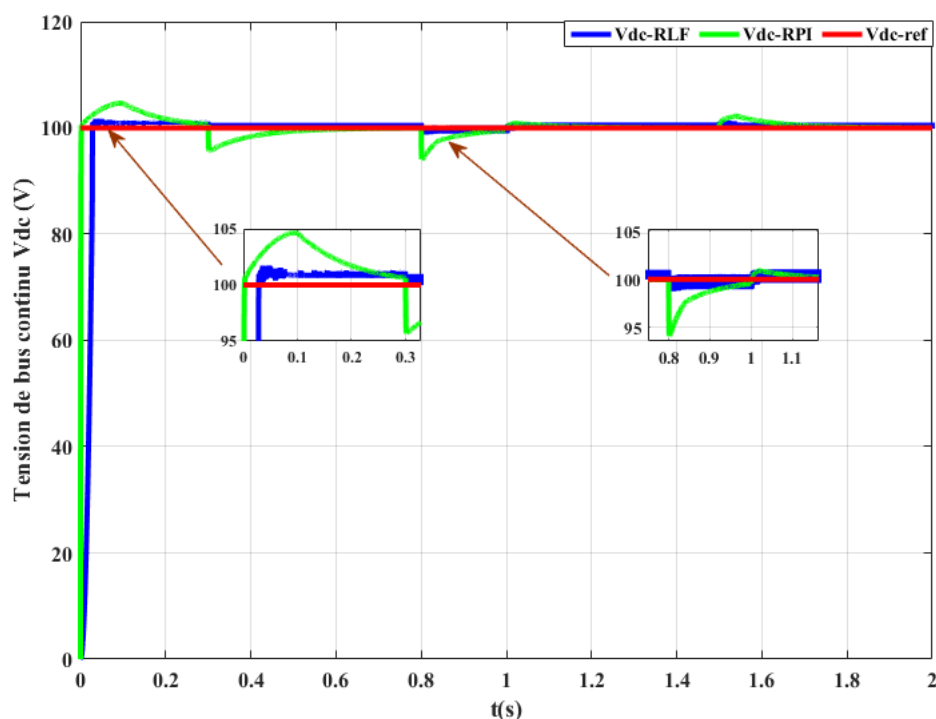


FIGURE 4.7 – La tension de bus continu de l'entrée de l'onduleur neuf niveaux à CC

4.3.3 Résultats de commande de l' onduleur neuf niveaux

On passe maintenant à la simulation du deuxième étage qui correspond au composant clé du notre système PV, l'onduleur à CC à neuf niveaux qui relie le GPV à la charge de type alternatif et avec le réseau électrique.

Comme il a été déjà mentionné, les onduleurs multi niveaux en cascades sont les onduleurs fréquemment utilisés dans les systèmes photovoltaïques car les sources solaires sont des sources séparées à l'origine, donc elles sont appropriées pour ce type d'onduleur multi-niveaux. Cependant, ils ont besoins des plusieurs sources DC pour chaque phase , ce qui conduit à la nécessité de prévoir un grand nombre de convertisseurs DC/DC , en plus, d'un grand nombre d'unités de contrôle de MPPT pour extraire la puissance optimale de chaque générateur individuel comme on va voir dans la figure 4.8 et bien sûr de grand nombre de semi-conducteurs, donc cela conduit à un contrôle un peu compliqué et un prix élevé inévitablement.

Afin de faciliter le contrôle et d'augmenter l'efficacité du système, les onduleurs multi-niveaux à condensateurs commutés à haut rendement sont apparus, capables d'obtenir les mêmes niveaux de tension avec le moins de composants possible et une haute qualité d'énergie injectée au réseau électrique. Donc, l'utilisation de cette nouvelle topologie d'onduleur multi-niveaux à condensateur commuté dans la conversion d'énergie solaire au réseau électrique est une étape très rentable par rapport les onduleurs multi-niveaux en cascade. Pour clarifier ce que nous avons dit et confirmer l'efficacité de l'onduleur proposé dans notre étude, nous allons mener une étude comparative entre l'onduleur à neuf niveaux en cascade et le l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté pour montrer à travers lesquels les points forts et les points faibles de chaque type.

4.3.3.1 Système PV raccordé à un onduleur à neuf niveaux en cascade

La figure 4.8 représente une phase du système PV connecté au réseau par un onduleur en cascade à neuf niveaux.

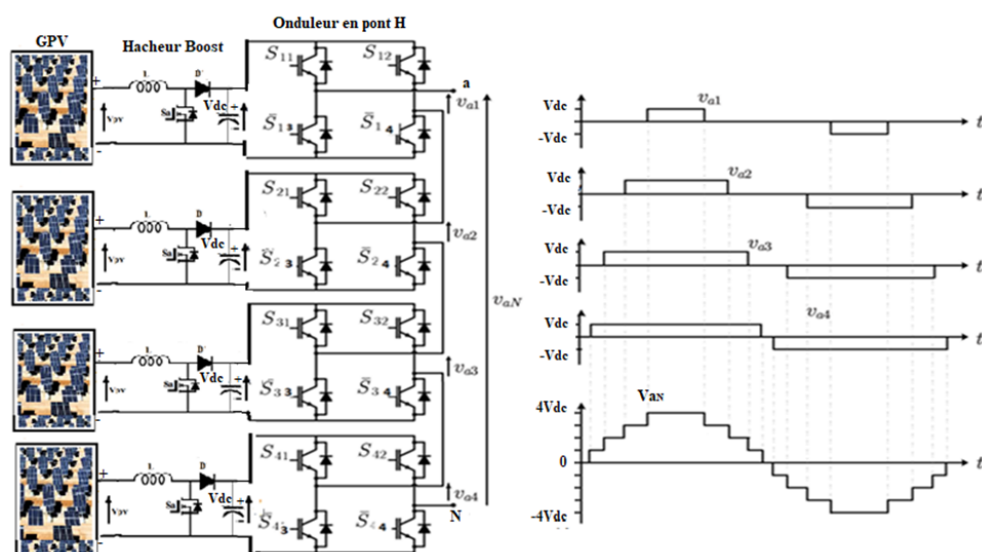


FIGURE 4.8 – Onduleur neuf niveaux en cascade lié à une générateur PV

Dans cette topologie, le nombre de niveaux généré à la sortie d'onduleur est dépend du nombre N_{dc} des sources continues existantes dont elles peuvent générer $2N_{dc} + 1$ niveau. Donc, pour générer neuf niveaux à la sortie d'un onduleur, il a besoin de quatre générateurs individuels, chacun lié par un hacheur boost menu à une commande MPPT afin d'extraire le maximum de puissance de ce générateur PV, ensuite une commande convenable appliquée à la sortie de cet hacheur pour garder la tension de bus continu constant. Ce dernier est connecté à un onduleur monophasé en pont en H avec une commande des interrupteurs bien déterminée. Donc, la superposition des quatre sorties des onduleurs en Pont H permet de générer une onde de tension AC à neuf niveaux comme montre la figure 4.8 qui peut alimenter une charge AC ou bien raccorder au réseau électrique.

La simulation en Matlab de ce système donne la tension V_a de phase a et sa FFT , comme est indiqué sur la figure 4.9.

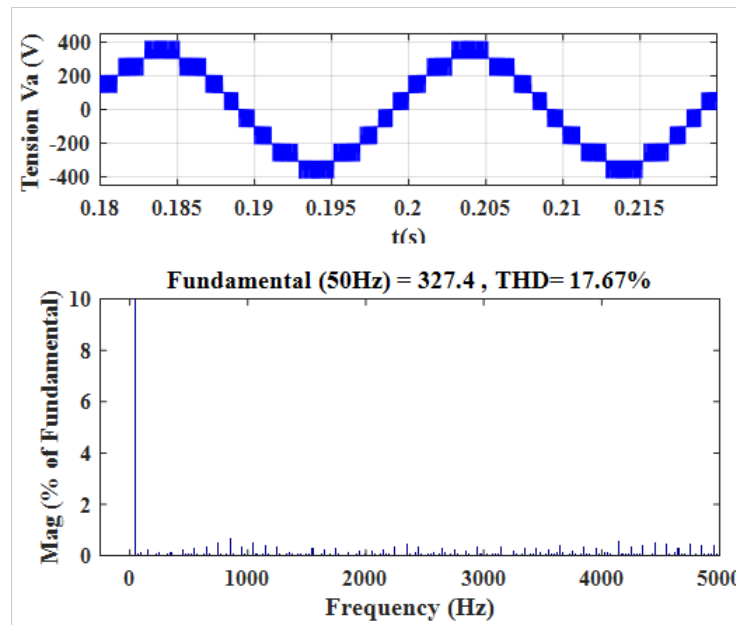


FIGURE 4.9 – La tension V_a de l'onduleur en cascade à neuf niveaux et sa FFT

4.3.3.2 Système PV lié à un onduleur neuf niveaux à condensateur commuté

Par contre, dans un système PV raccordé au réseau électrique via un onduleur neuf niveaux à condensateur commuté, chaque phase nécessite une seule source PV pour obtenir une onde AC à neuf niveaux à la sortie comme montre la figure 4.10. Ainsi elle a besoin un seul hacheur boost avec une unité de commande MPPT afin d'extraire le maximum de puissance du panneaux photovoltaïques PV.

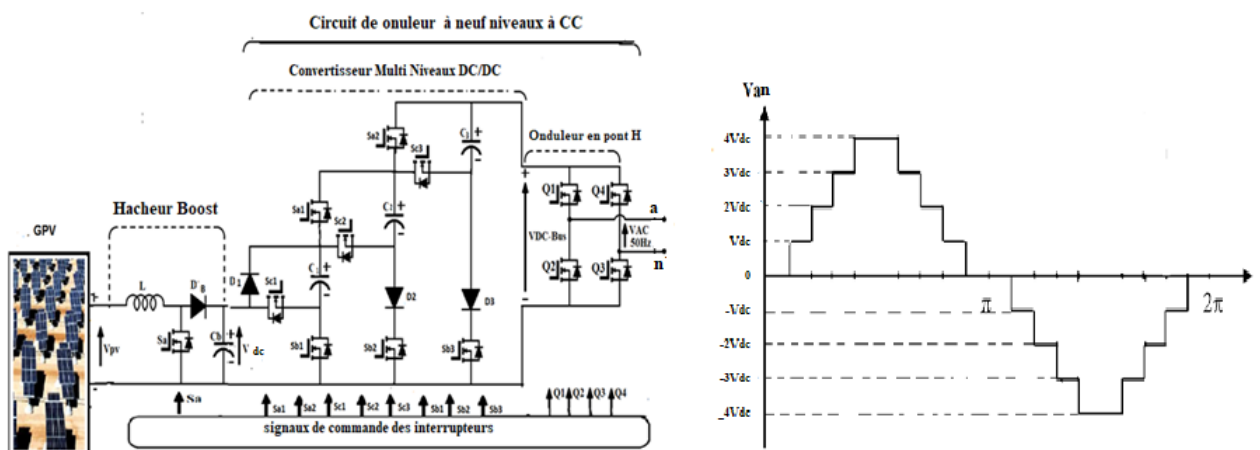


FIGURE 4.10 – Onduleur neuf niveaux à condensateur commuté lié à une générateur PV

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

Les tensions des condensateurs commutés de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté V_{C1} , V_{C2} et V_{C3} sont affichées dans la figure 4.11 :

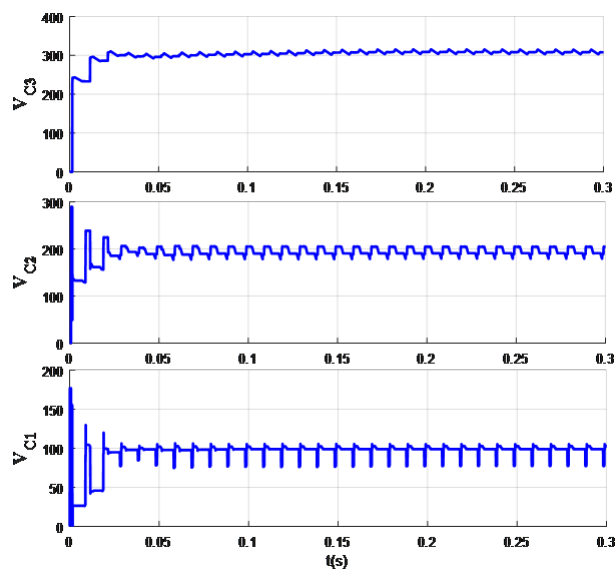


FIGURE 4.11 – Les tensions des condensateurs commutés de l' ONNCC V_{C1} , V_{C2} et V_{C3}

La tension V_a de phase a de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté et sa FFT sont illustrées dans la figure suivante :

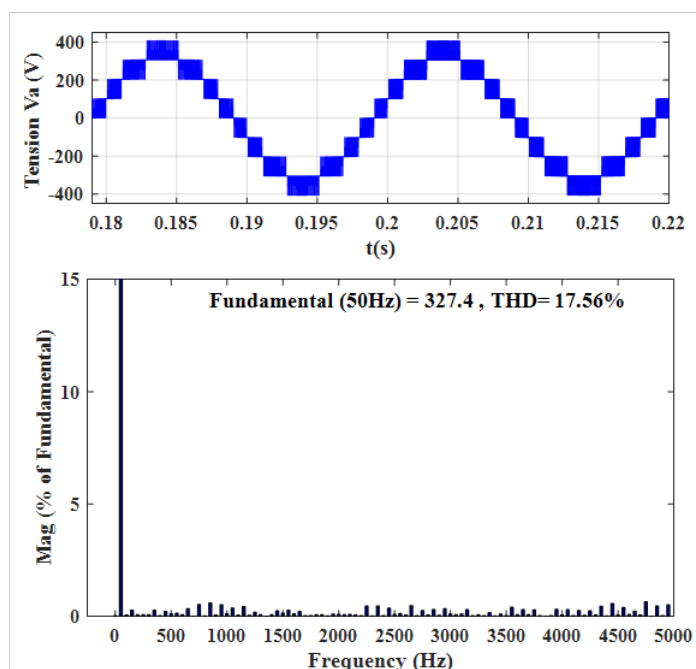


FIGURE 4.12 – La tension V_a de l'onduleur neuf niveaux à CC et sa FFT

4.3.3.3 Comparaison entre les deux topologies des onduleurs à neuf niveaux

Afin de résumer toutes les caractéristiques de ces deux topologies d'onduleur à neuf niveaux, en fait une comparaison de leurs composants nécessaires pour une phase de chaque topologie d'onduleur dans le tableau 4.2 :

TABLE 4.2 – Comparaison entre les deux topologies d'onduleur à neuf niveaux

Topologie	CHB	CC
Transistors IGBT	16	12
Diodes	0	3
Condensateurs du bus DC	4	1
Condensateur Principeaux	0	3
Sources DC	4	1
Boost	4	1
Unité MPPT	4	1
Gain de Tansion	1	4
THD	17.67	17.56

En effet, on peut conclure clairement de cette comparaison que l'onduleur à condensateur commuté utilise un nombre plus réduit de composants par rapport l'onduleur en cascade avec un THD réduit et cela évidemment assurer un cout minimale et fait le système PV plus efficace et très rentable.

4.3.3.4 Résultats de filtre LC

Pour améliorer la qualité d'énergie injectée au réseau, un filtre passe bas s'avère nécessaire pour éliminer les harmoniques de découpage (figure4.13).

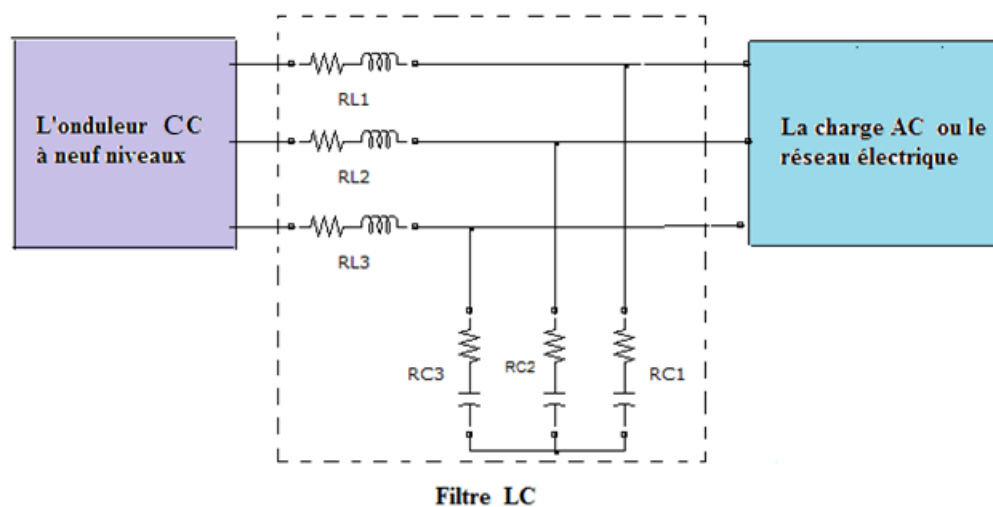


FIGURE 4.13 – Le schéma d'un filtre LC triphasé

Les résistances internes des condensateurs sont négligeables devant les impédances présentées par leurs capacités. Pour calculer les paramètres du filtre, on adopte la méthodologie présentée par [90] où la fréquence de résonance du filtre est fixée au dixième de celle de découpage, donc on a :

$$LC\Omega^2 = 1 \quad (4.1)$$

$$\Omega = 2\pi f_R \quad (4.2)$$

$$LC = \frac{1}{4\pi^2 f_R^2} \quad (4.3)$$

$$f_R = \frac{f_d}{10} \quad (4.4)$$

où : f_R représente la fréquence de résonance et f_d est la fréquence de découpage.

La figure 4.14 indique la tension de phase V_a de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté avant et après le filtrage. Les tensions triphasées V_a, V_b, V_c à la sortie de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté après le filtrage sont illustrées dans la figure 4.15.

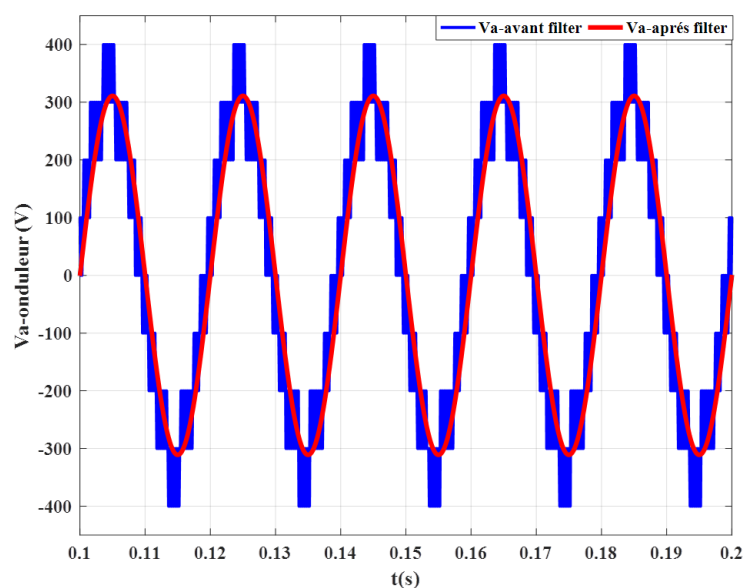


FIGURE 4.14 – La tension de phase a d'un ONNCC avant et après le filtrage

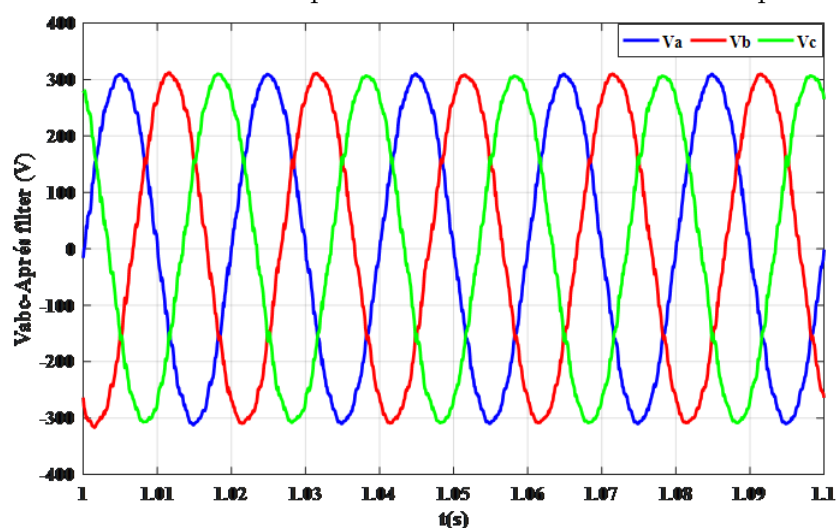


FIGURE 4.15 – Les tensions triphasés V_a, V_b, V_c de l'onduleur neuf niveaux à CC

4.3.3.5 Résultats de commande du courants de réseau

Une commande floue est également utilisée pour contrôler les courants de sortie de l'onduleur comme illustre la figure 4.4 , qui elle est capable de contrôler à la fois le flux de puissance active et réactive entre l'onduleur et le réseau électrique de manière autonome. Les courants direct et quadrature (i_d et i_q) du réseau sont respectivement représentés dans les figures 4.16 et 4.17 ci-

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

desous :

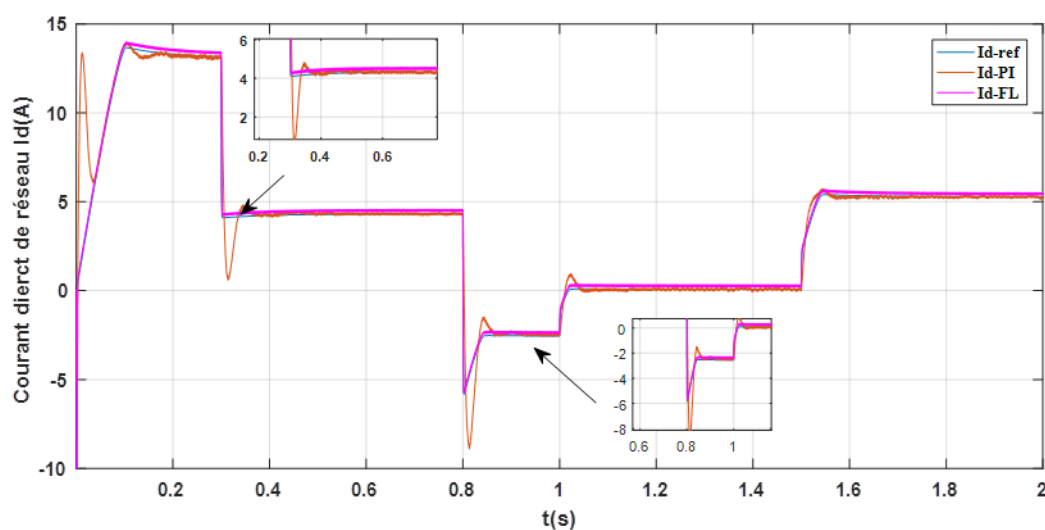


FIGURE 4.16 – Le courant direct de réseau I_d

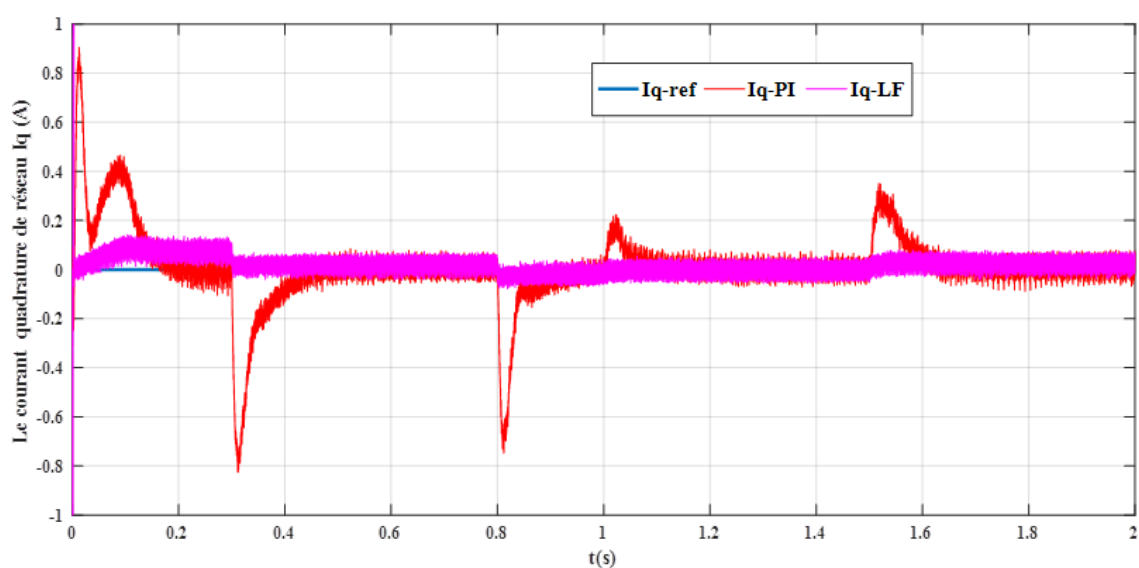


FIGURE 4.17 – Le courant quadrature de réseau I_q

D'après ces résultats, il est évident que les courants direct et quadrature (i_d et i_q) du réseau convergent bien vers leurs références après un court temps de réponse, contrairement à la dynamique lente du profil de la source primaire (éclairage), ce qui démontre l'efficacité du régulateur utilisé. Le courant produit par le générateur PV est traduite par le courant à la sortie d'onduleur CC neuf niveaux, qui il répartira selon les besoins des consommateurs de la charge et

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

le plus injecté au réseau comme montre la figure 4.18 : Pour plus d'explication, on peut remarquer

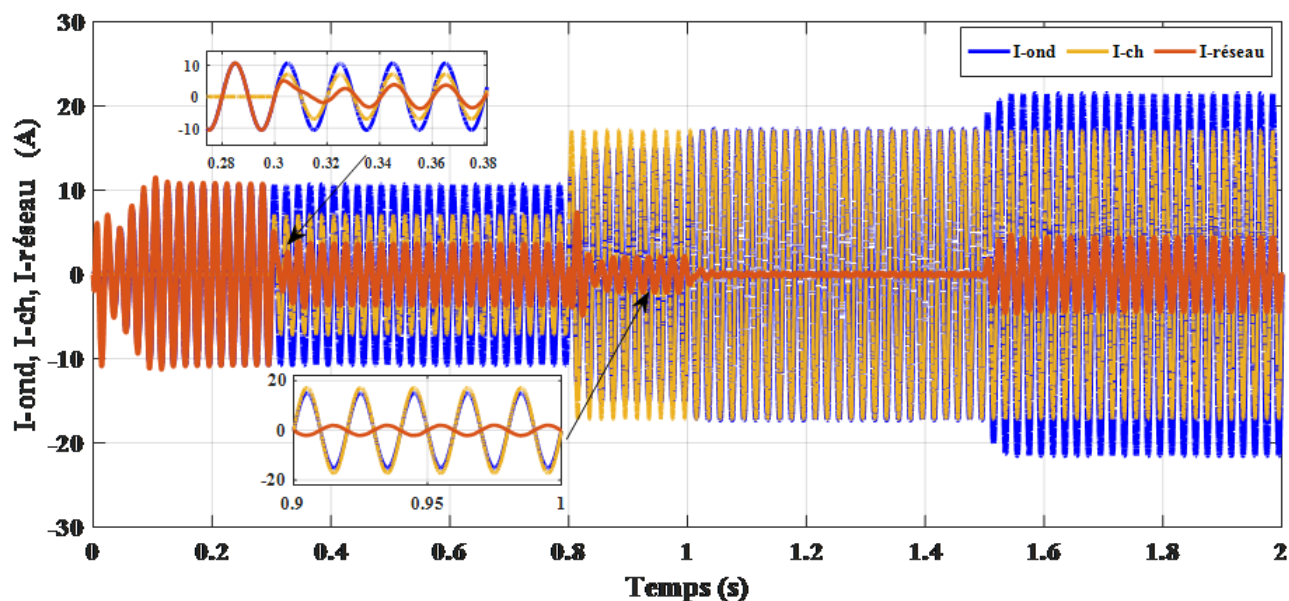


FIGURE 4.18 – L'allure des courants : de l'onduleur, de la charge et du réseau

de la figure 4.18 que :

- Pendant le début de simulation $[0 \text{ et } 0,3 \text{ s}]$: la puissance de la charge est nulle comme elle est mentionnée dans la figure 1.22, donc l'énergie photovoltaïque produite par le générateur *PV* est injectée totalement au réseau comme illustre la figure 4.19.
- Dans les intervalles temporelles $[0,3 \text{ à } 0,8]$ et $[1,5 \text{ à } 2]$, l'énergie produite par le générateur photovoltaïque *GPV* est supérieure à l'énergie demandée par la charge comme le montre la figure 4.6. Donc, le *GPV* alimente la charge et le surplus de puissance est injecté au réseau électrique comme il est constaté sur la figure 4.20. Dans ces cas précédents où une puissance photovoltaïque est injectée dans le réseau électrique, la tension et le courant de chaque phase sont maintenus en phase comme montre la figure 4.21.

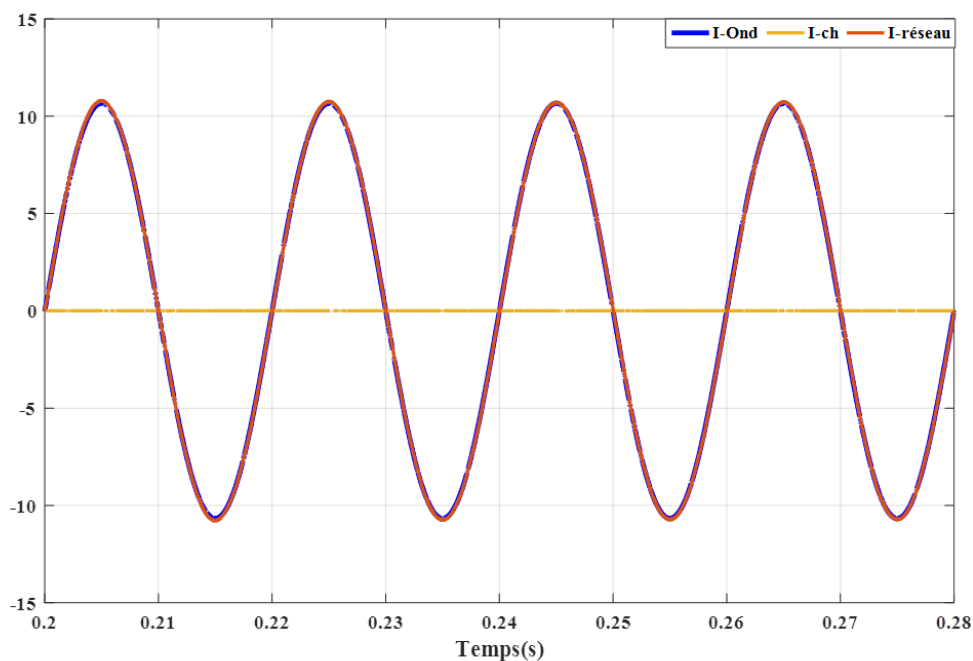


FIGURE 4.19 – Le cas où la puissance de GPV injecter totalement au réseau

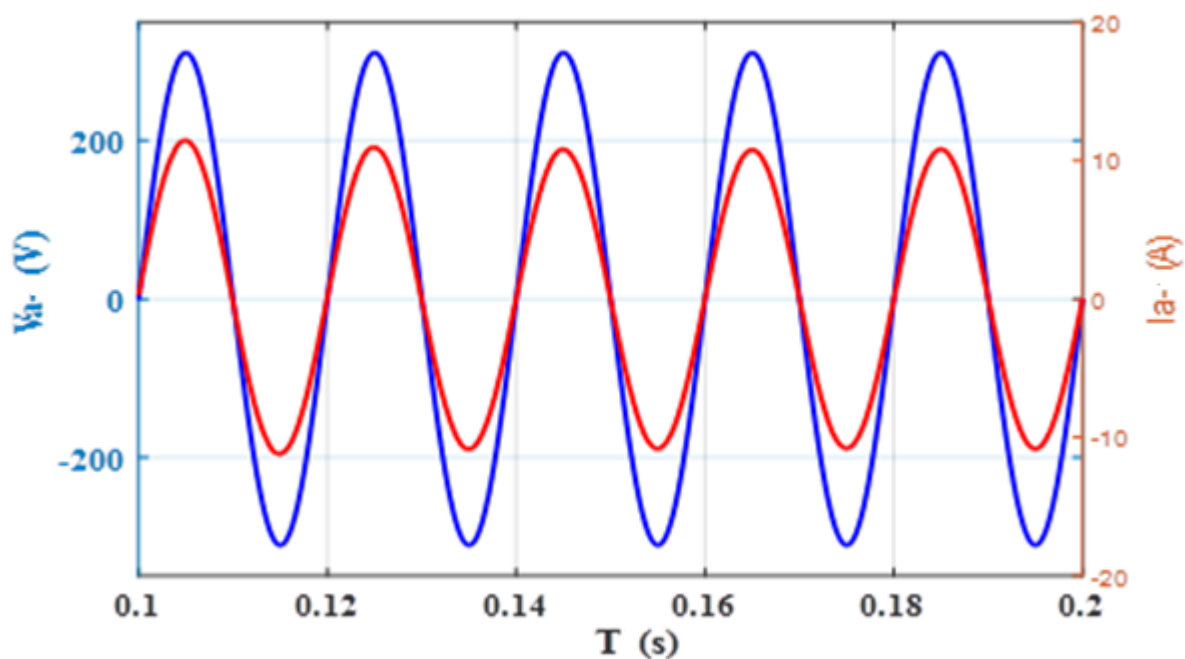


FIGURE 4.21 – La tension et le courant du réseau sont maintenus en phase

- Dans l'intervalle $[0.8\text{à}1\text{s}]$: la consommation d'énergie P_{ch} est supérieure à la production d'énergie photovoltaïque comme illustre la figure 4.6 où la charge demande une

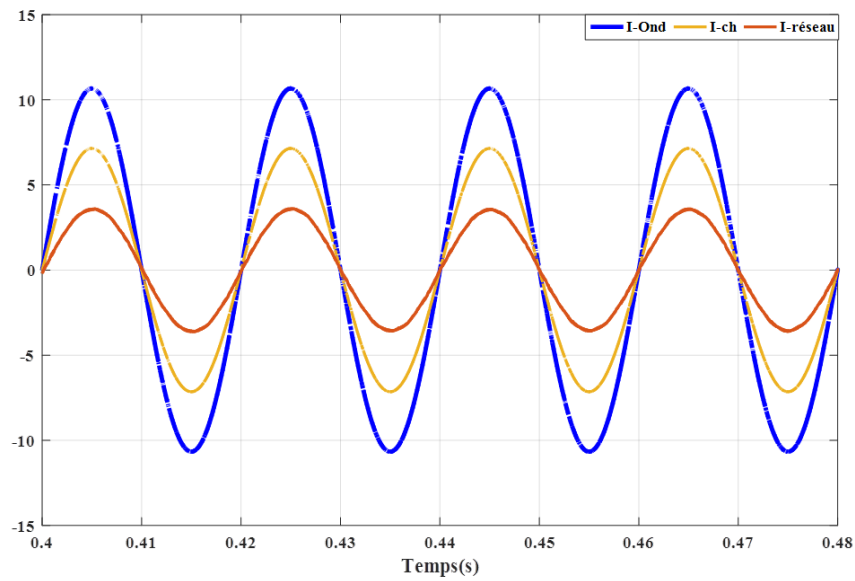


FIGURE 4.20 – le cas où la puissance du générateur supérieure à la puissance demandée puissance plus de $12kW$ mais le GPV peut générer seulement une puissance de $10.5kW$ car l'éclairement est réduit ($700 W/m^2$) comme montre la figure 4.2. Donc, le réseau couvre sa baisse de puissance et la compense par l'énergie nécessaire comme le montre la figure 4.22.

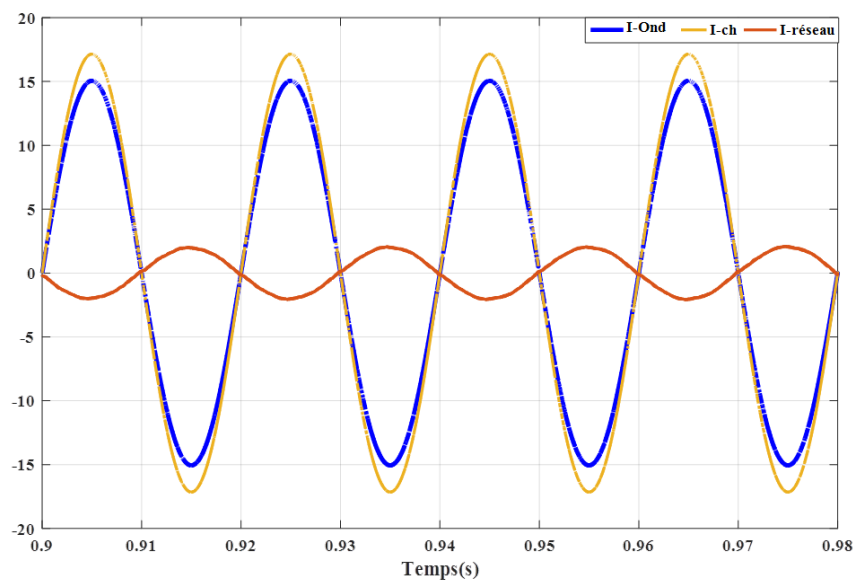


FIGURE 4.22 – Le cas où le réseau couvre l'insuffisance de la puissance PV

Dans ce cas, la tension et le courant du réseau sont maintenus en opposition de phase,

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

car le courant du réseau reflète sa direction pour alimenter la charge et compenser l'insuffisance d'énergie comme sera illustré la figure 4.23.

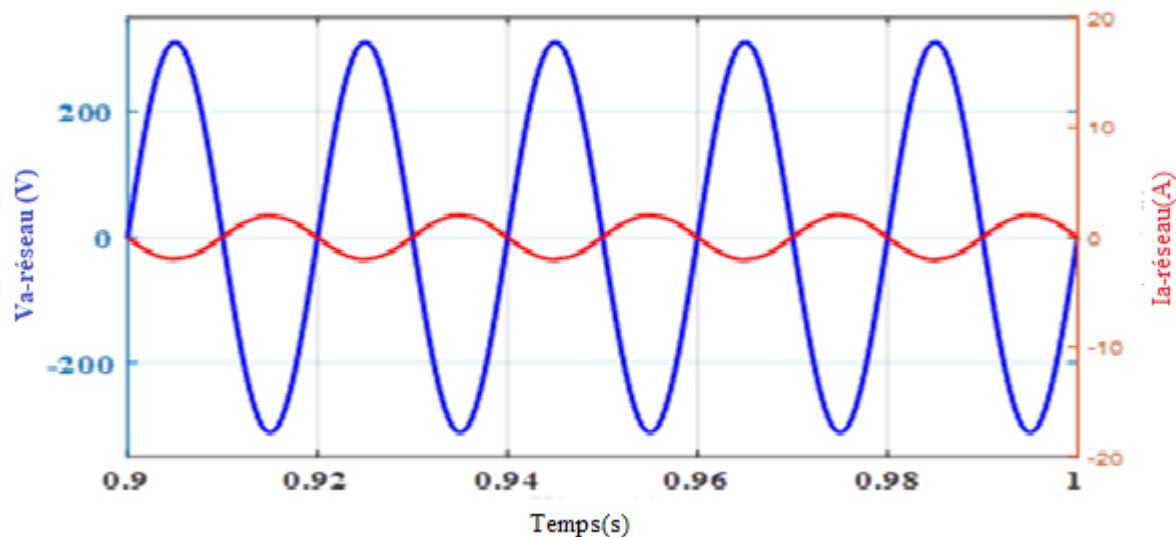


FIGURE 4.23 – La tension et le courant en opposition de phase;(le réseau alimenter la charge)

- Si l'énergie demandée par la charge égale l'énergie solaire produite par le générateur PV, donc, aucune énergie injectée au réseau comme indiqué la figure 4.24.

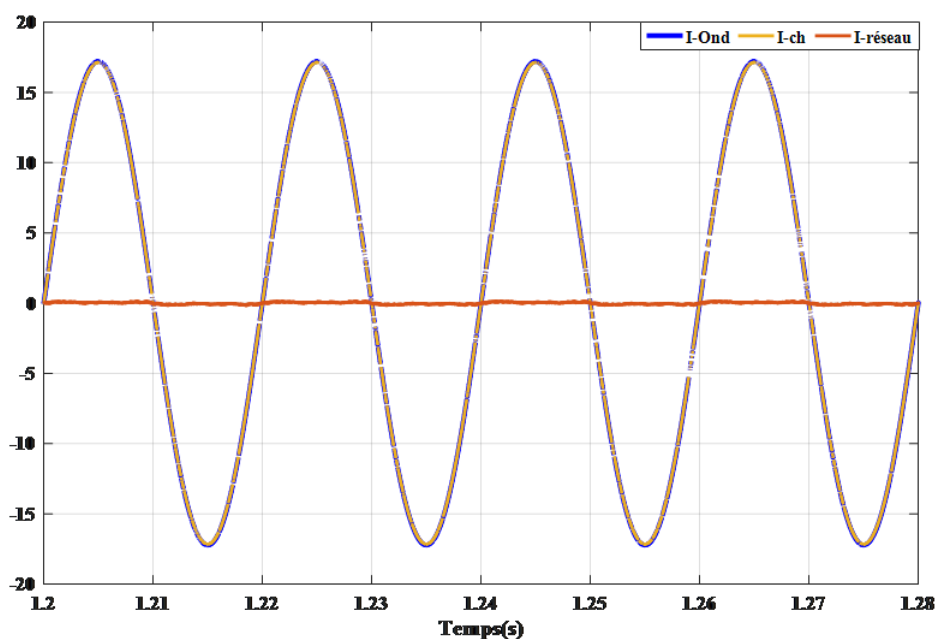


FIGURE 4.24 – L'énergie photovoltaïque produite dirigée totalement à la charge

4.3.4 Les résultats d'optimisation de l'approche RTO-MLIS proposée

Dans ce partie, on va tester les performances et l'efficacité de l'algorithme RTO proposée afin de générer les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté. Ce dernier a besoin de quatre signaux des porteuses dont les angles initiaux sont calculés par l'algorithme d'optimisation de racines de l'arbre RTO. Cette approche d'optimisation est réalisée à l'aide de l'association de programme développé par le langage MATLAB et le système de contrôle sous Simulink. Les résultats de simulation obtenus de différents parties de notre système sont illustrés ci-dessous :

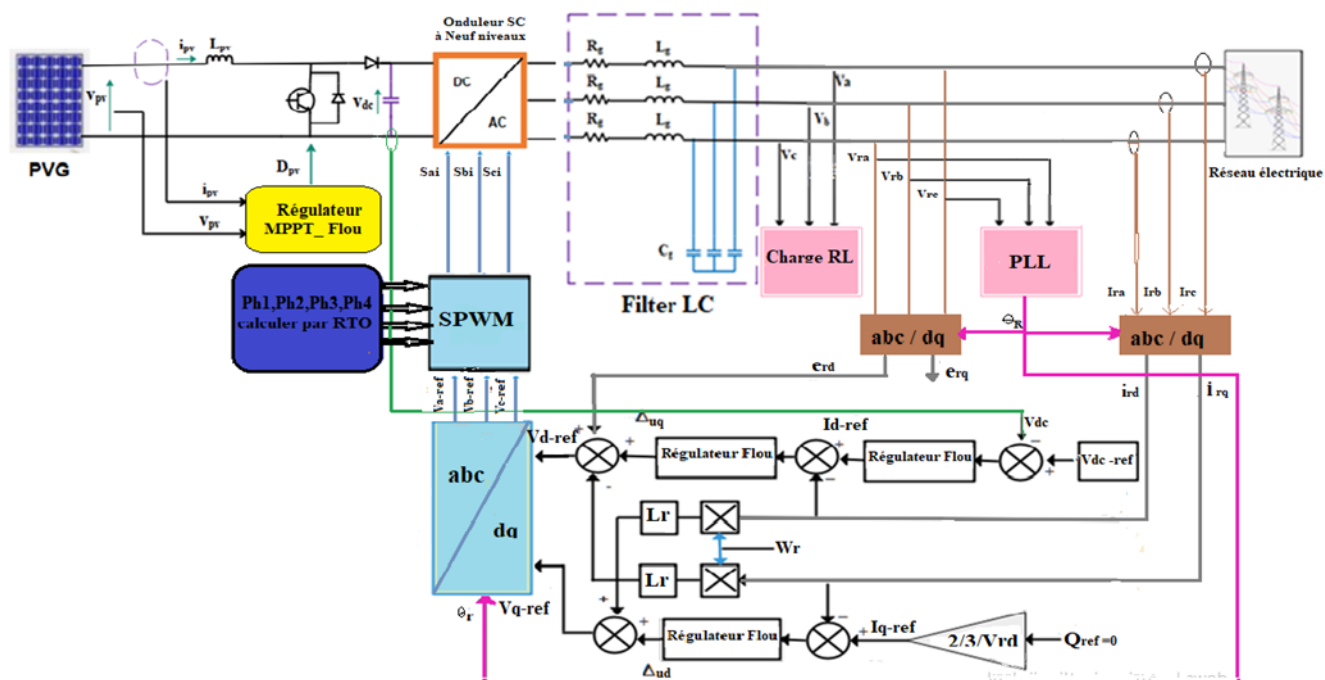


FIGURE 4.25 – Schéma de commande d'un ONNCC par la technique RTO-MLI

Le circuit de commande de douze interrupteurs d'une phase de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté dans le package de Matlab Simulink est illustré dans le figure 4.26

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

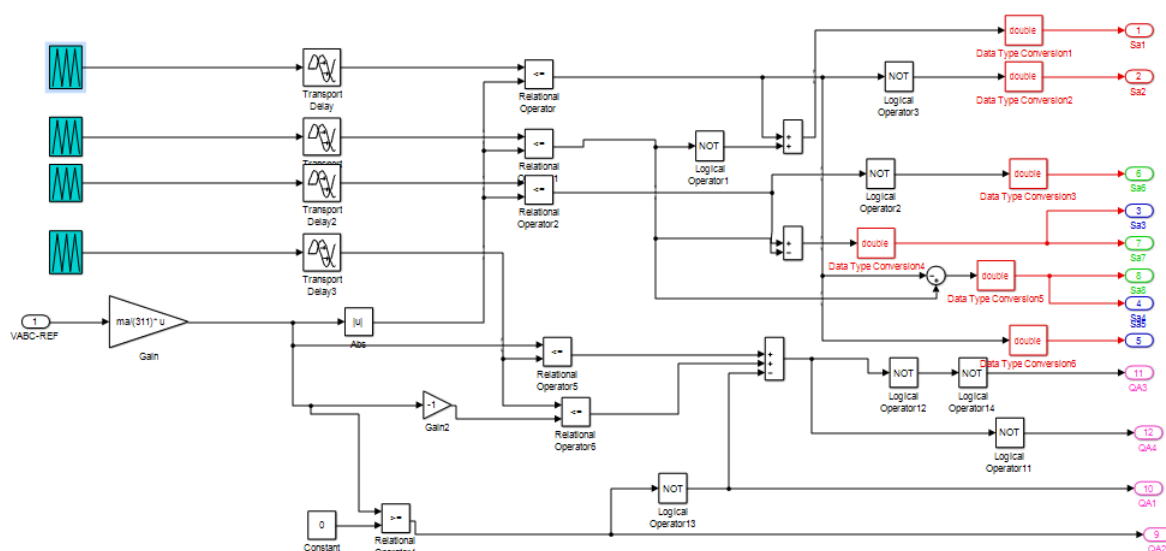


FIGURE 4.26 – Schéma de commande de douze interrupteurs de l'ONNCC par la technique RTO-MLI

Le tableau 4.3 expose les paramètres de l'algorithme RTO proposée pour calculer les angles initiaux Ph_i des porteuses.

TABLE 4.3 – Paramètres de l'algorithme RTO

Parametres	Nom	Valeurs
Nbr de racines	N	20
Nbr de itérations	it_{max}	50
Dimensions des racines	Dim	4
Contraintes	Ph_i	$[0, 2\pi]$
Coefficient plus proche	R_n	0.3
Coefficient randomly	R_r	0.3
Coefficient de continuité	R_c	0.4
Paramètre ajustable 1	b_1	0.2
Paramètre ajustable 2	b_2	2
Paramètre ajustable 1	b_3	1.2

Pour le choix du paramètres du RTO-MLIS, notamment le nombre d'itérations, il a été fixé à 50 (c'est-à-dire : nous avons commencé avec 10 puis 20 puis 30 et enfin 50, ce qui a donné des résultats de simulation satisfaisants).

Les angles initiaux de chaque itération résultants d'après cette aproche d'optimisation

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

RTO sont affichés dans le tableau 4.4.

TABLE 4.4 – Les fitness des racines optimaux

Nbr Itération	Angles Optimaux (rd)	Fonction de fitness THD %
1	$Ph_1 = 4.2646$ $Ph_2 = 4.7610$ $Ph_3 = 4.6692$ $Ph_4 = 2.4644$	0.34
5	$Ph_1 = 5.6334$ $Ph_2 = 3.5340$ $Ph_3 = 4.9457$ $Ph_4 = 1.1826$	0.29
15	$Ph_1 = 5.6337$ $Ph_2 = 3.5359$ $Ph_3 = 4.9457$ $Ph_4 = 4.9467$	0.26
50	$Ph_1 = 5.6273$ $Ph_2 = 3.5350$ $Ph_3 = 4.9503$ $Ph_4 = 1.1712$	0.16

La figure 4.27 et la figure 4.28 montrent les courbes de convergence de la fonction de fitness et le degré d'humidité de l'algorithme RTO, respectivement.

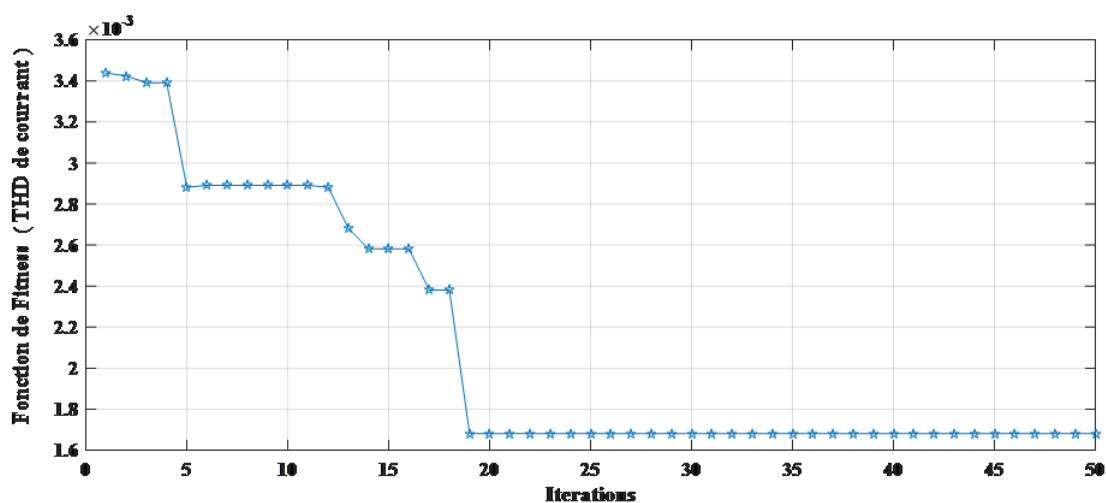


FIGURE 4.27 – Courbes de convergence du RTO pour la fonction de fitness

Par conséquent, nous avons noté la stabilité et la convergence après l'itération numéro 20, ce qui est également indiqué dans les résultats de tableau 4.4

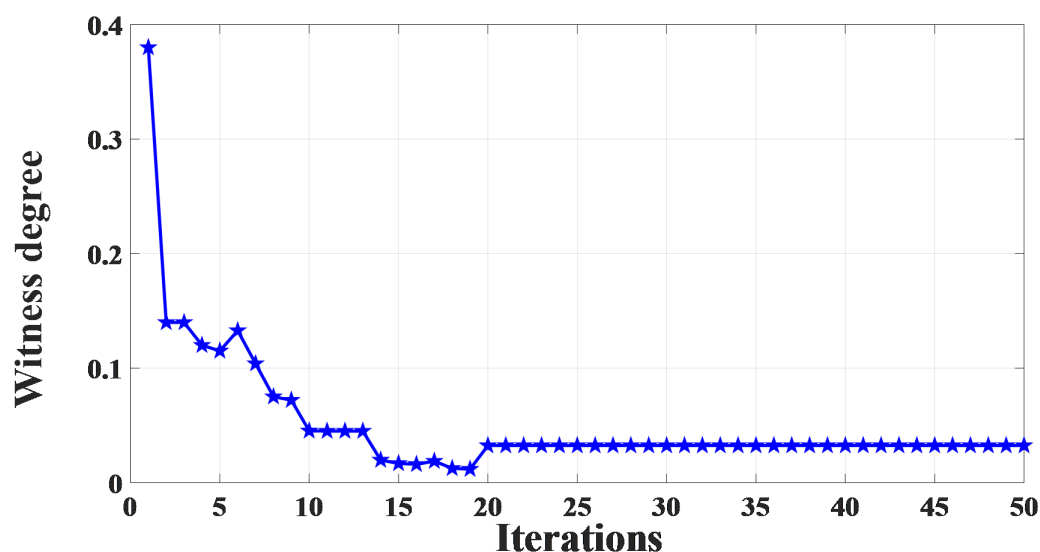


FIGURE 4.28 – Degré d'humidité du RTO

La figure 4.29 présente l'évolution des meilleurs paramètres optimisés Ph_1 , Ph_2 , Ph_3 et Ph_4 en fonction du nombre d'itérations, tandis que la figure 4.30 montre l'image des signaux des porteuses des meilleurs angles qui sont calculés par l'algorithme RTO.

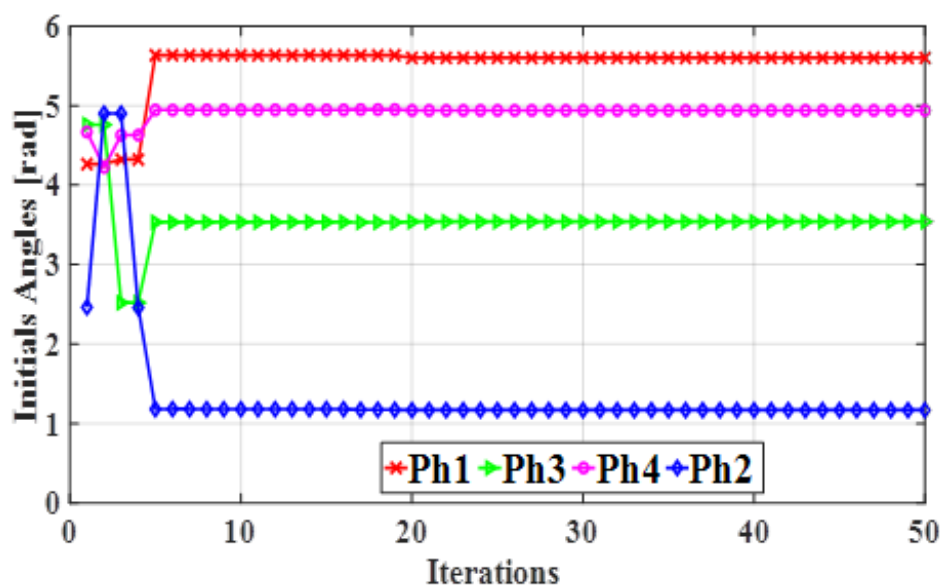


FIGURE 4.29 – Angles initiaux optimaux de chaque génération

L'intersection des quatre porteuses avec les références obtenus de la commande des coutants direct I_d et quadrature I_q de réseau engendre les signaux de différents semi-conducteurs de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté, chaque phase de cet onduleur a besoin de

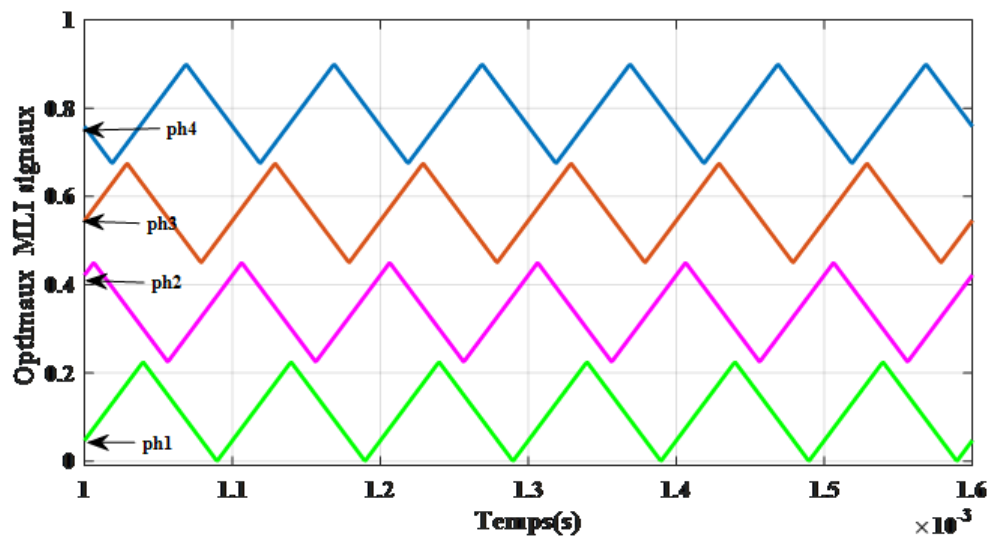


FIGURE 4.30 – Les signaux des porteuses selon les angles optimaux calculés par l’RTO douze interrupteurs semi-conducteurs, les douze signaux sont représentés dans la figure 4.31

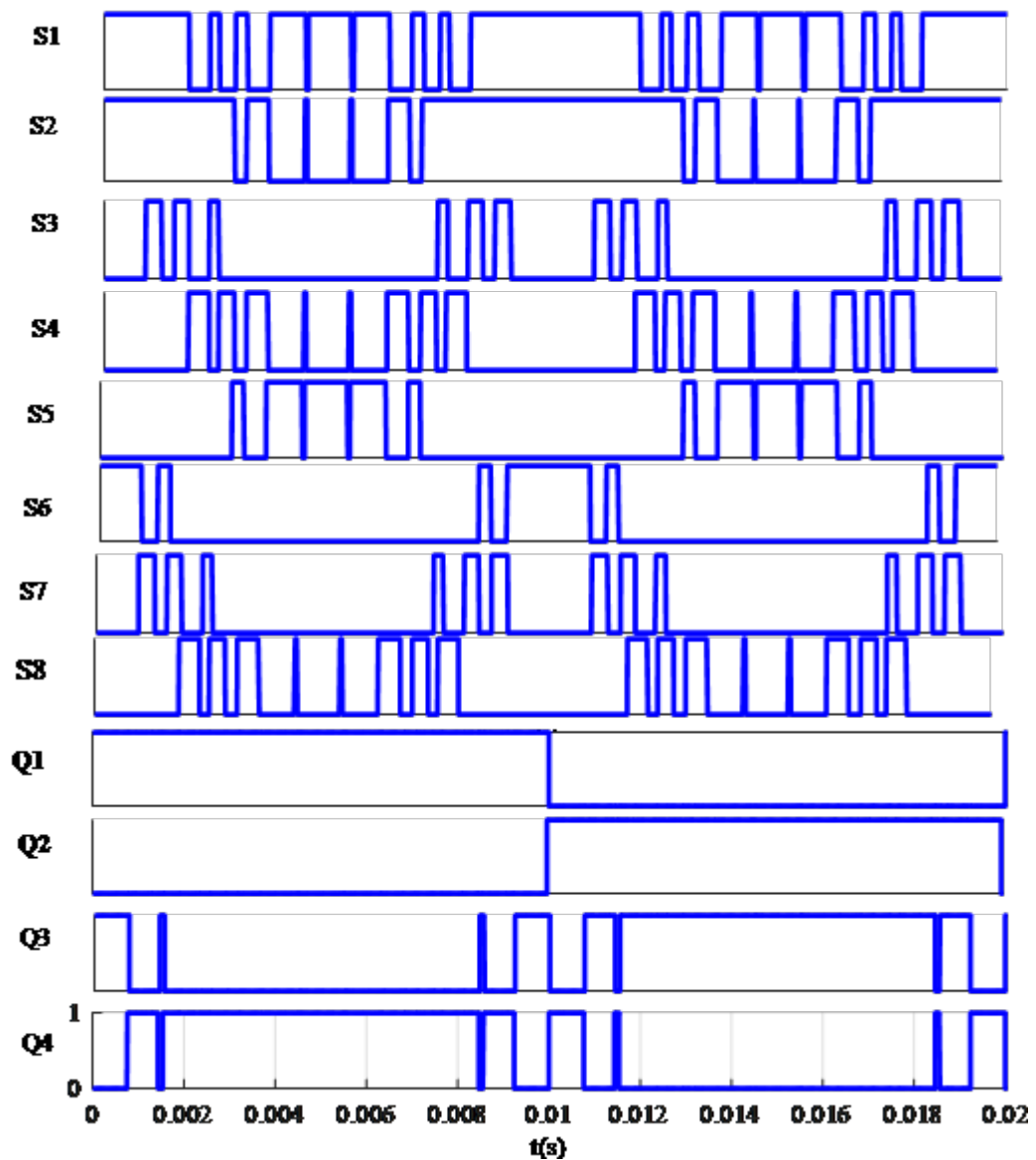


FIGURE 4.31 – Les signaux de différents interrupteurs

Les courants I_d et I_q de réseau électrique après l'utilisation des angles initiaux optimaux obtenus par l'algorithme de RTO sont indiqués dans la figure 4.32 et 4.33 respectivement.

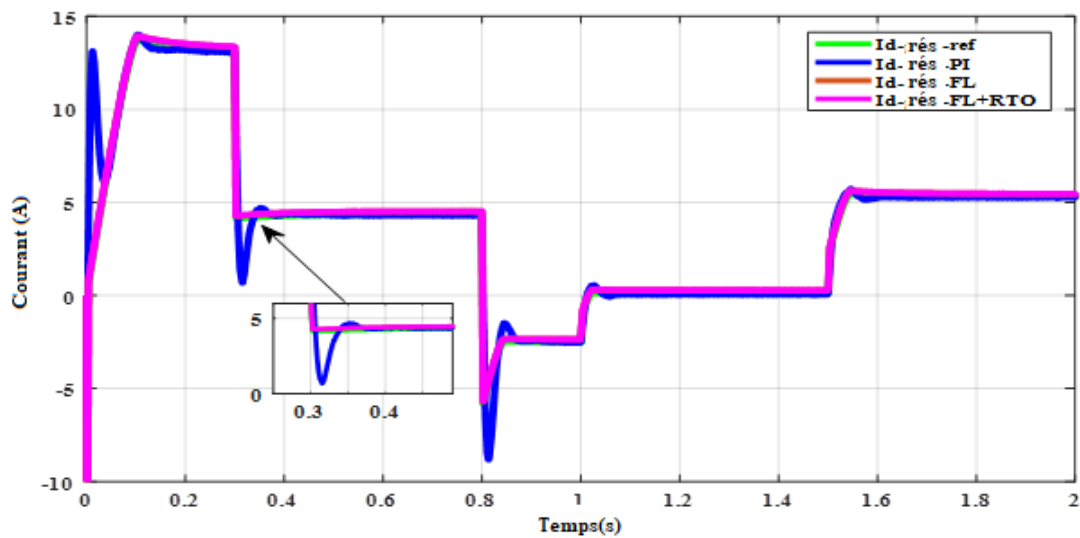


FIGURE 4.32 – Le courant direct de réseau I_d

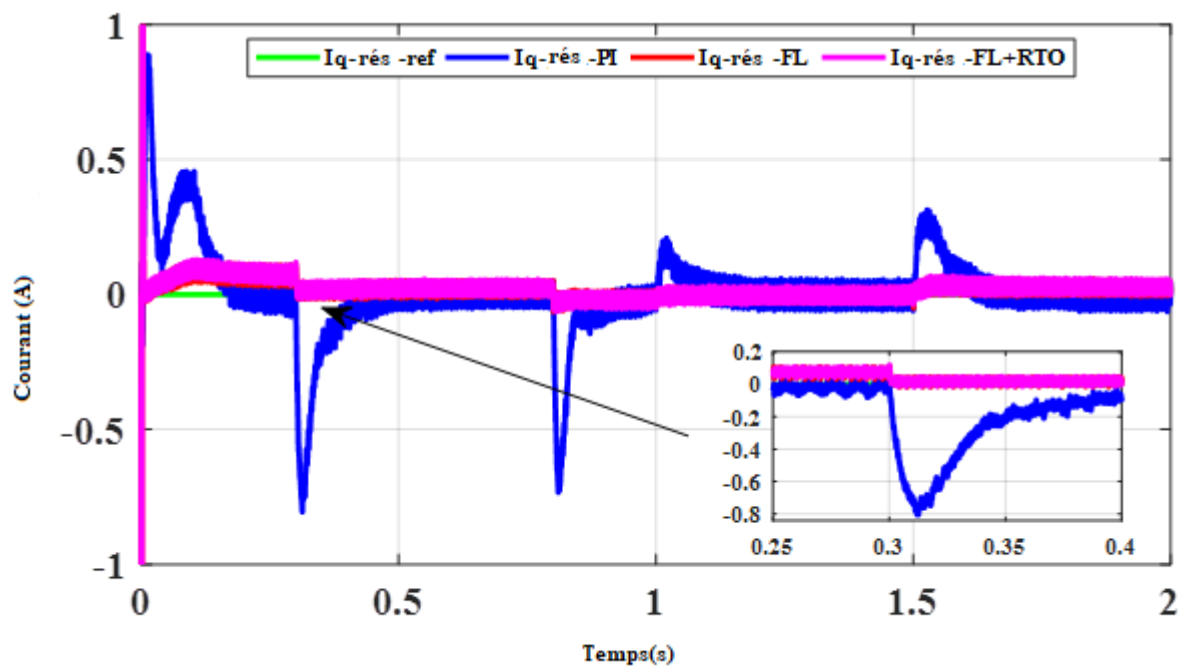


FIGURE 4.33 – Le courant quadrature de réseau I_q

La figure 4.34 montre le courant du réseau de la phase (a) tandis que la figure 4.35 est affiché les courants triphasés du réseau électrique I_a , I_b , I_c .

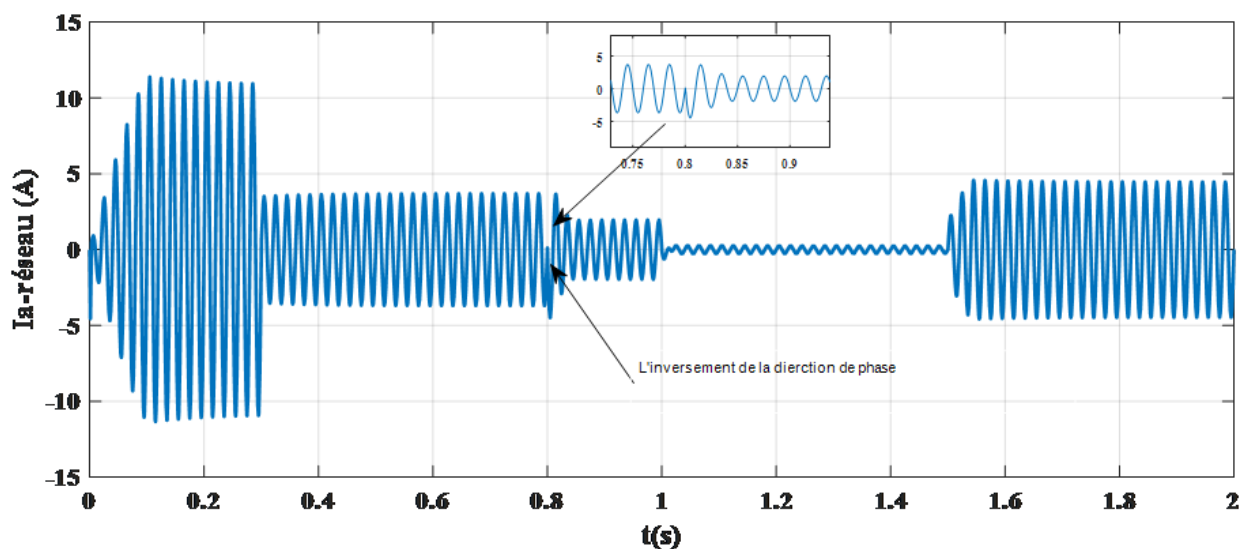


FIGURE 4.34 – Le courant du réseau de phase 'a'

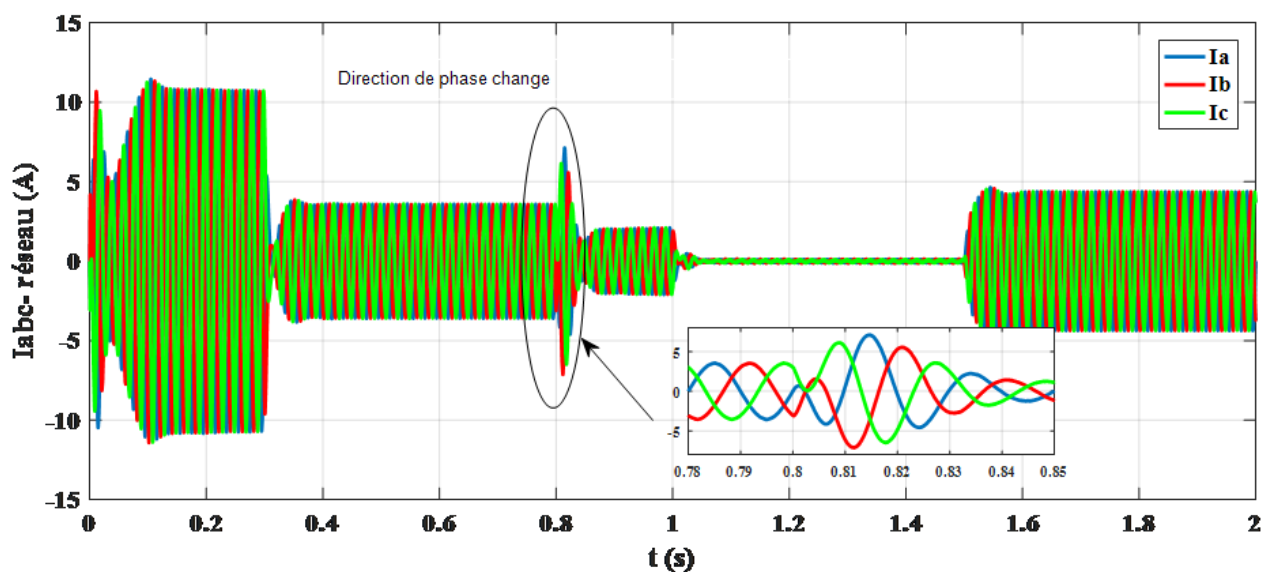


FIGURE 4.35 – Les courants triphasés du réseau I_a , I_b , I_c .

Pour examiner l'influence de l'approche proposée sur la qualité d'énergie injectée au réseau électrique, les optimaux angles initiaux obtenus par l'algorithme RTO sont intégrés dans les signaux des porteuses, les spectres des harmoniques de la tension V_a de sortie de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté à l'aide d'une série de Fourier sont présentés dans la figures 4.36 :

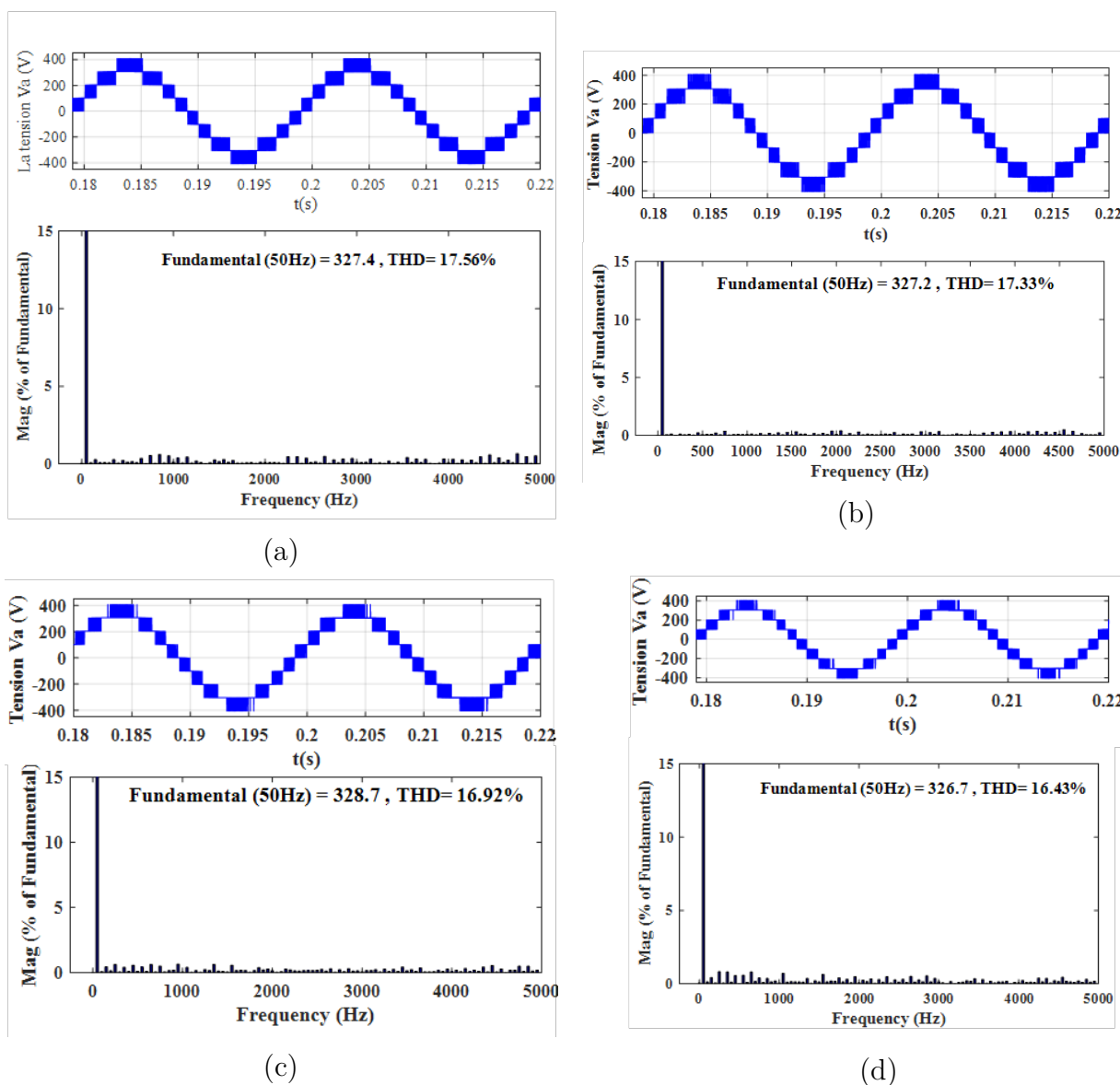


FIGURE 4.36 – Spectres harmoniques de la tension de sortie du OMNCC avec : (a) P_I et $PD - MLIS$, (b) Fl et $PD - MLIS$ (c) P_I et $RTO - MLIS$ et (d) FL et $RTO - MLIS$

La figure 4.37 montre les résultats de FFT du courant injecté au réseau et son THD en fonction de type de commande utilisé pour la commutation de la technique MLIS à plusieurs porteuses.

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

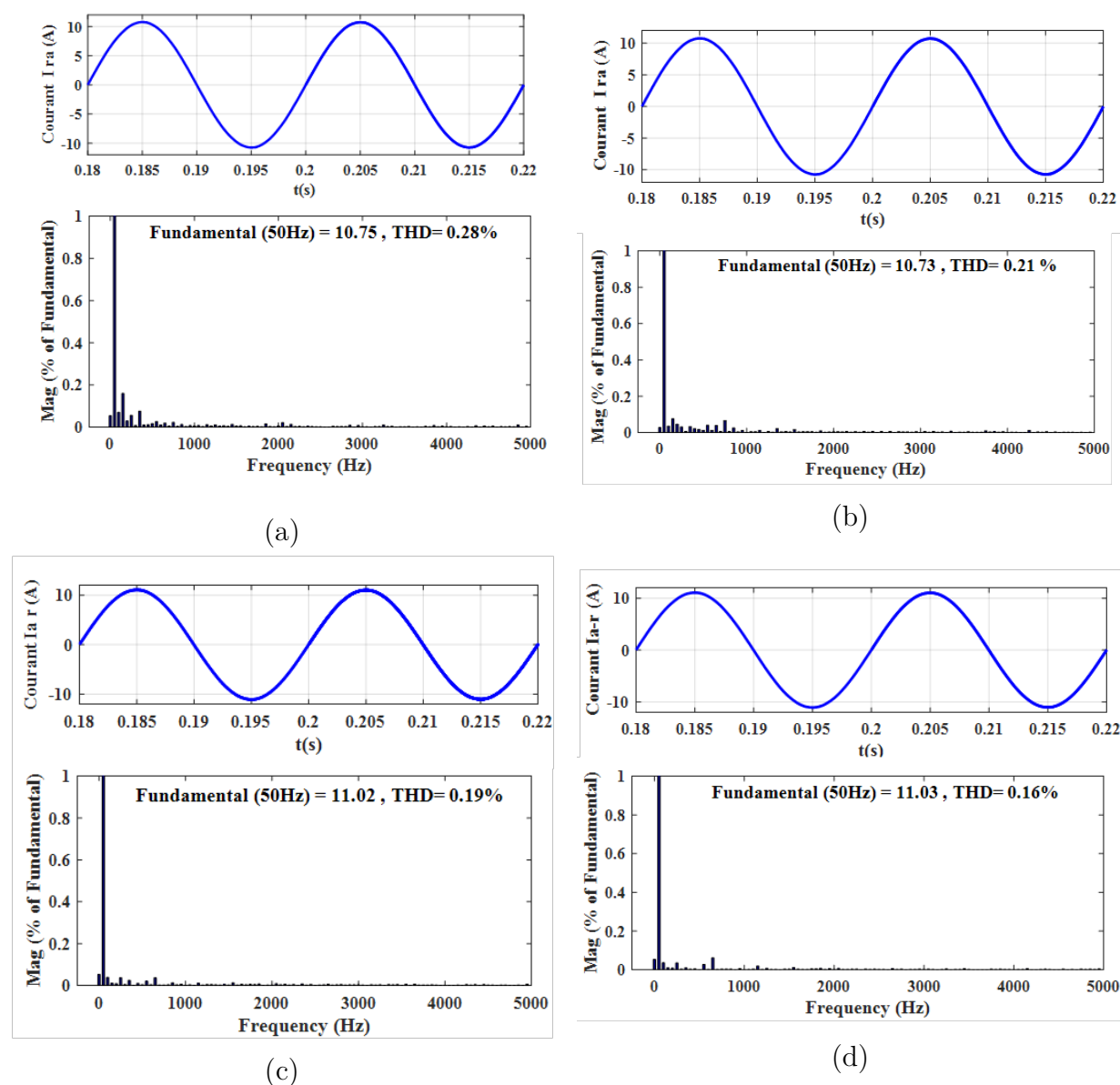


FIGURE 4.37 – Spectres des harmoniques du courant de réseau : (a) *PI* et *PD – MLIS*, (b) *Fl* et *PD – MLIS* (c) *PI* et *RTO – MLIS* et (d) *FL* et *RTO – MLIS*

D'après la figure 4.37a, le courant de réseau a une forme d'onde sinusoïdale avec un THD de 0,28 % dans le cas de l'utilisation d'un *PIC* classique qui est réduit à 0,21% lors de l'application de *FLC* pour contrôler le courant du réseau en utilisant la stratégie SPWM classique, comme illustre la figure 4.37b

Cependant, l'utilisation des angles initiaux optimaux obtenus par l'algorithme RTO dans

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

la technique MLI est un critère très important pour minimiser la distorsion harmonique totale dont l'analyse FFT du courant de réseau présenté sur la figure 4.37d montre que la valeur THD a été considérablement réduite jusqu'à ce qu'elle atteigne 0,16%, ainsi le courant devient très proche du courant sinusoïdal qui peut être injecté dans le réseau avec des performances élevées.

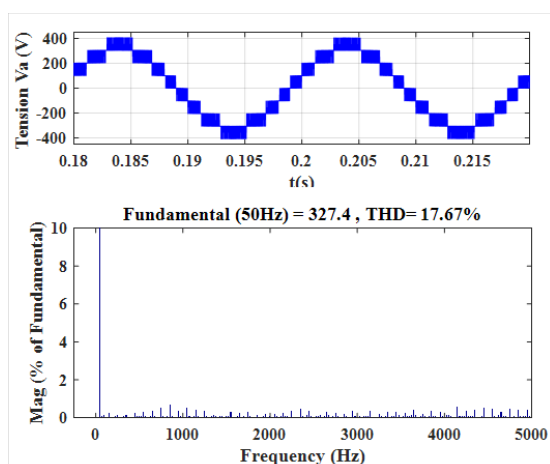
Sur la base du tableau 4.5, une analyse comparative des valeurs de THD obtenues selon les différents contrôleurs de coté courant a été réalisée pour vérifier les performances du MLI multi-porteuses basée sur l'algorithme d'optimisation de RTO.

TABLE 4.5 – Comparaison de THD entre différents techniques MLI selon le type du contrôle du courant utilisé

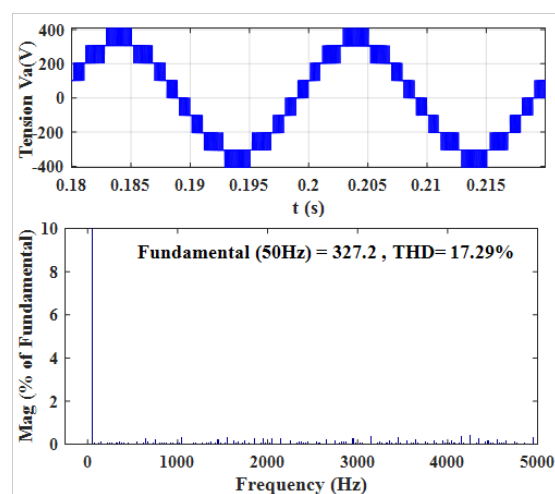
Différents MLI	Les initiaux angles de porteuses (<i>rad</i>)				Fonction de fitness
	Ph_1	Ph_2	Ph_3	Ph_4	THD
PI-PD-MLI	0	0	0	0	0.28
FL-PD-MLI	0	0	0	0	0.21
PI-RTO-MLI	5.6273	3.5350	4.9503	1.1712	0.19
FL-RTO-MLI	5.6273	3.5350	4.9503	1.1712	0.16

Pour examiner l'influence de l'approche proposée sur la commande des onduleurs multi-niveaux, les optimaux angles initiaux obtenus par l'algorithme RTO sont intégrés dans les signaux des porteuses pour contrôler les 16 interrupteurs de l'onduleur neuf niveaux en cascade, une comparaison entre les résultats de FFT de la tension et du courant en fonction de type de la technique de modulation est représenté dans les figures 4.38 et 4.39 respectivement :

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

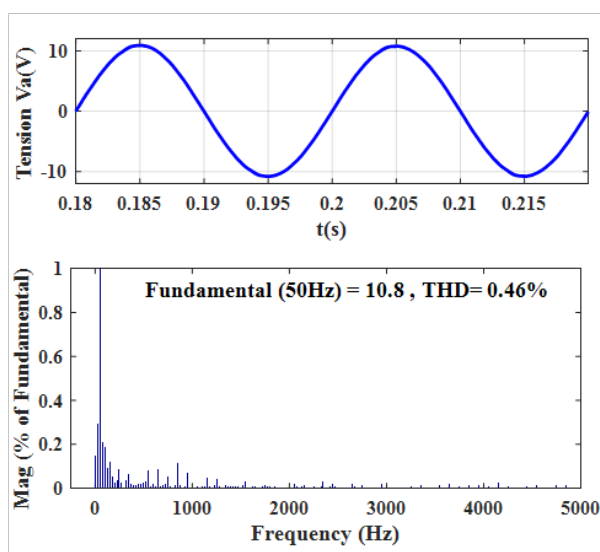


(a) MLIS-POD

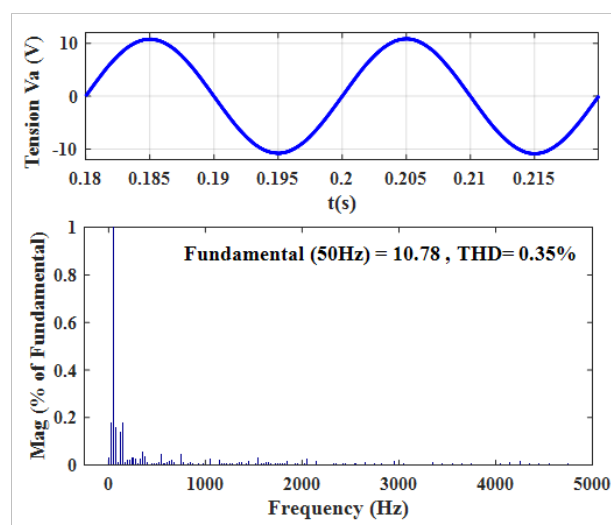


(b) MLIS-RTO

FIGURE 4.38 – La tension de sortie de l'onduleur neuf niveaux en cascade et sa FFT



(a) MLIS-POD



(b) MLIS-RTO

FIGURE 4.39 – Le courant injecté au réseau et sa FFT dans le cas d'utiliser l'ONN-CHB

Enfin, afin de vérifier la performance et l'efficacité de la technique de modulation RTO-MLI proposée pour obtenir le THD optimal, les résultats de la simulation sont comparés avec des

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

autres stratégies de contrôle de commutation dans la littérature. La comparaison est présentée dans le tableau 4.6

TABLE 4.6 – Comparaison entre différents technique MLI dans la littérature

Différents études	Type d'onduleur	Type de MLI	THD	
			Courant I_a	Tension V_a
Réf [155]	7N- CI	PODPS-PWM	0.2	31.02
	7N- CI	PSPWM-3 cycle	2.18	32.37
Réf [199]	7N- PUCI	Traingle PD-SPWM	4.90	18.34
		Sawtooth PD-SPWM	4.54	17.99
Réf [200]	3N- NPC	SPWM	-	31.38
		ED-Modified PWM	-	27.2
Notre étude	9N-CHB	POD-MLIS	0.46	17.67
		RTO-POD-MLIS	0.35	17.29
Notre étude	9N-OCC	PD-MLIS	0.21	17.33
		RTO-PD-MLIS	0.16	16.43

4.4 Discussions des résultats

Les figures 4.7, 4.16 et 4.17 montrent que le contrôle par le régulateur de la logique floue RLF proposé réussit à suivre parfaitement ses références en quelques millisecondes, sans dépassement suite à tout changement d'éclairement solaire ou toute variation de puissance de charge par rapport au régulateur PI classique.

Dans la durée du $0s < t < 0,3s$: la puissance maximale du générateur photovoltaïque extraire par l'algorithme MPPT Flou est injectée totalement au réseau le réseau, dans ce cas-là, on remarque que la tension et le courant de chaque phase sont maintenus en phase comme on vu dans la figure 4.21.

Dans les fenêtres temporelles $[0 \text{ à } 0,8]$ et $[1,5 \text{ à } 2]$, où le GPV produire une puissance maximale extraire par le régulateur MPPT- FLOU est supérieure à la charge demandée. Donc, le surplus de puissance est injecté au réseau électrique comme a été remarqué sur la Figure 4.6.

Dans l'intervalle $[0.8, 0.1 s]$: la charge demande une puissance de 12 kW, et la puissance PV est inférieure à cette demande de charge. Le réseau compense donc ce manque de puissance.

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

Dans ce cas, la tension et le courant du réseau sont maintenus en opposition de phase, comme est illustré dans la figure 4.23, car le courant du réseau reflète sa direction.

Cependant, pour le reste du temps de l'intervalle, la demande de la charge égale la valeur de la puissance maximale du générateur photovoltaïque. Dans ce cas-là, il n'y a pas de puissance à injectée au réseau. Donc, le courant de réseau soit nul comme il est illustré dans la figure 4.24.

Les Figures 4.27 ,4.28 et4.29 montrent que l'algorithme RTO a des meilleures performances, en termes de rapidité, de précision ,de stabilité, et qu'il fonctionne bien avec des systèmes complexes comme les techniques d'optimisations classiques.

On peut noter que les résultats de simulation obtenus qui ont été réalisé selon lesquels l'ONNCC peut augmenter la tension de sortie quatre fois plus que la tension d'entrée V_{bus-dc} avec une haute performance et moins de composants. En effet, la figure4.12 montre que la tension de la sortie de ONNCC est en forme d'escalier avec une valeur maximale de $400V = 4V_{bus-dc}$. Ainsi, elle a un coefficient THD tolérable acceptable (17,56 %). Cette valeur peut être diminuer jusqu'à 16,43 % (comme montre la figure4.36) lors de l'utilisation de la méthode proposée FL-RTO-MLIS pour commander les différents interrupteurs de l'onduleur, le THD est le meilleur que celui d'autres techniques.

Lorsque on utilise la stratégie MLI sinusoïdale classique, l'analyse spectrale du courant de réseau, qui a une forme d'onde sinusoïdale avec 0,28 % de THD par l'utilisation de régulateur PI classique. Cette valeur est réduite à 0,23 % lors de l'application de la contrôleur de la logique floue CLF pour commander le courant du réseau, comme est illustré dans la figure 4.37(a)et4.37(b) respectivement.

L'utilisation des angles initiaux optimaux obtenus par l'algorithme d'optimisation RTO dans la stratégie de commutation MLIS est un critère très important afin de minimiser la distorsion harmonique totale, car l'analyse FFT du courant de réseau présentée dans la Figure 4.37.(d) montre que la valeur THD a été considérablement réduite jusqu'à ce qu'elle atteigne 0,16%, ainsi le courant devient très proche du courant sinusoïdal qui peut être injecté dans le réseau avec des performances élevées.

On peut conclure selon les résultats présentés dans le tableau 4.5 qu'il est très préférable d'utiliser la technique FLC-MLIS-RTO plutôt qu'une autre technique MLIS pour améliorer l'énergie électrique de générateur photovoltaïque injectée au réseau électrique.Les figures 4.38

Chapitre 4. Résultats de simulation de l'approche proposée

et 4.39 montrent que cette technique de modulation proposée est très convenable ainsi pour les onduleurs multiniveaux classiques comme l'onduleur multi-niveaux en cascade.

On constate que d'après le tableau 4.6, les performances au niveau de l'onduleur neuf niveaux à condensateurs commuté avec la commande FLC-RTO-PWM sont meilleures que celles de les autres méthodes dans la littérature.

En effet, après l'analyse de ces résultats on peut dire que la mise en cascade des générateurs photovoltaïques avec l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté nous donne des avantages principaux :

1. L'utilisation d'un seul onduleur en pont en H que conduit à la diminution des harmoniques dans le réseau engendrés par l'utilisation de plusieurs onduleurs comme le cas de l'onduleur multi-niveaux en cascade et permet à la fois l'augmentation de la tension de sortie car le gain de tension est très élevé sans l'utilisation d'un transformateur.
2. L'élimination du problème de fluctuation du point milieu de l'onduleur NPC et FC et diminuer le nombre des interrupteurs et des condensateurs, ce qui donc permet de diminuer le cout de l'installation total.
3. La nouvelle technique de MLI qui repose sur l'algorithme d'optimisation RTO pour calculer les initiaux angles des porteuses de MLI sinusoïdale représente une solution très raisonnable, facile et très efficace pour diminuer le THD du courant injecté au réseau électrique dans les onduleurs multi-niveaux.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, la nouvelle technique MLI proposée qui repose sur l'algorithme d'optimisation RTO pour contrôler les commutations d'un onduleur ONNCC a été sélectionnée et simulée au logiciel Matlab pour injecter la puissance photovoltaïque PV dans le réseau électrique avec un THD minimum. L'onduleur neuf niveaux à CC permet de générer une tension de sortie avec un gain très élevé peut atteindre quatre fois la tension de l'entrée avec un nombre minimum de composants. L'efficacité du contrôleur de la logique floue CLF est très satisfaisante pour réduire le taux de distorsion harmonique et il permet d'obtenir une sortie de haute qualité. Il est possible d'atteindre une valeur THD optimale de 0,21 % par rapport au PIC classique. Cependant, l'insertion de l'algorithme d'optimisation RTO pour optimiser les angles initiaux des porteuses de la technique MLI sinusoïdale est permise de donner des meilleures performances. En effet, une amélioration de 0,12% du THD est observée par rapport à la technique MLIS multi porteuses classique. Par conséquent, la technique RTO-MLI-PD proposée pour contrôler les commutations des interrupteurs de l'onduleur neuf niveaux à condensateur commuté a permis d'obtenir une combinaison optimale entre les deux avantages : d'une part, le nombre de commutateurs et des sources est très réduit et d'autre part, les performances de cet onduleur avec un faible THD permettent de bénéficier la puissance photovoltaïque injectée au réseau électrique en point de vue du coût et de la qualité d'énergie. De plus, les performances de la stratégie de la modulation (RTO-MLI) ont prouvé qu'un courant quasi-sinusoïdal peut être injecté dans le réseau avec un taux de distorsion harmonique total de 0,19 % et 0,16 % pour le contrôleur proportionnel intégral PIC et le contrôleur de logique floue FLC, respectivement. Ainsi que l'algorithme RTO est plus performant, en termes de précision et de stabilité, et il fonctionne avec compétence avec des systèmes complexes comme les techniques d'optimisation méta-heuristiques classiques. Dans un travail futur, un test expérimental de cette technique de modulation proposée peut être mise en œuvre et testée sur le système PV étudié.

"Quant au bonheur de la connaissance, vous ne pouvez l'hériter qu'en faisant de votre mieux, la sincérité de la demande et la justesse de l'intention."

Ibn al-Qayyim

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion générale

Les principaux objectifs lors du contrôle des systèmes photovoltaïque raccordés aux réseaux sont : tirer le maximum d'énergie solaire disponible pour satisfaire les variations instantanées de la demande de la charge sans violer aucune des contraintes existantes dans le système et d'autre part, réduire les harmoniques des signaux qui résultants lors de connexion de réseau. Diverses limitations du système photovoltaïque raccordé au réseau électrique sont engendrées par des composants de conversion de puissance : des limitations opérationnelles résultantes de les onduleurs DC/AC et de leurs accessoires. Ce présent travail s'instréssé à l'étude d'une source photovoltaïque de puissance de 15 kWc associée à une nouvelle structure d'un onduleur multi niveaux connectée au réseau électrique basée sur une nouvelle stratégie de réduction des harmoniques qui consiste à déterminer les angles initiaux des porteuses par une méthode d'optimisation inspirée de la nature. Cette approche permet de garantir un fonctionnement optimal de cette source PV avec moins des harmoniques possibles.

Dans cette thèse, une contribution à l'étude d'un générateur photovoltaïque relié à un onduleur multi niveaux à condensateur commuté raccordé au réseau électrique est proposée et la méthodologie est résumée en quatre chapitre comme suite :

Le premier chapitre est dédié à l'état de l'art des systèmes PV connectés aux réseaux et aux notions de base nécessaires à la compréhension de ces systèmes photovoltaïques et de leurs différents composants. Ensuite, nous avons présenté quelques modèles des différents éléments qui les constituent (module, générateur, convertisseurs, ...) ainsi que leurs différentes architectures.

Conclusion

Dans la deuxième partie, nous avons présenté de manière détaillée les structures classiques des onduleurs multiniveaux, ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque structure. Ensuite, afin de remédier à certains inconvénients, nous avons proposé une nouvelle structure d'onduleur multiniveau à condensateur commuté. Cette dernière permet, grâce à sa topologie spécifique, d'augmenter la tension produite par le générateur photovoltaïque à la charge. De plus, cette structure ne nécessite qu'une seule source PV pour atteindre les niveaux désirés, et elle nécessite moins de composants par rapport aux différents onduleurs multiniveaux classiques. La troisième partie expose une nouvelle approche de commande MLI triangulo-sinusoidal basée sur la technique d'optimisation de RTO pour générer les angles initiaux optimaux des porteuses afin de réduire les harmoniques engendrés par les onduleurs multiniveaux à condensateurs commutés. De plus, les différentes techniques de contrôle des différents composants de notre système ont été présentées.

L'essentiel de ce travail est présenté dans le dernier chapitre, où les résultats obtenus par simulation sous Matlab/Simulink sont exposés. Le fonctionnement d'une source PV connectée au réseau électrique via un onduleur triphasé à neuf niveaux à condensateur commuté est décrit. Les principaux résultats obtenus sont discutés et comparés à ceux publiés dans les références bibliographiques.

En conséquence, plusieurs conclusions ont été tirées :

- Étant donné que les sources photovoltaïques sont des sources non linéaires et très sensibles aux conditions météorologiques, nous avons utilisé la technique de commande floue pour mettre en place un étage d'adaptation de puissance qui a produit des résultats satisfaisants.
- La régulation de la tension continue du bus V_{DC} du système PV permet d'améliorer le fonctionnement global du système et de répondre aux exigences d'interconnexion des onduleurs multiniveaux. Il est possible d'atteindre cet objectif en utilisant une fréquence de découpage très basse, ce qui permet de réduire les pertes par commutation au niveau des interrupteurs de puissance.
- L'onduleur multiniveaux à condensateur commuté peut également permettre une augmentation de la tension de sortie sans recourir à un transformateur, grâce à un nombre réduit de composants.

Conclusion

- L'utilisation d'onduleurs multiniveaux à condensateurs commutés a eu un impact significatif sur la réduction du nombre de sources d'entrée CC isolées nécessaires, ainsi que sur le nombre de commutateurs requis. Cela permet de réduire le coût global du système PV.
- La nouvelle approche de commande proposée, basée sur la recherche des angles initiaux des signaux de porteuses de la technique de MLI grâce à la méthode d'optimisation de RTO, est une technique d'optimisation très efficace et facile à mettre en œuvre. Cette approche permet de générer des signaux électriques optimaux avec un THD minimal possible.
- L'utilisation d'un seul onduleur en pont en H permet de réduire les harmoniques dans le réseau, contrairement à l'utilisation de plusieurs onduleurs tels que l'onduleur multiniveaux en cascade. De plus, cela permet d'augmenter la tension de sortie, car le gain de tension est très élevé, sans avoir recours à l'utilisation d'un transformateur.
- Avec une boucle de régulation bien définie basée sur la commande floue, les courants du réseau suivent leurs références même lors des variations de charge tout au long de la période de simulation.
- Cette étude a permis d'obtenir une combinaison optimale entre l'utilisation d'une topologie d'onduleur avec moins nombre de composants possibles d'une part, et la maximisation de l'efficacité de l'onduleur à plusieurs niveaux en réduisant le taux de distorsion d'harmonique THD par l'utilisation de la nouvelle approche basée sur l'optimisation des angles initiaux d'autre part.

Perspective

Enfin, ce travail ouvre un ensemble de perspectives distinctes pour améliorer ce type de système, qui sont détaillées ci-dessous :

- L'élaboration d'un système PV intégrant un élément de stockage pour assurer la continuité de l'énergie photovoltaïque tout au long de la journée.
- La possibilité d'éliminer un convertisseur DC/DC et de le remplacer par un onduleur à condensateur commuté, ce qui permet d'augmenter la tension tout en suivant la puissance maximale du générateur photovoltaïque et en tenant compte des fluctuations de

Conclusion

charge.

- L'utilisation de techniques MLI avancées pour explorer de nouvelles topologies d'onduleurs multiniveaux avec un nombre minimal de composants.
- La possibilité de mettre en œuvre pratiquement l'onduleur à neuf niveaux à condensateur commuté en utilisant la carte DSpace.
- Réaliser un banc d'essai basé sur les résultats de simulation afin de concrétiser ce travail et mettre en œuvre ce projet sur le terrain.

Nous souhaitons approfondir d'autres topologies d'onduleurs multiniveaux à condensateur commuté qui utilisent moins de composants tout en ayant un plus grand nombre de niveaux, afin d'éviter l'utilisation de ponts en H dans les onduleurs. Cette approche serait bénéfique pour les systèmes à forte puissance et à tension moyenne et élevée. De plus, nous visons à éliminer l'utilisation de filtres afin d'exploiter au mieux l'énergie solaire disponible en Algérie.

Bibliographie

- [1] Ali Bughneda et al. « Review of multilevel inverters for PV energy system applications ». In : Energies (14.6) , 2021, p. 1585. <https://doi.org/10.3390/en14061585>
- [2] Rabiaa Mechouma. « Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques: Applications pour les charges commerciales ». Thèse de doctorat. Université de Batna 2, 2015.
- [3] D Jones et al. « Ember's Global Electricity Review is a comprehensive look at the international electricity transition». Global Electricity Review (Issue March). 2020.
- [4] Mekhloufi .MA, Korichi .D et Arif .S. « Compensation des harmoniques d'un système PV connectée au réseau électrique basse tension.» In : <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37244899>.
- [5] Samir Kouro et al. « NPC multilevel multistring topology for large scale grid connected photovoltaic systems ». In : The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. IEEE. 2010, p. 400-405.
- [6] Junfeng Liu et al. « A switched-capacitor multilevel inverter with reduced power components in current loops for renewable energy generation ». In : Electric Power Components and Systems 47.9-10 (2019), p. 876-888
- [7] Xing Zhang et al. « Multilevel inverters for grid-connected photovoltaic applications: Examining emerging trends ». In : IEEE Power Electronics Magazine 5.4 (2018), p. 32-41.
- [8] R Divyasharon, R Narmatha Banu et D Devaraj. « Artificial neural networkbased MPPT with CUK converter topology for PV systems under varying climatic conditions ». In : 2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS). IEEE. 2019, p. 1-6.
- [9] Mohamed A Eltawil et Zhengming Zhao. « MPPT techniques for photovoltaic applications ». In : Renewable and sustainable energy reviews 25 (2013), p. 793-813.
- [10] Amirreza P, Mehdi N et Ali E. « A review of modulation and control techniques for multilevel inverters in traction applications ». In : IEEE Access 9 (2021), p. 24187-24204.
- [11] MD Udayakumar et al. « An advanced control technique for a Grid-Tied Hybrid Renewable energy system with Reciprocated sinusoidal PWM methodology ». In : IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. T. 623. 1. IOP Publishing. 2019, p. 012018.

- [12] C Benachaïba, B Mazari et M Rahli. « Minimisation des Courants Harmoniques par la Technique d'Optimisation de la commutation Forcée d'un Convertisseur AC/DC ». In : Sciences & Technologie. B, Sciences de l'ingénieur (2004), p. 71-74.
- [13] Omar Bouhali. « Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique ». Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [14] Alexandre Leredde. « Etude, commande et mise en œuvre de nouvelles structures multiniveaux ». Thèse de doctorat. Toulouse, 2011.
- [15] M Yaïchi et al. « Structure des onduleurs multiniveaux asymétriques" Applications aux systèmes photovoltaïques ». In : International Conference on Energy and Sustainable Development. T. 29. 2011, p. 30.
- [16] Y Sahali et MK Fellah. « Technique de Modulation à Sélection d'Harmoniques à Eliminer (SHE PWM) pour la Commande des Onduleurs de Tension Trois Niveaux Monophasés et Triphasés ». In : Intelligent Control and Electrical Power Systems Laboratory ICEPS, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès (2003).
- [17] Md Reyaz Hussan et al. « A novel switched-capacitor multilevel inverter topology for energy storage and smart grid applications ». In : Electronics 9.10 (2020), p. 1703.
- [18] PM Lingom et al. « Analysis and control of PV cascaded H-bridge multilevel inverter with failed cells and changing meteorological conditions ». In : IEEE Transactions on Power Electronics 36.2 (2020), p. 1777-1789.
- [19] Yutian Lei et al. « A 2-kW single-phase seven-level flying capacitor multilevel inverter with an active energy buffer ». In : IEEE Transactions on Power Electronics 32.11 (2017), p. 8570-8581.
- [20] Tomas Modeer et al. « Design of a GaN-based interleaved nine-level flying capacitor multilevel inverter for electric aircraft applications ». In : IEEE Transactions on Power Electronics 35.11 (2020), p. 12153-12165.
- [21] S Rivera et al. « Cascaded H-bridge multilevel converter multistring topology for large scale photovoltaic systems ». In : 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE. 2011, p. 1837-1844.
- [22] Leopoldo G Franquelo et al. « The age of multilevel converters arrives ». In : IEEE industrial electronics magazine 2.2 (2008), p. 28-39.

- [23] Virginie Guenegues. « Contribution l'étude des convertisseurs multiniveaux destinés aux applications moteurs rapides ». Thèse de doct. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2009.
- [24] Seyed Hadi Latifi Majareh et al. « Design, analysis and implementation of a generalised topology for multilevel inverters with reduced circuit devices ». In : IET Power Electronics 12.14 (2019), p. 3724-3731.
- [25] A Talha et S Harrouni. « Etude d'une Cascade de deux Générateurs Photovoltaïques-Onduleur Multiniveaux NPC-MSAP ». SISTH , International conference en electric engineering , CEE 2008.
- [26] Jean-Sébastien Mariéthoz. Etude formelle pour la synthèse de convertisseurs multiniveaux asymétriques. Rapp. tech. EPFL, 2005.
- [27] Xueyang Jiang. « Étude comparative de structures de convertisseurs pour les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique moyenne tension ». Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières, 2019.
- [28] Sambhani Madhu Babu et Beeramangalla Lakshminarasaiah Narasimharaju. « Single-phase boost DC-link integrated cascaded multilevel inverter for PV applications ». In : IET Power Electronics 13.10 (2020), p. 2086-2095.
- [29] MR Banaei, B Nayeri et E Salary. « Single input multi output dc/dc converter: An approach to voltage balancing in multilevel inverter ». In : Journal of Electrical Engineering and Technology 9.5 (2014), p. 1537-1543.
- [30] Ayoub Nouaiti et al. « Experimental implementation of a low-cost single phase five-level inverter for autonomous PV system applications without batteries ». In : Engineering, Technology & Applied Science Research 8.1 (2018), p. 2452-2458.
- [31] Ahmed Sheir, Mohamed Z Youssef et Mohamed Orabi. « A novel bidirectional T-type multilevel inverter for electric vehicle applications ». In : IEEE Transactions on Power Electronics 34.7 (2018), p. 6648-6658.
- [32] Youhei Hinago et Hirotaka Koizumi. « A single-phase multilevel inverter using switched series/parallel dc voltage sources ». In : IEEE transactions on industrial electronics 57.8 (2009), p. 2643-2650.
- [33] Youhei H et Hirotaka K « A modulation method for capacitor voltage ripple reduction of the switched-capacitor inverter using series/parallel conversion ». International Conference on Industrial Technology. IEEE. 2011p. 105-109.

- [34] Youhei Hinago et Hiroataka Koizumi. « A switched-capacitor inverter using series/parallel conversion with inductive load ». In : IEEE Transactions on industrial electronics 59.2 (2011), p. 878-887.
- [35] Elyas Zamiri et al. « A new cascaded switched-capacitor multilevel inverter based on improved series–parallel conversion with less number of components ». In : IEEE Transactions on Industrial Electronics 63.6 (2016), p. 3582-3594.
- [36] Suresh Velliangiri, Senthilkumar Ramasamy et Prem Ponnusamy. « Design of nine step switched capacitor multilevel inverter and its cascaded extension ». In : International Journal of Circuit Theory and Applications 49.4 (2021), p. 1182-1201.
- [37] Jagabar Sathik Mohd Ali et Vijayakumar Krishnaswamy. « An assessment of recent multilevel inverter topologies with reduced power electronics components for renewable applications ». In : Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018), p. 3379-3399.
- [38] Krishna Kumar Gupta et Shailendra Jain. « A novel multilevel inverter based on switched DC sources ». In : IEEE Transactions on Industrial Electronics 61.7 (2013), p. 3269-3278.
- [39] Hania Aboub, Rabiaa Mechouma et Boubekour Azoui. « Switched Capacitor Nine-level inverter with reduced components for Grid connected PV systems using Fuzzy logic controller ». In : International Journal of Energetica 7.1 (2022).
- [40] Mohammad Fallah Talooki et al. « A novel high step-up switched-capacitor multilevel inverter with self-voltage balancing ». In : IEEE Transactions on Power Electronics 36.4 (2020), p. 4352-4359.
- [41] H Aboub et al. « A New Multicarrier Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) Strategy based on Rooted Tree Optimization (RTO) Algorithm for Reducing Total Harmonic Distortion (THD) of Switched-Capacitor Nine-level Inverter in Grid-connected PV systems ». In : Indonesian Journal of Science and Technology 7.1(2022), p. 19-36.
- [42] Arnold N’Goran. « Contrôle optimal et gestion énergétique d’une station d’énergie autonome par optimisation robuste ». Thèse de doct. Université Paris sciences et lettres, 2020.
- [43] L Abbassen et al. « Modélisation et Commande d un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau Electrique ». In : ICRE. T. 15. 2012, p. 16.
- [44] Maamri .M, Tandjaoui M. N et Bouzeboudja H. « La méthode des essaims de particules et celle du

- loup gris pour l'optimisation d'un système hybride d'énergie renouvelable en algérie ». Rev.Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg. Vol. 65, 3–4, pp. 205–210, Bucarest, 2020
- [45] Wilna L et al. « Analyse économique d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau: une étude de cas en Guyane ». Université France Guiana,2022
- [46] Amin B. « Trois Décennies D'énergie Solaire Photovoltaïque au Maroc ». In : EcoActu: Casablanca, Morocco (2019).
- [47] Arnaud Du Fayet de La Tour. « Economic analysis of the photovoltaic industry: globalisation, price dynamics, and incentive policies ». Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2012.
- [48] Domenico Curto et al. « First Life cycle impact considerations of two wave energy converters ». In : 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). IEEE.2018, p. 1-5.
- [49] M Darameičikas et al. « Design of a DC-DC converter in residential solar photovoltaic system ». In : Journal of Physics: Conference Series. T. 1174. 1. IOP Publishing. 2019, p. 012006.
- [50] Fateh Slama. « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ». Thèse de doctorat, sétif, 2018.
- [51] Waleed Al-Saedi, Stefan W Lachowicz et Daryoush Habibi. « An optimal current control strategy for a three-phase grid-connected photovoltaic system using Particle Swarm Optimization ». In : 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference. T. 1. IEEE. 2011, p. 286-290.
- [52] Boualem Boukezata et al. « Système solaire photovoltaïque connecté au réseau électrique et associé à un filtre actif parallèle ». Symposium de Génie Électrique 2014.
- [53] Van-Linh Nguyen. « Couplage des systèmes photovoltaïques et des véhicules électriques au réseau: problèmes et solutions ». Thèse de doctorat Université de Grenoble, 2014.
- [54] Chabakata Mahamat. « Analyse et commandes des convertisseurs multi-niveaux pour un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique ». Thèse de doctorat, Université Paris 2018.
- [55] Fatiha Sahnoune, M Belhamel et Mohamed Zemat. « Algerian energy policy and potential to reducing greenhouse gas emissions ». In : Energy Sources, Part B: Economics, Planning, And Policy 11.12 (2016), p. 1118-1127.

- [56] Ratiba Bouferkas. « Actualité et stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie ». Thèse de doctorat, Boumerdesse, 2021.
- [57] A Oudrane et A Benaoumeur. « Hamouda: « Étude et Analyse du Gisement Solaire Pour une Région Désertique: Type Adrar “ » ». In : Communication Science & technology (2019), p. 3909-3919.
- [58] Lakhdar HAMZAOUI et Amira ALLAOUI. « Etude par simulation de la connexion d'une source d'énergie photovoltaïque au réseau électrique a travers un convertisseur de type Z-source ». Thèse de doctorat. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2020.
- [59] Souhila Eddrief-Cherfi. « L'énergie renouvelable en Algérie Quelles alternatives aux énergies fossiles? Solaire, nucléaire ou les deux à la fois? » In : Revue de l'énergie 609 (2012).
- [60] Sachin Jain et Vivek Agarwal. « A single-stage grid connected inverter topology for solar PV systems with maximum power point tracking ». In : IEEE transactions on power electronics 22.5 (2007), p. 1928-1940.
- [61] Adel Mellit, M Menghanem et M Bendekhis. « Artificial neural network model for prediction solar radiation data: application for sizing stand-alone photovoltaic power system ». In : IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE. 2005, p. 40-44.
- [62] M Arun Noyal Doss et al. « Photovoltaic fed multilevel inverter using reverse voltage topology for standalone systems ». In : International Journal of Power Electronics and Drive Systems 10.3 (2019), p. 1347.
- [63] KK Prabhakaran et al. « Standalone single stage PV-fed reduced switch inverter based PMSM for water pumping application ». In : IEEE Transactions on Industry Applications 56.6 (2020), p. 6526-6535.
- [64] AHMED M HASSON, RAKIA HUSSAIN et BASSIM E AL-SAGIR. « A Study of Solar Water Pumping Parameters for Baghdad Area ». In : Energy and the Environment. Elsevier, 1990, p. 549-556.
- [65] Abderrahmane Khechekhouche, Boubaker BENHAOUA et Zied DRISS. « Solar distillation between a simple and double-glazing ». In : Revue de mécanique 2.2 (2017), p. 145-150.
- [66] S Bindu et Vinod V Thomas. « Detection of Static Air-Gap Eccentricity in Three Phase Squirrel Cage Induction Motor Through Stator Current and Vibration Analysis ». In : Advances in Power Systems

- and Energy Management: ETAEERE (2018), p. 511-518.
- [67] M. Arrouf « Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque ». Thèse Doctorat ,UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE (2007).
- [68] Rami Troudi. « Étude, conception et structure de commande temps réel d'un onduleur multinationnel à partir d'une seule source DC; applications énergies renouvelables et véhicules électriques ». Thèse de doctorat. Université de Poitiers; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2021
- [69] Cuong Hung Tran. « Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement.(Improvements in a solar energy conversion chain into electricity to stand alone for application in developing countries). » Thèse de doctorat. University of Reims Champagne-Ardenne, France, 2019.
- [70] A Hadj Arab. « M. Benghanem et A. Gharbi," Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque ». In : Rev. Energ. Ren 8 (2005), p. 19-26.
- [71] Neeraj Priyadarshi et al. « New CUK–SEPIC converter based photovoltaic power system with hybrid GSA–PSO algorithm employing MPPT for water pumping applications ». In : IET Power Electronics 13.13 (2020), p. 2824-2830.
- [72] AF Almarshoud. « Sizing of PV array for water pumping application ». In :2nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, At Munich, Germany. 2016.
- [73] Akassewa Tchapo Singo. « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse de doct. Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2010.
- [74] Julien Labbé. « L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés ». Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006.
- [75] Dariga Meekhun. « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonome pour l'application aéronautique ». Thèse de doctorat. INSA de Toulouse, 2010
- [76] Hakim Azoug, Hocine Belmili et Fekkak Bouazza. « Grid-connected control of PV-Wind hybrid energy system ». In : International Journal of Power Electronics and Drive Systems 12.2 (2021), p. 1228.

- [77] Christophe Darras. « Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque/hydrogène: applications site isolé, micro-réseau et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H). » Thèse de doctorat. Université Pascal Paoli, 2010.
- [78] Madiha MAAMIR. « Techniques de supervision d'énergie d'un système d'entraînement Electrique hybride ». Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider–Biskra, 2020.
- [79] S Boualem et al. « Power management strategy based on Elman neural network for grid-connected photovoltaic-wind-battery hybrid system ». In : Computers and Electrical Engineering 99 (2022), p. 107823.
- [80] Okba Kraa, Sassia Boualem et Mostefa Kermadi. « Flow-Chart Power Management for Grid-Connected Hybrid System ». In : Electrotehnica, Electronica, Automatica 71.1 (2023), p. 75-82.
- [81] Annamaria Buonmano et al. « A hybrid renewable system based on wind and solar energy coupled with an electrical storage: Dynamic simulation and economic assessment ». In : Energy 155 (2018), p. 174-189.
- [82] Saud Alotaibi et Ahmed Darwish. « Modular multilevel converters for large-scale grid-connected photovoltaic systems: A review ». In : Energies 14.19 (2021), p. 6213.
- [83] Simona Bennici, Paolo Carniti et Antonella Gervasini. « Bulk and surface properties of dispersed CuO phases in relation with activity of NO_x reduction ». In : Catalysis letters 98 (2004), p. 187-194.
- [84] Stéphane Vighetti. « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [85] Nedjma Aouchiche. « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque. » Thèse de doctorat. Bourgogne Franche Comté, 2020.
- [86] H Belmili et al. « Optimisation de dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes Exemples d'applications, éclairage et pompage au fil du soleil ».In : Revue des Energies Renouvelables CICME 8 (2008), p. 27-39.
- [87] Dmitry Baimel et al. « Improved fractional open circuit voltage MPPT methods for PV systems ». In : Electronics 8.3 (2019), p. 321.

- [88] Guingane Toussaint Tilado et al. « Photovoltaic (PV) System Connected to the Grid without Battery Storage as a Solution to Electricity Problems in Burkina Faso ». In : International Journal of Engineering Research 6.1 (2017), p. 30-33.
- [89] Nabil Karami, Nazih Moubayed et Rachid Outbib. « General review and classification of different MPPT Techniques ». In : Renewable and Sustainable Energy Reviews 68 (2017), p. 1-18.
- [90] Hania Aboub. « Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV ». Thèse de doct. Université de Batna 2, 2014.
- [91] Cedric Cabal. « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ». Thèse de doct. Université Paul Sabatier- Toulouse III, 2008.
- [92] A Betka et A Moussi. « RENDEMENT MAXIMISE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE ALIMENTÉ PAR UNE SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE ». In : LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782 2 (2003).
- [93] MF Yaden et al. « Conception et réalisation d'un système photovoltaïque muni d'une commande MPPT numérique ». In : Journal of Renewable Energies 14.1(2011), p. 171-186.
- [94] Mansour Karima et Magmoun Lamia. « Etude et modélisation d'un système photovoltaïque autonome ». Thèse de doct. Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [95] Idriss Dagal, Burak Akin et Erdem Akboy. « MPPT mechanism based on novel hybrid particle swarm optimization and salp swarm optimization algorithm for battery charging through simulink ». In : Scientific Reports 12.1 (2022), p. 2664.
- [96] Salah Eddine HALLEDJ et Amar BOUAFASSA. « A Particle Swarm Optimization trained Artificial Neural Network of Three Stage Maximum Power Tracking Solar Charge Controller ». 1er conference international Electrotechnique et Technologies Modernes soukahrès, Algeria, 2022;
- [97] Walid SE Abdellatif et al. « A Fuzzy Logic Controller Based MPPT Technique for Photovoltaic Generation System. » In : International Journal on Electrical Engineering & Informatics 13.2 (2021).
- [98] Amit Kumer Podder, Naruttam Kumar Roy et Hemanshu Roy Pota. « MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature ». In : IET Renewable Power Generation 13.10 (2019), p. 1615-1632.
- [99] Her-Terng Yau, Chih-Jer Lin et Qin-Cheng Liang. « PSO based PI controller design for a solar charger system ». In : The Scientific World Journal 2013 (2013).

- [100] Aleck W Leedy, Liping Guo et Kennedy A Aganah. « A constant voltage MPPT method for a solar powered boost converter with DC motor load ». In : 2012 Proceedings of IEEE Southeastcon. IEEE. 2012, p. 1-6.
- [101] Huaqian Wang et al. « New MPPT solar generation implemented with constant- voltage constant-current DC/DC converter ».2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE. 2016, p. 1-6.
- [102] Anuradha Thangavelu, Senthilkumar Vairakannu et Deivasundari Parvathyshankar. « Linear open circuit voltage-variable step-size-incremental conductance strategy based hybrid MPPT controller for remote power applications ». In : IET Power Electronics 10.11 (2017), p. 1363-1376.
- [103] S Malathy et R Ramaprabha. « Maximum power point tracking based on look up table approach ». In : Advanced Materials Research. T. 768. Trans Tech Publ. 2013, p. 124-130.
- [104] Vipin Kumar et al. « Load voltage-based MPPT technique for standalone PV systems using adaptive step ». In : International Journal of Electrical Power &Energy Systems 128 (2021), p. 106732.
- [105] Nicola Femia et al. « Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method ». In : IEEE transactions on power electronics 20.4 (2005), p. 963-973.
- [106] Roberto I Rico-Camacho et al. « Transient differentiation maximum power point tracker (TD-MPPT) for optimized tracking under very fast-changing irradiance: a theoretical approach for mobile PV applications ». In : Applied Sciences 12.5 (2022), p. 2671.
- [107] Md Wazedur Rahman et al. « Comparative analysis of developed incremental conductance (IC) and perturb & observe (P&O) MPPT algorithm for photovoltaic applications ». In : 2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO). IEEE. 2016, p. 1-6.
- [108] KM Tsang et Wai Lok Chan. « Maximum power point tracking for PV systems under partial shading conditions using current sweeping ». Energy conversion and management 93 (2015), p. 249-258.
- [109] Zhou Xuesong et al. « The simulation and design for MPPT of PV system based on incremental conductance method ». In : 2010 WASE international conference on information engineering. T. 2. IEEE. 2010, p. 314-317.
- [110] Kok S Tey et Saad M: « Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level ».Solar Energy 101 (2014), p. 333-342.
- [111] Weidong Xiao et al. « Application of centered differentiation and steepest descent to maximum power point tracking ». In : IEEE Transactions on Industrial Electronics 54.5 (2007), p. 2539-2549

- [112] Mohammed Setti et al. « A modern MPPT control algorithm based on α -MPP pass-through detection and β -acceleration mechanism ». In : International Journal of Renewable Energy Technology 5.2 (2014), p. 107-124.
- [113] Unal Yilmaz, Ali Kircay et Selim Borekci. « PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller ». In : Renewable and Sustainable Energy Reviews 81 (2018), p. 994-1001.
- [114] Layachi Zaghba et al. « An intelligent approach based on fuzzy logic for improving and optimizing the performance of a photovoltaic system ». In : 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM). IEEE. 2014, p. 1-6.
- [115] Melanie J Zimmer-Gembeck et Mark Helfand. « Ten years of longitudinal research on US adolescent sexual behavior: Developmental correlates of sexual intercourse, and the importance of age, gender and ethnic background ». In : Developmental review 28.2 (2008), p. 153-224.
- [116] Lakshmi PN Jyothy et MR Sindhu. « An artificial neural network based MPPT algorithm for solar PV system ». In : 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). IEEE. 2018, p. 375-380.
- [117] Yi-Hwa Liu et al. « A particle swarm optimization-based maximum power point tracking algorithm for PV systems operating under partially shaded conditions ». In : IEEE transactions on energy conversion 27.4 (2012), p. 1027-1035.
- [118] S Obukhov, A Ibrahim et Raef Aboelsaud. « Maximum power point tracking of partially shading PV system using particle swarm optimization ». In : Proceedings of the 4th International Conference on Frontiers of Educational Technologies. 2018, p. 161-165.
- [119] Soltane Belakehal. « Conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables ». In : universite costantine (2010).
- [120] E Baghaz et al. « Photovoltaic System Equipped with a DC/DC Buck Converter and a MPPT Command Ensuring an Optimal Functioning Independently of System Perturbations ». In : Physical Review & Research International 4.1 (2014), p. 80-99.
- [121] R Andouisi et al. « Bond graph modelling and dynamic study of a photovoltaic system using MPPT buck-boost converter ». In : IEEE international conference on systems, man and cybernetics. T. 3. IEEE. 2002, 6-pp.
- [122] C Anuradha et al. « Analysis of Non-Isolated Multi-Port Single Ended Primary Inductor Converter for Standalone Applications ». In : Energies 11.3 (2018), p. 539.

- [123] Bin Huang. « Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour applications pile à combustible ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [124] Nicolas Videau. « Convertisseurs continu-continu non isolés à haut rapport de conversion pour Piles à Combustible et Electrolyseurs-Apport des composants GaN ».Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2014.
- [125] Bang Viet Dang. « Conception d'une interface d'électronique de puissance pour pile à combustible ». Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2006.
- [126] Sateesh Kumar Kuncham, Kirubakaran Annamalai et Subrahmanyam Nallamothu. « A new structure of single-phase two-stage hybrid transformerless multilevel PV inverter ». In : International Journal of Circuit Theory and Applications 47.1 (2019), p. 152-174.
- [127] Yuanmao Ye et al. « A step-up switched-capacitor multilevel inverter with self voltage balancing ». In : IEEE Transactions on industrial electronics 61.12 (2014), p. 6672-6680.
- [128] Jiarong Wu et Yimin Lu. « Decoupling and optimal control of multilevel buck DC–DC converters with inverse system theory ». In : IEEE Transactions on Industrial Electronics 67.9 (2019), p. 7861-7870.
- [129] Gui-Jia Su. « Multilevel DC-link inverter ». In : IEEE Transactions on Industry Applications 41.3 (2005), p. 848-854.
- [130] Amir Taghvaie, Jafar Adabi et Mohammad Rezanejad. « A multilevel inverter structure based on a combination of switched-capacitors and DC sources ». In : IEEE Transactions on Industrial Informatics 13.5 (2017), p. 2162-2171.
- [131] Diptish Saha et Tapas Roy. « A new symmetrical three phase multilevel inverter using switched capacitor basic units for renewable energy conversion systems ». In : International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT). IEEE. 2018, p. 368-374
- [132] Violaine Didier. « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement ». In : Etat de l'art et étude des performances, rapport pour l'association Hespul (2007).
- [133] Marie Benejean. « Informatisation des productions d'information et des activités de communication dans les relations pilotes-contrôleurs: contradictions et reconfigurations entre technologies en projet et mises en pratiques ». Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2013.
- [134] N Prabaharan et K Palanisamy. « Analysis and integration of multilevel inverter configuration with boost converters in a photovoltaic system ». In : Energy Conversion and Management 128 (2016),

p. 327-342.

- [135] Miaosen Shen, Fang Zheng Peng et Leon M Tolbert. « Multilevel DC–DC powerconversion system with multiple DC sources ». In : IEEE Transactions on Power Electronics 23.1 (2008), p. 420-426.
- [136] Yi Dan Li et al. « Application of Cascaded Multilevel Inverter for High VoltageGrid-Connected PV System ». In : Advanced Materials Research. T. 1092. Trans Tech Publ. 2015, p. 17-21.
- [137] TA Meynard et H Foch. « Multi-level choppers for high voltage applications ». In : EPE journal 2.1 (1992), p. 45-50
- [138] Laurent Fribourg et Romain Soulat. « Stability controllers for sampled swit- ched systems ». In : Reachability Problems: 7th International Workshop, RP 2013, Uppsala, Sweden, September 24-26, 2013 Proceedings 7. Springer. 2013, p. 135-145
- [139] WAA Salem et al. « Grid connected photovoltaic system impression on power quality of low voltage distribution system ». In : Cogent Engineering 9.1 (2022) p. 2044576.
- [140] Moacyr AG de Brito et al. « Sliding Mode Control for Single-Phase Grid-Connected Voltage Source Inverter with L and LCL Filters ». In : Eng 4.1 (2023), p. 301-316.
- [141] Xu Renzhong et al. « Design and research on the LCL filter in three-phase PVgrid-connected inverters ». In : International Journal of Computer and Electrical Engineering 5.3 (2013), p. 322
- [142] Aleksandr Reznik et al. « LCL filter design and performance analysis for grid- interconnected systems ». In : IEEE transactions on industry applications 50.2(2013), p. 1225-1232.
- [143] Meriem Dardouri, S Khojet El Khil et K Jelasi. « Control and filter design of single phase grid-connected inverter for PV applications ». In : International Conference on Green Energy & Environmental Engineering (GEEE-2018) Proceedings of Engineering and Technology–PET. T. 37. 2018, p. 50-57.
- [144] Farhani Slah. « Conception et réalisation des convertisseurs de puissance dédiés aux véhicules électriques ». Thèse de doct. École Nationale Supérieure d'Ingénieursde Tunis, 2019.
- [145] Mamatha Sandhu et Tilak Thakur. « Multilevel inverters: literature survey topologies, control techniques & applications of renewable energy sources-grid integration ». In : Int. Journal of Engineering Research and Applications 4.3 (2014), p. 644-652.
- [146] Bonnie L Green et al. « Trauma-informed medical care: Patient response to a primary care provider communication training ». In : Journal of Loss and Trauma 21.2 (2016), p. 147-159.

- [147] Md Noman H Khan et al. « Switched-Capacitor Integrated Single-Phase $(2N+1)$ -Levels Boost Inverter for Grid-Tied Photovoltaic (PV) Applications ». In : 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE. 2019, p. 1655- 1660.
- [148] Hossein Nasiri Avanaki et al. « Reduced switch-count structure for symmetric multilevel inverters with a novel switched-DC-source submodule ». In : IET Power Electronics 12.2 (2019), p. 311-321.
- [149] Eduard Hernando Solano Saenz. « Étude des convertisseurs multicellulaires série-parallèle et de leurs stratégies de commande, approches linéaire et prédictive ». Thèse de doctorat. 2014.
- [150] Reza Barzegarkhoo et al. « A new boost switched-capacitor multilevel converter with reduced circuit devices ». In : IEEE Transactions on Power Electronics 33.8 (2017), p. 6738-6754.
- [151] K Muralikumar et Ponnambalam Pathipooranam. « Renewable Energy Harnessing by Implementing a Three-Phase Multilevel Inverter with Fuzzy Controller ». In : Soft Computing for Problem Solving: SocProS 2018, Volume 1. Springer. 2020, p. 863-878.
- [152] N Sandeep et Udaykumar R Yaragatti. « A switched-capacitor-based multilevel inverter topology with reduced components ». In : IEEE Transactions on Power Electronics 33.7 (2017), p. 5538-5542.
- [153] Subhashree Choudhury et al. « Multilevel inverter: A survey on classical and advanced topologies, control schemes, applications to power system and future prospects ». In : Energies 14.18 (2021), p. 5773.
- [154] Zohra Bourouga, Amel Battach et Nouredine Hanini. « Etude et commande d'un onduleur multi niveaux a structure modulaire par la technique d'éliminationsélective des harmoniques ». <http://dspace.univ-medea.dz/handle/123456789/1185>. université medea 2019
- [155] M. Meraj et al. « Novel level-shifted PWM technique for equal power sharing among quasi-Z-source modules in cascaded multilevel inverter ». In : IEEE Transactions on Power Electronics 36.4 (2020), p. 4766-4777.
- [156] Karima Berkoune. « Approche mathématique pour la modulation de largeur d'impulsion pour la conversion statique de l'énergie électrique: application aux onduleurs multiniveaux ». Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2016.
- [157] Adrien Voldoire et al. « Etude par optimisation de l'impact de la montée en tension sur la topologie des onduleurs aéronautiques ». In : Symposium de Génie Electrique–SGE 2020. 2021.
- [158] Sabri Mansouri. « Modélisation et commande des convertisseurs multiniveaux hybrides à base de

- supercondensateurs-Application aux systèmes multi-sources connectés au réseau électrique ». Thèse de doctorat. Université de Poitiers, 2020.
- [159] Lea Riachy. « Contribution à la commande d'un onduleur multiniveaux, destinée aux énergies renouvelables, en vue de réduire le déséquilibre dans les réseaux électriques. » Thèse de doctorat. Normandie Université, 2017.
- [160] Akira Nabae, Isao Takahashi et Hirofumi Akagi. « A new neutral-point-clamped PWM inverter ». In: IEEE Transactions on industry applications 5 (1981), p. 518- 523.
- [161] Kahina Maldi. « Étude d'une chaîne photovoltaïque connectée à un réseau à travers un onduleur multi niveaux ». Thèse de doctorat. Université du Québec à Rimouski, 2021.
- [162] R Mechouma, H Aboub et B Azoui. « Multicarrier wave dual reference very low frequency PWM control of a nine levels NPC multi-string three phase inverter topology for photovoltaic system connected to a medium electric grid ». 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE. 2014, p. 1-6.
- [163] Prem Ponnusamy et al. « A new multilevel inverter topology with reduced power components for domestic solar PV applications ». In : IEEE Access 8 (2020), p. 187483-187497.
- [164] Bo Yang et al. « Improved transformerless inverter with common-mode leakage current elimination for a photovoltaic grid-connected power system ». In : IEEE transactions on power electronics 27.2 (2011), p. 752-762.
- [165] Nitin Kumar, Sushma J Patil et MS Aspalli. « A Switched Capacitor Multilevel Inverter with Voltage Boosting Ability ». In : 2020 IEEE International Conference on Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER). IEEE. 2020, p. 171-176.
- [166] Miran Rodič et al. « Switched-Capacitor boost converter for low power energy harvesting applications ». In : Energies 11.11 (2018), p. 3156.
- [167] R Stala et al. « A family of high-power multilevel switched capacitor-based resonant DC-DC converters—operational parameters and novel concepts of topologies ». In : Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences 65.5 (2017).
- [168] Jagabar Sathik Mohamed Ali et Vijayakumar Krishnasamy. « Compact switched capacitor multilevel inverter (CSCMLI) with self-voltage balancing and boosting ability ». In : IEEE Transactions on Power Electronics 34.5 (2018), p. 4009-4013.

- [169] Qian Zhai et al. « Estimation of wetting hydraulic conductivity function for unsaturated sandy soil ». In : *Engineering Geology* 285 (2021), p. 106034.
- [170] Ayoub Nouaiti et al. « Implementation of a single phase switched-capacitor nine level inverter for PV system applications with selective harmonic elimination ». In : *International Journal of Computer Applications* 168.7 (2017), p. 9-15.
- [171] Reza Barzegarkhoo et al. « Generalized structure for a single phase switched capacitor multilevel inverter using a new multiple DC link producer with reduced number of switches ». In : *IEEE Transactions on Power Electronics* 31.8 (2015), p. 5604-5617.
- [172] Simran Priya et SK Jha. « Switched Capacitor-Based Inverter with Maximum Power Point Tracking of a Photovoltaic System ». In : *Recent Advances in Power Electronics and Drives: Select Proceedings of EPREC 2020*. Springer. 2021, p. 1-10.
- [173] S Malathy et U Shajith Ali. « Performance Analysis of Multi-Carrier PWM Based Cascaded Multilevel Inverter ». In : *GJPAST| MAR-APR* (2012).
- [174] Yacine Labbi. « Gestion et contrôle optimale de l'énergie électrique sur les sites de production ». Thèse de doct. Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [175] Wafa Hiber. « Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éolienne ». Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2018.
- [176] Alan Chauvin. « Contribution à l'optimisation globale pour le dimensionnement et la gestion d'énergie de véhicules hybrides électriques basée sur une approche combinatoire ». Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2015.
- [177] CHALAH SAMIRA. « Analyse Stochastique de la résultante de l'injection de courants harmoniques dans un réseau électrique ». In : *Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou* (2012).
- [178] Elie Barakat, Nisrine Sinno et Antoine Ghossoub. « Wind Turbine Modeling Reduction of Harmonics Distortion in the Electrical Network ». *International Research Journal of Advanced Engineering and Science* ISSN (Online): 2455-9024, Volume 2, Issue 4, pp. 59-63, 2017.
- [179] CHERIF Hakima. « Détection des défauts dans la machine à induction par destechniques avancées ». Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider–Biskra, 2021.
- [180] Mamane Adamou et al. « Dépollution harmonique des réseaux électriques: Etude comparative des commandes, par Modulation de Largeur d'Impulsion et par Hys-

- térésis, des filtres actifs shunts triphasés ». In : International Journal of Innovation and Applied Studies 28.2 (2020), p. 557-566.
- [181] A Rakesh Kumar et al. « Simulation analysis of a nearest level modulation scheme for cross-connected sources based MLI ». In : 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). T. 1. IEEE. 2019, p. 1-4.
- [182] Adrien Bourgeade. « PWM control optimization of a two-level inverter: Application to electric and hybrid vehicles ». Thèse de doctorat. Ecole centrale de Nantes,2022.
- [183] A Kouzou, MO Mahmoudi et MS Boucherit. « Application of SHE-PWM for seven-level inverter output voltage enhancement based on particle swarm optimization ». In : 2010 7th International multi-conference on systems, signals and devices. IEEE. 2010, p. 1-6.
- [184] Khoukha BERRAHAL. « Application d'un onduleur multi-niveaux à la compensation de la puissance réactive ». Thèse de doct. Université de Batna 2, 2019.
- [185] Sola Eboda Edagbami et al. « Improving the search pattern of Rooted Tree Optimisation algorithm to solve complex problems ». In : Results in Control and Optimization 3 (2021), p. 100015.
- [186] Cheng-Hong Yang et al. « Rooted tree optimization algorithm for protein folding prediction ». In : J. Life Sci. Technol. 4.2 (2016), p. 89-93.
- [187] A Benamor et al. « A new rooted tree optimization algorithm for indirect power control of wind turbine based on a doubly-fed induction generator ». In : ISA transactions 88 (2019), p. 296-306.
- [188] Abdul Wadood et al. « An optimized protection coordination scheme for the optimal coordination of overcurrent relays using a nature-inspired root tree algorithm ». In : Applied Sciences 8.9 (2018), p. 1664.
- [189] Chouaib Labiod. « Contribution à la modélisation dynamique à base d'éléments finis, au contrôle et à l'optimisation des machines à reluctance variable ». Thèse de doctorat. Université Mohamed khider ,Biskra, 2018.
- [190] Yacine Labbi. « Gestion et contrôle optimale de l'énergie électrique sur les sites de production ». Thèse de doctorat. Université Mohamed khider ,Biskra, 2016.
- [191] Shyr-Long Jeng et Yung-Cheng Tung. « A multicell linear power amplifier for driving piezoelectric loads ». In : IEEE Transactions On Industrial Electronics 55.10 (2008), p. 3644-3652
- [192] Afef Badis, Mohamed Nejib Mansouri et Mohamed Habib Boujmil. « Cascade control of grid connected PV systems using TLBO-based fractional-order PID ». In : International Journal of

Photoenergy 2019 .

- [193] Madiha Maamir et al. « Neural network power management for hybrid electric elevator application ». In : Mathematics and Computers in Simulation 167 (2020), p. 155-175.
- [194] MS Syam et T Sreejith Kailas. « Grid connected PV system using Cuk converter ». In : 2013 Annual International Conference on Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy. IEEE. 2013, p. 1-6.
- [195] MT Benchouia et al. « Implementation of adaptive fuzzy logic and PI controllers to regulate the DC bus voltage of shunt active power filter ». In : Applied soft computing 28 (2015), p. 125-131.
- [196] MF Roslan et al. « Particle swarm optimization algorithm-based PI inverter controller for a grid-connected PV system ». 2020 PLoS ONE ,<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243581>
- [197] M. Kermadi, Z.Salam et El M. Berkouk. « A rule-based power management controller using state flow for grid-connected PV-battery energy system supplying household load ». In : 2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE. 2018, p. 1-6.
- [198] Soufiane Marmouh, Mohamed Boutoubat et Lakhdar Mokrani. « Performance and power quality improvement based on DC-bus voltage regulation of a stand-alone hybrid energy system ». In : Electric Power Systems Research 163 (2018), p. 73-84.
- [199] Mohd Tariq et al. « Evaluation of level-shifted and phase-shifted PWM schemes for seven level single-phase packed U cell inverter ». In : CPSS Transactions on Power Electronics and Applications 3.3 (2018), p. 232-242.
- [200] Eggi Farhan Firmansyah et al. « Optimized Modified PWM based on Differential Evolution for Reducing THD on Multilevel Inverter ». In : 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). IEEE. 2020, p. 113-118.