

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie électrique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الكهربائية
المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de
Magister en : Electrotechnique

Option : Energies renouvelables

Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV
Connectés au réseau

Présenté par :

Boucheritte wafa

Soutenu publiquement le

Devant le jury composé de :

Dr. Abdelhamid Benakcha
Pr. Ammar Moussi
Pr. Achour Betka

Maitre de Conférences 'A'
Professeur
Professeur

Président
Rapporteur
Examinateur

Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra

REMERCIEMENTS

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

Ce travail a été réalisé au niveau du département de génie électrique de l'université Mohamed Kfider de Biskra

*MES premiers remerciements s'adressent à mon directeur de mémoire, Monsieur **MOUSSI AMMAR**, professeur à l'université de Biskra qui a bien voulu me proposer ce thème et m'aider à sa réalisation.*

*JE remercie également, Dr. **Benakcha Abdelhamid**, Maitre de conférences de l'université de Biskra d'avoir accepté de présider le jury de mon mémoire.*

*Je remercie aussi professeur **Betka Achour** pour avoir eu l'amabilité d'être examinateur de mon travail.*

*JE remercie également, Dr. **Rabhi Boualagua** et Dr. **Terki Amel**, qui n'ont pas cessé de m'encourager pour pouvoir mener à terme ce travail.*

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce travail

A

Mes chers parents

mes frères et mes sœurs.

Tous mes collègues et mes amis.

Toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES CENTRALES PV

CONNECTE AUX RESEAUX

I.1. Introduction	3
I.2. Energie solaire	3
I.2.1. Rayonnement solaire	3
I.3. Effet photovoltaïque	4
I.3.1. Définition	4
I.4. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque	5
I.4.1. Cellule photovoltaïque	5
I.4.1.1. Historique	5
I.4.1.2. Constitution de la cellule photovoltaïque	6
I.4.1.3. Caractéristique de la cellule photovoltaïque	6
I.4.1.4. Influence de l'éclairement	8
I.4.1.4. Influence de la température	11
I.4.2. Générateur photovoltaïque	11
I.4.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque	12
a. Module photovoltaïque.....	12
b. Panneau photovoltaïque.....	12
I.5. Classification d'un système solaire photovoltaïque	13
I.5.1. Système autonome	13
I.5.2. Système Hybride	14
I.5.3. Système raccordés au réseau	14
I.6. Avantage et inconvénients d'une installation PV	16
I.7. Conclusion	17

CHAPITRE II

CONVERTISSEURS DE PUISSANCE

II.1. Introduction.....	19
II.2. Convertisseur DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire.....	19
II.2.1. Hacheur dévolteur (série).....	20
II.2.2. Hacheur survolteur (ou parallèle).....	20
II.2.3. Hacheur dévolteur - survolteur (série-parallèle).....	21
II.3. Techniques d'MPPT.....	21
II.3.1. Technique MPPT à tension constante.....	23
II.4. Convertisseur multiniveau.....	27
II.4. 1. Redresseurs multiniveaux	27
II.4.1.1. Structure générale d'un redresseur à trois niveaux.....	27
II.4.2. Différents topologie des onduleurs multiniveaux.....	28
1. Onduleur de tension a diode de bouclage.....	28
2. Onduleur de tension a condensateur Flottant.....	30
3. Onduleur de tension en cascade.....	31
II.5. Différent stratégie de commande des convertisseurs multiniveaux.....	32
II.5.1. Classification des stratégies de modulation.....	33
II.5.1.1. Commande par modulation de largeur d'impulsions.....	33
a. Modulation sinusoïdale classique	33
b. Modulation sinusoïdal triangles multiples.....	34
c. modulation sinusoïdale modifiée.....	34
II.5.1.2. Modulation vectorielle.....	34
II.5.1.3. Elimination d'Harmoniques sélective	35
II.6. Conclusion.....	35

CHAPITRE III

ONDULEUR DE TENSION MULTINIVEAUX DE TYPE NPC

III.1. Introduction.....	37
III.2. Onduleurs à trois niveaux type NPC.....	37
III.2.1. Principe de fonctionnement.....	37
III.3. Onduleurs à cinq niveaux type NPC.....	39
III.3.1. Principe de fonctionnement	40
III.4. Les techniques de modulation.....	41
III.4.1. Commande triangulo-sinusoidal à n porteuses	41
III.5. Conclusion.....	44

CHAPITRE IV

SIMULATION DU GENERATEUR PV CONNECTE AU RESAU ET INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.1. Introduction.....	46
IV.2. Simulation le générateur photovoltaïque «GPV».....	46
IV.2.1. Module photovoltaïque	46
IV.3. simulation de l'onduleur à trois niveaux.....	48
IV.3.1. Commande par modulation a doubles triangles	49
IV.3.2. Interprétation des résultats.....	53
IV.4. Simulation de l'onduleur à cinq niveaux.....	54
IV.4.1. Commande par la modulation à multi-triangles	55
IV.4.2. Interprétation des résultats.....	59
IV.5. Simulation de l'onduleur à cinq niveaux dans le système PV connecté au réseau	60
1. Générateur photovoltaïque.....	60
2. Convertisseur Dévolteur (DC/DC).....	61
3. Convertisseur (DC/AC).....	61

4. Le Filtre LC.....	61
5. Boucle de régulation de la tension de sortie.....	61
6. Interprétation des résultats.....	65
IV.6. Conclusion.....	66
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	68
BIBLIOGRAPHIE	

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Figure 1.1	Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	4
Figure 1.2	Spectre du rayonnement solaire.....	5
Figure 1.3	Schéma d'une cellule élémentaire.....	6
Figure 1.4	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure 1.5	Courbe courant-tension spécifique à chaque Type de cellule.....	7
Figure 1.6	Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.....	9
Figure 1.7	Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.....	9
Figure 1.8	Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.....	10
Figure 1.9	Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température...	10
Figure 1.10	Structure d'un générateur photovoltaïque.....	11
Figure 1.11	Exemple de la structure d'un système PV autonome.....	13
Figure 1.12	Schéma des installations photovoltaïques couplées au réseau.....	15
Figure 2.1	Schémas de principe d'un hacheur série.....	20
Figure 2.2	Schémas de principe d'un hacheur parallèle.....	20
Figure 2.3	Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle.....	21
Figure 2.4	Commande MPPT.....	22
Figure 2.5	Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur utilisé.....	22
Figure 2.6	MPPT sans compensation de température.....	25
Figure 2.7	MPPT avec compensation de température.....	25
Figure 2.8	Zone de fonctionnement à puissance maximale.....	26
Figure 2.9	Rapport entre V_{op} et V_{oc} en fonction de l'éclairement.....	26
Figure 2.10	La tension V_{op} en fonction de température.....	26
Figure 2.11	Structure générale d'un redresseur de courant à trois niveaux à MLI.....	27
Figure 2.12	Topologies d'onduleurs NPC.....	28
Figure 2.13	Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant.....	30
Figure 2.14	Structure d'un onduleur multiniveaux en cascade à cinq niveaux.....	31
Figure 3.1	Schéma d'une branche d'onduleur NPC à 3 niveaux.....	37
Figure 3.2	Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé trois niveaux de type NPC.....	38
Figure 3.3	Structure triphasé d'un onduleur cinq niveaux.....	39
Figure 3.4	Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé cinq niveaux de type NPC.....	41
Figure 3.5	Schéma d'un modulateur multiniveaux avec un ensemble de porteuses.....	42
Figure 3.6	principe de la MLI à double triangle.....	42

Figure 3.7	Tension simple V_a de sortie de l'onduleur à trois niveaux MLI à double triangle.....	43
Figure 3.8	principe de la MLI à triangle multiple.....	43
Figure 3.9	Tension simple V_a de sortie de l'onduleur à cinq niveaux.....	44
Figure 4.1	Block du module STP 17OS-24/Ab-1 dans SIMULINK.....	47
Figure 4.2	a) Courbe I(V) du module, b) Courbe P(V) du module.....	47
Figure 4.3	Circuit de l'onduleur de tension trois niveaux.....	48
Figure 4.4	Circuit de l'onduleur de tension trois niveaux dans le système photovoltaïque...	49
Figure 4.5	Signaux de références avec deux porteuses en phase $m_a=0.2$	50
Figure 4.6	Tension simple de sortie de l'onduleur V_A	50
Figure 4.7	Tension V_A et spectre correspondant pour $m_f=2250\text{HZ}$	51
Figure 4.8	Tension V_A et spectre correspondant pour $m_f=10\text{KHZ}$	52
Figure 4.9	Circuit de l'onduleur de tension à cinq niveaux.....	54
Figure 4.10	Circuit de l'onduleur de tension cinq niveaux couplé au système photovoltaïque.....	55
Figure 4.11	Signal de référence avec quatre porteuses en phase $m_a=0.2$	56
Figure 4.12	La tension simple de sortie de l'onduleur V_A	56
Figure 4.13	Tension V_A et spectre correspondant pour $m_f=2250\text{HZ}$	57
Figure 4.14	Tension V_A et spectre correspondant pour $m_f=10\text{KHZ}$	58
Figure 4.15	Taux de distorsion d'harmonique total en fonction de m_a et m_f	59
Figure 4.16	L'onduleur à cinq niveaux dans les systèmes PV connecté au réseau.....	60
Figure 4.17	La variation de l'éclairement.....	62
Figure 4.18	La tension du générateur PV et la tension optimisée en fonction de la variation de l'éclairement.....	62
Figure 4.19	Point de fonctionnement optimal sur la courbe courante tension en fonction de la variation de l'éclairement.....	63
Figure 4.20	Signal de référence avec quatre porteuses en phase.....	63
Figure 4.21	La tension de sortie simple V_A de l'onduleur.....	64
Figure 4.22	La tension de sortie simple V_A de l'onduleur après le filtre.....	64
Figure 4.23	Spectre de la tension V_A de l'onduleur à cinq niveaux.....	65

LISTE DE SYMBOLE

Liste de symbole

A	Le facteur d'idéalité de la jonction
A_{ref}	Amplitude du signal de référence
A_p	Amplitude du signal de la porteuse
C	la vitesse de la lumière
C	Condensateur de filtre
E_{ph}	quantité d'énergie (ev)
E_m	Eclairement moyenne (W/m^2)
E	La tension continue d'entrée de l'onduleur
FF	Facteur de forme
f_m	Fréquence du signal de référence
F_p	Fréquence du signal de la porteuse
G	L'éclairement (W/m^2)
G_n	L'éclairement nominal ($1000W/m^2$)
h	la constant de planck ($6,62 \cdot 10^{-34} \text{ j.s}$)
I	Courant de la cellule photovoltaïque
I_{ph}	Le photo-courant (A)
I_d	Courant de diode (A)
I_g	Courant du générateur
I_{cc}	Courant de court circuit (A)
$I_{0,n}$	Le courant de saturation nominal (A)
$I_{sc,n}$	Le courant de court circuit nominal (A)
I_0	Le courant de diode de saturation (A)
K	Constant de boltzman $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}$
K_I	Le coefficient de courant en fonction de température $A/^\circ C$
K_v	Le coefficient de tension en fonction de température $V/^\circ C$
L	Inductance de filtre
m_a	Le taux de modulation d'amplitude
m_f	Taux de modulation de fréquence

n	Le nombre de cellule
N_s	Le nombre de module en série
N_p	Le nombre de module en parallèle
N	Le nombre de niveau de tension de sortie
P_m	Puissance maximale(W)
q	La charge électrique $1.6 \cdot 10^{-19}$ (C)
R_s	Résistance série de la cellule
R_{sh}	Résistance parallèle de la cellule
R_{se}, R_{pe}	Résistance série et parallèle du module
r	Coefficient de réglage de MLI entre 0 et 1
$S_{x,y}$	Interrupteur statique
T	Température de la cellule (c)
T_c	Température de la cellule ($^{\circ}$ C)
T_n	Température nominal (298° K)
TUC	Température d'utilisation de la cellule (c)
U_c	Tension sur le bus continu du redresseur
V	Tension aux bornes de la jonction
V_{oc}	La tension du circuit ouvert (V)
V_g	La tension du générateur
$V_{oc,n}$	La tension de circuit ouvert nominal (V)
V_t	La tension thermique
V_1	La valeur efficace de la fondamental de la tension alternative
V_{ref}	La tension de signal de référence
V_p	La tension de signal de porteuse
w	Pulsation
λ	La longueur d'onde
δ	Le déphasage entre le courant absorbé par le redresseur et la tension
ΔT	La variation de température ($^{\circ}$ C)

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen des capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière énergie solaire photovoltaïque qui fait l'objet de ce mémoire.

A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie fournie est très variable et est toujours en courant continu: il faut souvent la stocker et parfois la transformer. Les systèmes photovoltaïques peuvent être divisés en deux catégories: les systèmes autonomes et les systèmes hybrides connectés au réseau. L'association des centrales PV connectées au réseau électrique se fait à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (CC/CA).

Durant ces dernières années, la technologie des convertisseurs de puissance a connu un développement fabuleux grâce au développement des technologies des semi-conducteurs et des techniques numériques. Le développement est assuré que ce soit sur le volet architecture que la capacité de conversion. A nos jours, on vit la naissance de nouveaux convertisseurs de puissance dit « multiniveaux » qui sont utilisés principalement pour l'alimentation à fréquence variable des machines alternatives de forte puissance. Le développement dans le domaine énergétique a poussé l'intégration de ces derniers dans les réseaux de transport d'énergie.

Dans la littérature, plusieurs structures de ces convertisseurs multiniveaux ont été proposées. On peut citer : les onduleurs multiniveaux à cellules imbriquées, les onduleurs multiniveaux à diodes flottantes et ceux à structure NPC. Dans le cadre de notre travail, nous traitons l'une des structures les plus recommandées dite « onduleur de tension à trois et cinq niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping) » qui sera utilisé pour injecter l'énergie électrique issue d'une source PV vers le réseau de distribution. Cette topologie permet de générer une tension la plus sinusoïdale que possible et d'améliorer le taux d'harmoniques grâce au nombre élevé des niveaux de tension offert par la structure de ce convertisseur.

Cette thèse comporte quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, les différents systèmes photovoltaïques sont exposés. De plus, une description générale sur les éléments d'un système de captage photovoltaïque et la modélisation du module et générateur photovoltaïque est présentée.

Dans le deuxième chapitre, les différentes topologies d'onduleur multi-niveaux ainsi que les différentes stratégies de commande utilisées sont illustrées.

Dans le troisième chapitre on a présenté une étude théorique sur les onduleurs de type NPC à trois et cinq niveaux et leurs stratégies de commande MLI à n porteuse.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation de l'onduleur multi-niveaux intégré dans un système photovoltaïque. Les résultats de simulation sont présentés ainsi que l'analyse spectrale pour la commande utilisée.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES CENTRALES PV CONNECTE AU RESEAU

I.1. Introduction

Cette première partie résume les concepts de base de l'énergie solaire et de la production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les principaux éléments du système photovoltaïque sont étudiés et un aperçu générale sur les différents types des systèmes photovoltaïques est effectué.

I.2. Energie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité.

I.2.1 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10^{-6} m. Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent.

❖ **Le rayonnement direct** est reçu directement du Soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.

❖ **Le rayonnement diffus** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet «éclatement» des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

❖ **Le rayonnement solaire réfléchi** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

❖ **Le rayonnement global** est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis. [1,2]

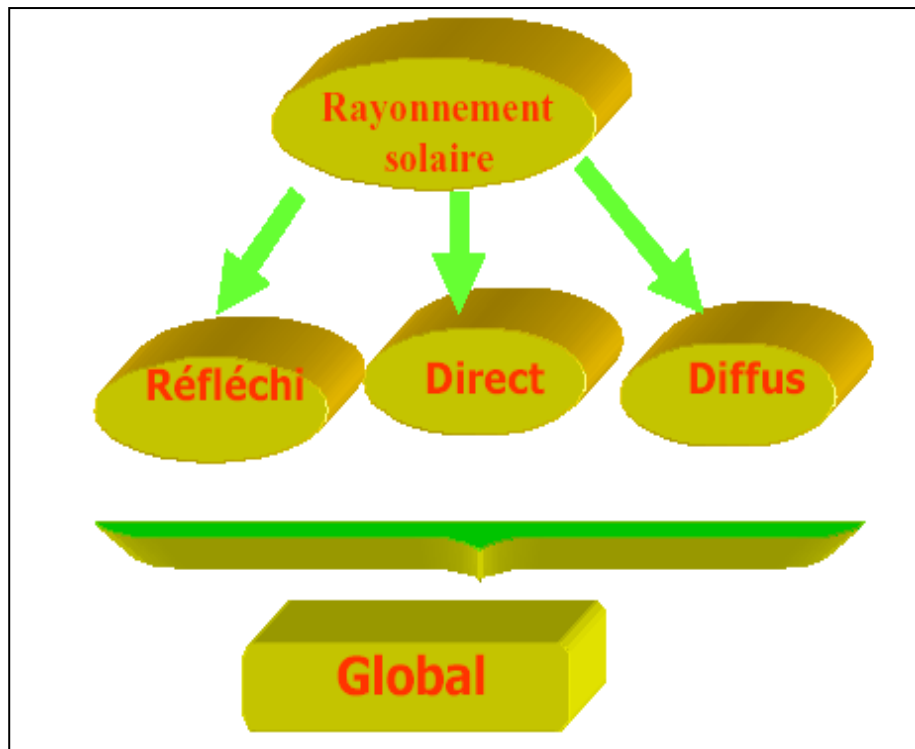


Figure (1.1) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

I.3.Effet photovoltaïque

I.3.1.Définition

Il a été démontré que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle-même, à la relation suivante [3]:

$$E_{ph} = h \cdot (c/\lambda) \quad (1.1)$$

D'après la relation (1.1), on voit que cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre ainsi que le montre la Figure (1.2), [4]. Il est à remarquer que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère.

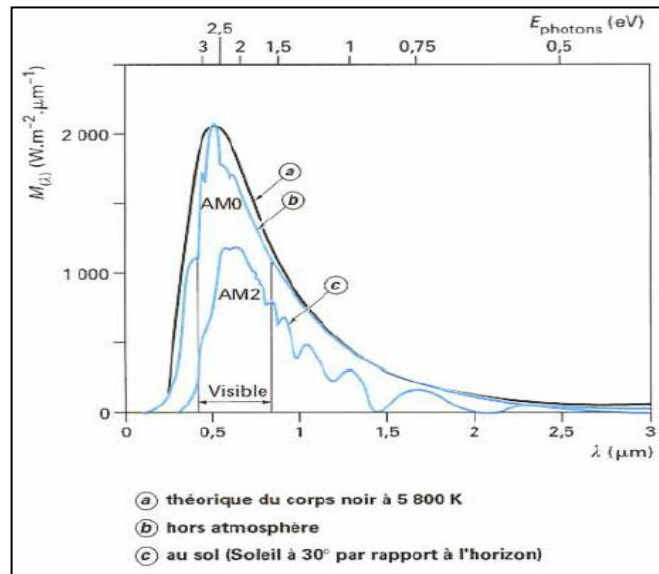


Figure (1.2) : Spectre du rayonnement solaire

I.4. Description des éléments d'un système de captage photovoltaïque

I.4.1. Cellule photovoltaïque

I.4.1.1. Historique

IL est important de citer les dates les plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque qui noté:

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à L'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

I.4.1.2. Constitution de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment, Figure (1.3). Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons, les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu.

Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti-reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée. [5,6]

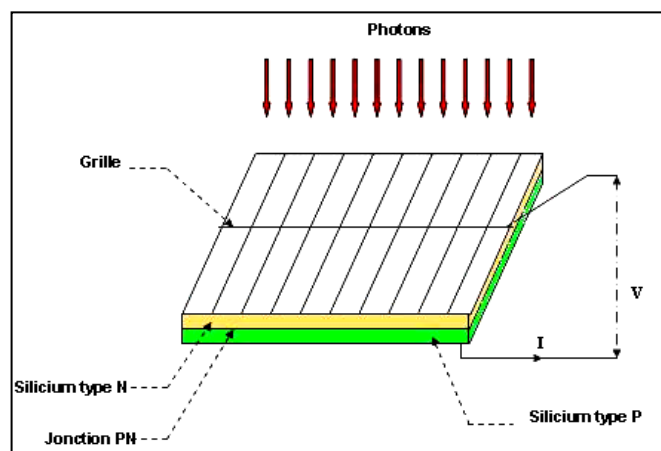


Figure (1.3) : Schéma d'une cellule élémentaire

I.4.1.3. Caractéristique de la cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent d'une cellule est illustré dans la figure (1.4). La caractéristique courant-tension est présentée dans la figure (1.5) :

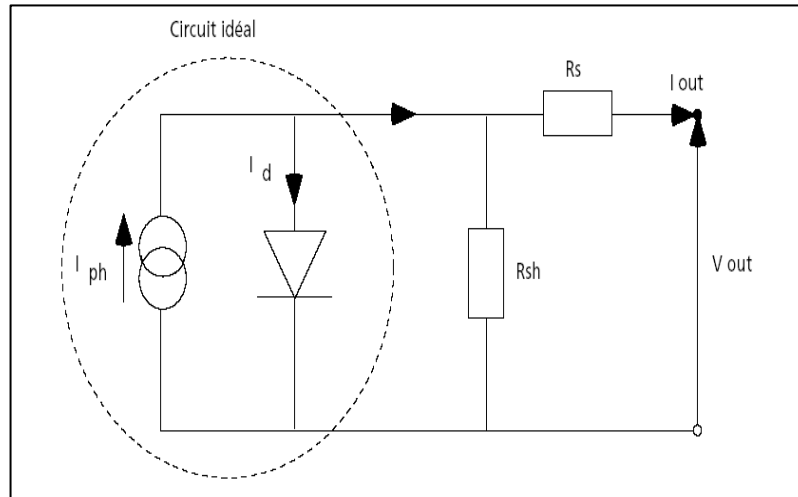


Figure (1.4):Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Pour la cellule idéale :

$$I_{out} = I_{ph} - I_d \text{ où} \tag{1.2}$$

$$I_d = I_0 \exp (q V_{out} / A K T) \tag{1.3}$$

Une cellule photovoltaïque est définie par sa courbe caractéristique électrique (courant-tension). Elle indique la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert.

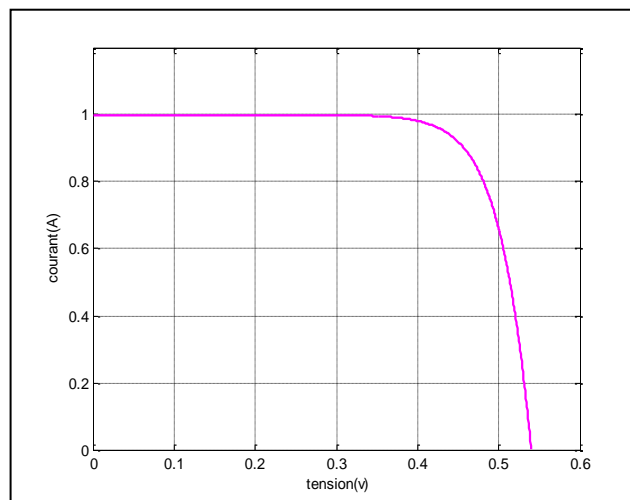


Figure (1.5) : Courbe courant-tension spécifique à chaque Type de cellule.

D'après les caractéristiques courant-tension, il est possible de déduire d'autres paramètres électriques spécifiques à chaque cellule :

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

Entre ces deux valeurs, il existe un optimum donnant la plus grande puissance P_m ou puissance crête caractérisant la performance de la cellule.

Le facteur de forme FF indique le degré d'idéalité de la caractéristique correspondant au rapport suivant :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1.4)$$

Avec :

P_m : puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : *Standard Test Condition*), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de 1000 W/m², à la température de 25° C sous un spectre AM 1,5.

La figure (1.5) est établie dans des conditions de fonctionnement données (ensoleillement, température à la surface de la cellule, etc.) et varie selon le type de cellule. Par exemple, une cellule en silicium amorphe a une tension plus élevée qu'une cellule en silicium cristallin mais son courant est nettement plus faible, en raison de sa faible collecte et de sa faible épaisseur.

I.4.1.4. Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (1.6) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes :

Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement figure (1.6).

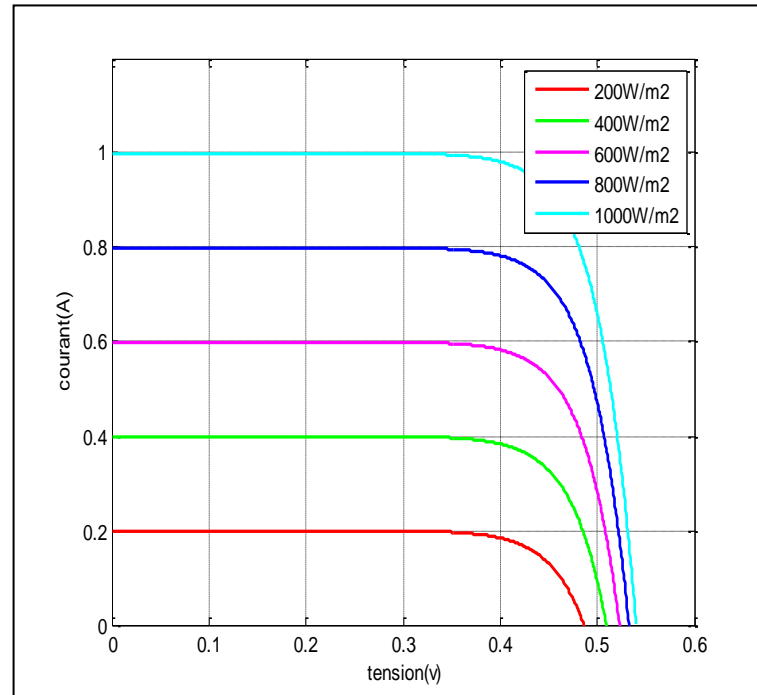


Figure (1.6): Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.

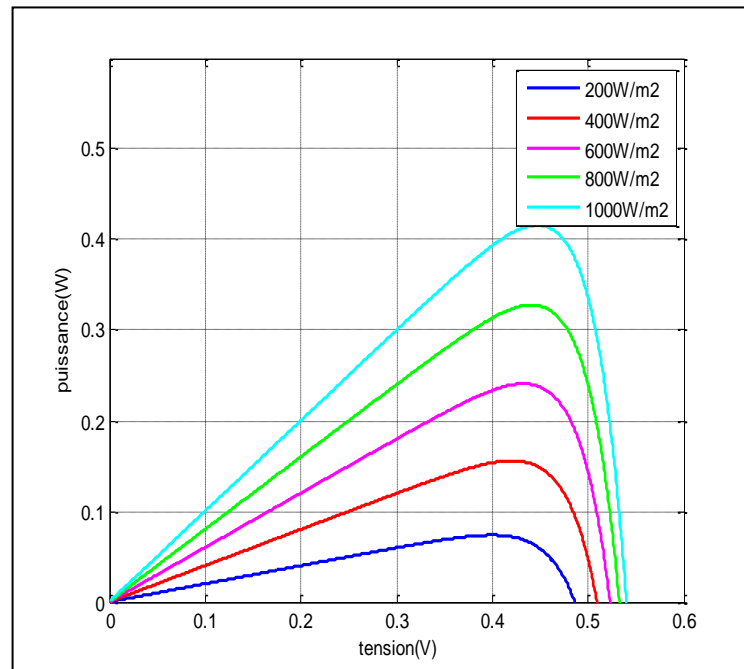


Figure (1.7): Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement.

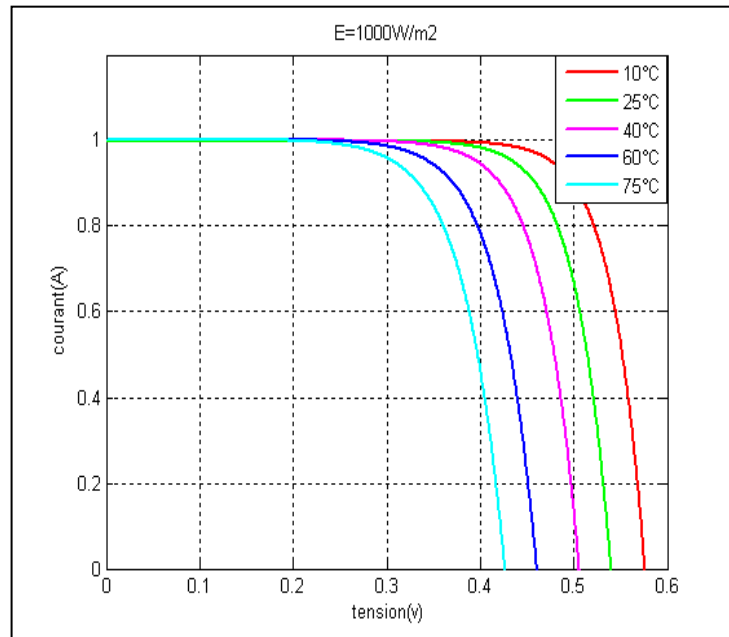


Figure (1.8): Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température.

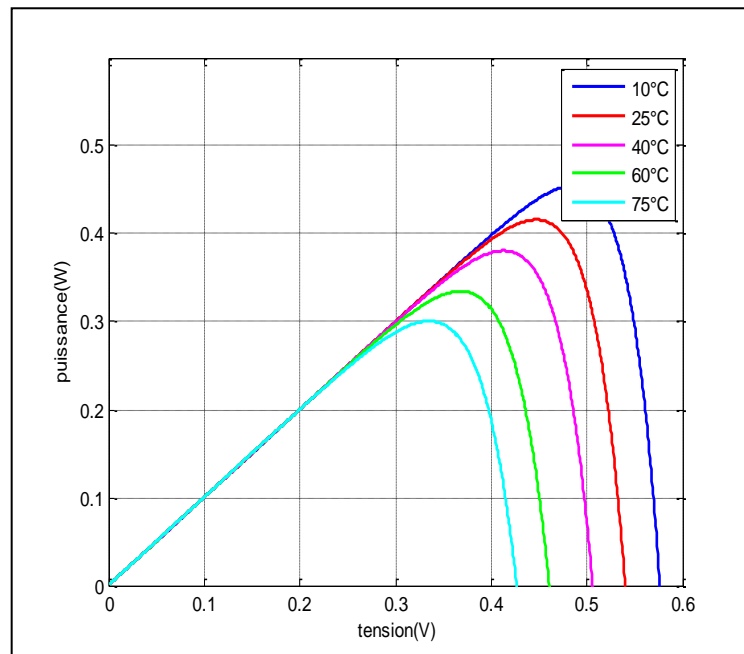


Figure (1.9) : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température.

I.4.1.5. Influence de la température

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques.

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique, il se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température de la cellule (T_c) est toujours plus élevée que la température ambiante (T_a).

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (TUC - 20) \quad (1.5)$$

La figure (1.8), montre que la tension d'une cellule baisse fortement avec la température. Plus la température augmente et moins la cellule est performante. En revanche, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale. [7]

I.4.2. Générateur photovoltaïque

La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules pour obtenir des modules de puissance compatible avec le matériel usuel. Les modules sont ensuite connectés en série pour former une chaîne. Enfin, les chaînes sont connectées en parallèle pour former un générateur photovoltaïque. Le nombre de modules dans chaque chaîne est spécifiée selon le besoin du niveau de tension du générateur. [8,32]

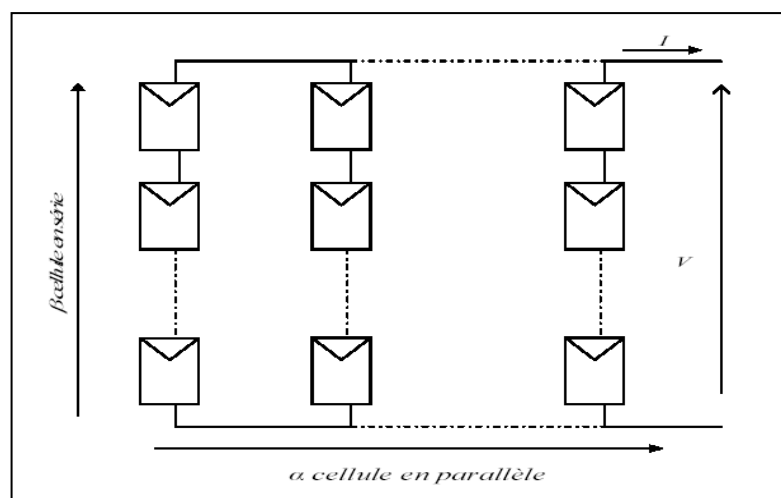


Figure (1.10) : Structure d'un générateur photovoltaïque

I.4.2.1 Modélisation du générateur photovoltaïque :

a- Module photovoltaïque [33]

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (groupement de cellules en série) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante :

$$I' = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q}{nAKT}(V'+R_{se}I')} - 1 \right) - \frac{V'+R_{se}I'}{R_{pe}} \quad (1.6)$$

Avec I' : le courant débité par le module photovoltaïque.

Et R_{se} et R_{pe} résistances série et parallèle du module définie par $R_{se} = n R_s$ et $R_{pe} = n R_{sh}$

b- Panneau photovoltaïque

La modélisation d'un panneau composé de " N_s " modules en série et " N_p " modules en parallèle est donnée par l'équation :

$$I' = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left(e^{\frac{q}{nAKTN_p}(V'+R_{se}I')} - 1 \right) - N_p \frac{V'+R_{se}I'}{R_{pe}} \quad (1.7)$$

Avec R_{se} et R_{pe} résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_{se} = n \frac{N_s}{N_p} \cdot R_s \text{ et } R_{pe} = n \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{sh}$$

$$I_{ph} = (I_{ph, n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (1.8)$$

Le courant photovoltaïque généré dans les conditions nominal ($T=25^\circ\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$)

$$\Delta_t = T - T_n \quad (1.9)$$

Le courant de diode de saturation I_0 dépende de la température par l'équation suivante:

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (1.10)$$

$E_g = 1.12\text{eV}$ pour le polycrystalline et la température trouve la valeur $T = 25^\circ\text{C}$

$$I_{0,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp\left(\frac{V_{oc,n}}{AV_{t,n}}\right) - 1} \quad (1.11)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \Delta T}{A V_t}\right) - 1} \quad (1.12)$$

I.5. Classification d'un système solaire photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en deux grandes catégories: Les systèmes autonomes et les systèmes couplés au réseau. [13]

I.5.1. Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans Une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure 1.11 qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de La production. Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement. [9]

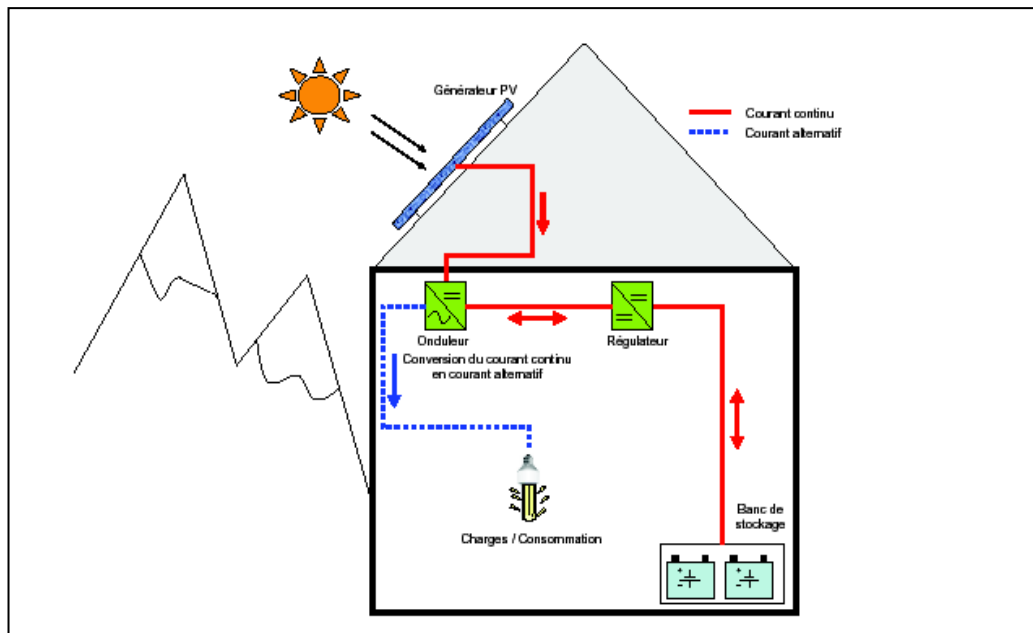


Figure (1.11) : Exemple de la structure d'un système PV autonome

I.5.2. Système hybride

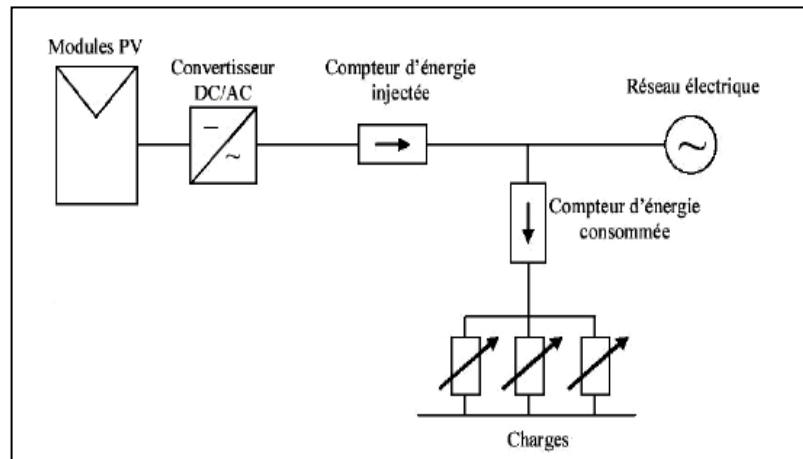
Pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, les dispensaires, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle, la disponibilité permanente de la source primaire d'énergie est vitale et conditionne dans une très large mesure, la fiabilité des installations et leur fonctionnement permanent.

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

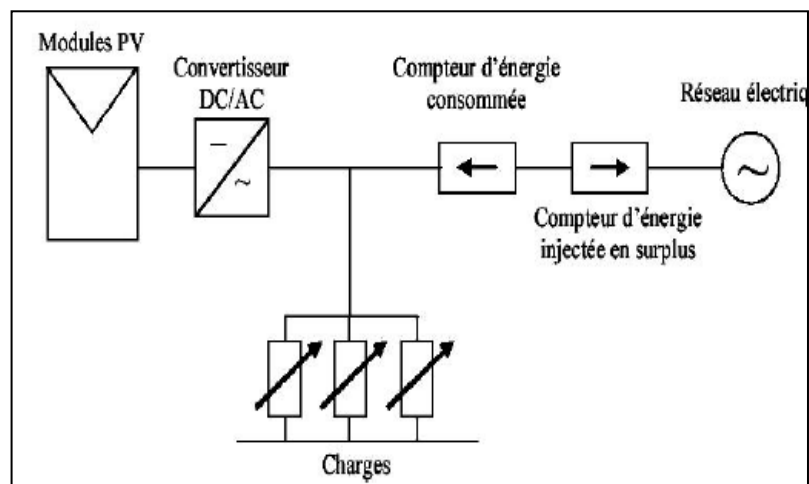
I.5.3. système raccordés au réseau

Les systèmes photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (CC-CA). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même. La figure (1.12) montre les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire:[11]

- **Injection de la totalité de la production:** L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.
- **Injection du surplus de production:** L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau.



a : Injection de la totalité de la production



b : Injection du surplus de production

Figure (1.12): Schéma des installations photovoltaïques couplées au réseau

Les installations photovoltaïques couplées au réseau ont cependant deux inconvénients majeurs:

- ❖ l'intermittence de la production d'énergie solaire ne permet pas le contrôle des périodes d'injections.
- ❖ le déphasage entre la production et la consommation réduit la notion d'autonomie énergétique personnelle.

I.6. Avantages et inconvénients d'une installation PV

Avantages

- ✓ D'abord, une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ✓ Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- ✓ le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, sic n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Inconvénients

- ✓ la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ✓ le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.
- ✓ tributaire des conditions météorologiques.
- ✓ lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- ✓ le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. [12 ,13]

I.7.conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques. Dans la première partie un petit rappel sur la description des éléments d'un système photovoltaïques est présenté. La seconde partie du chapitre est consacrée à la classification des systèmes solaire photovoltaïques ainsi que leurs avantages et inconvénients. Pour notre travail on propose d'étudier la deuxième variante du système injecté au réseau.

CHAPITRE II

LES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE

II.1. Introduction

Selon leurs applications, les convertisseurs de puissance peuvent être choisis en configuration et en dimensionnement dans une diversité apparente qui s'étend jours après jours. Dans le contexte de ce travail, et comme la source initiale est continue et l'énergie acquise sera injectée au réseau alternatif ; nous aurions besoin d'une conversion DC/AC.

Pour assurer une utilisation optimale de notre système, l'un doit maximiser la puissance PV convertie en utilisant l'une des techniques MPPT bien connue [35,36]. Dans le système étudié, on a opté pour une variante simple dans laquelle l'MPPT est assurée par un premier convertisseur DC/DC et la commande d'injection d'énergie au réseau est assurée par un deuxième convertisseur DC/AC ou on a opté pour le convertisseur multi-niveau. Bien sûr, ces deux fonctions peuvent être intégrées, ce qui n'est pas le but de notre présente étude.

Alors, dans ce mémoire, une synthèse des principales topologies des convertisseurs DC/DC (Hacheurs dédiés à l'MPPT) et DC/AC (redresseur/onduleur) est exposée tout en présentant leurs structures, principe de fonctionnement et citation de quelques avantages et inconvénients.

II.2. Convertisseur DC/DC pour les systèmes d'énergie solaire

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation. Le principe d'un hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable. [15]

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont :

- Convertisseur dévolteur.
- Convertisseur survolteur.
- Convertisseur dévolteur- survolteur.

II.2.1. Hacheur dévolteur (série)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est inférieure à celle de l'entrée V_i . Pour un rapport cyclique « α » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par : [32,20]

$$V_s = \alpha \cdot V_i \quad (2.1)$$

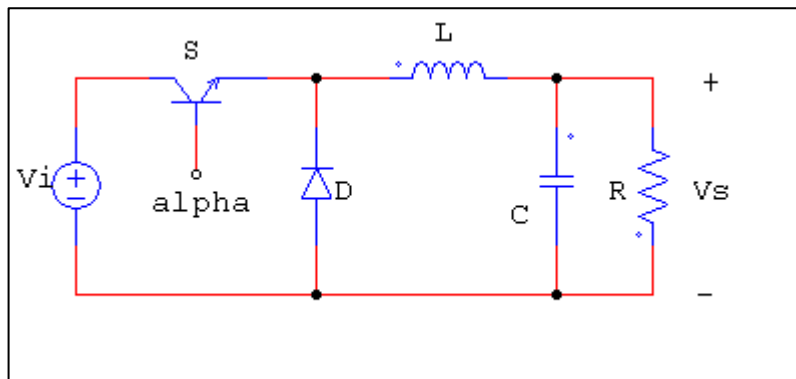


Figure (2.1) : Schémas de principe d'un hacheur série

II.2.2. Hacheur survolteur (ou parallèle)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est supérieure à celle de l'entrée V_i . Pour un rapport cyclique « α » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_i \quad (2.2)$$

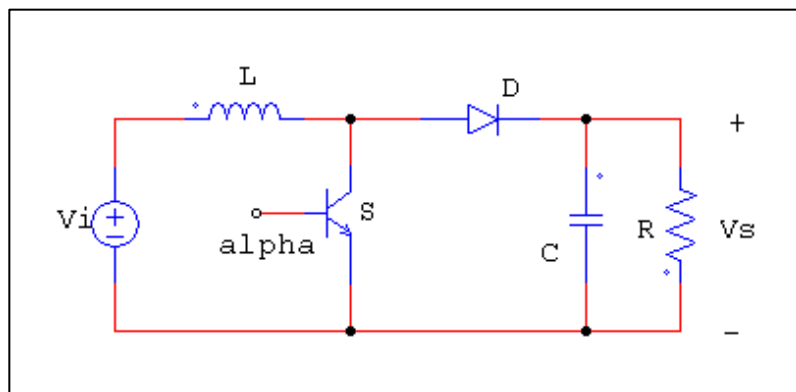


Figure (2.2) : Schémas de principe d'un hacheur parallèle

II.2.3. Hacheur dévolteur - survolteur (série-parallèle)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée V_i . Pour un rapport cyclique « α » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \quad (2.3)$$

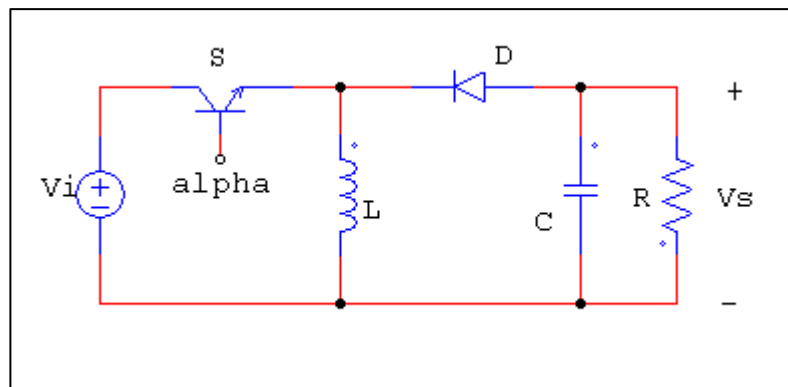


Figure (2.3) : Schémas de principe d'un hacheur série-parallèle

II.3. Techniques d'MPPT

L'amélioration du rendement du système PV nécessite la maximisation de la puissance du générateur PV. Cela est possible si le point de fonctionnement est bien choisi en adaptant l'impédance de la charge à la source de tension. Le convertisseur DC/DC jouera le rôle d'un adaptateur d'impédance assurant ainsi le fonctionnement au point optimal qui permet de produire la puissance maximale du générateur PV.

Donc, la maximisation de puissance de la source PV, revient à chercher ce point de fonctionnement optimal. Cette opération est dite MPPT ou « Maximum Power point Tracking ».

Donc, en intercalant un hacheur entre la source PV et la charge et avec le contrôle rigoureux du rapport cyclique de ce dernier, un suivi continu de la puissance est assuré et la puissance maximale est fournie.

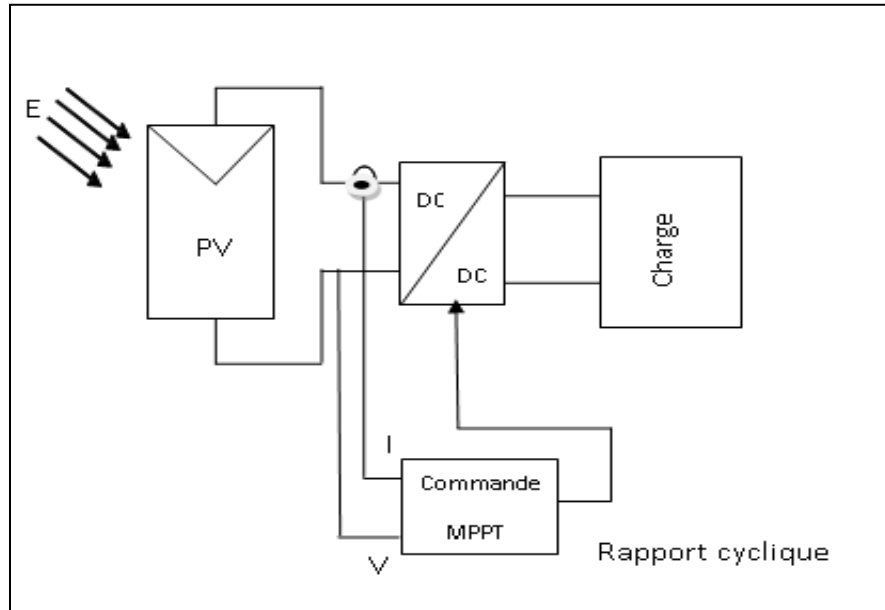


Figure (2.4) : Commande MPPT

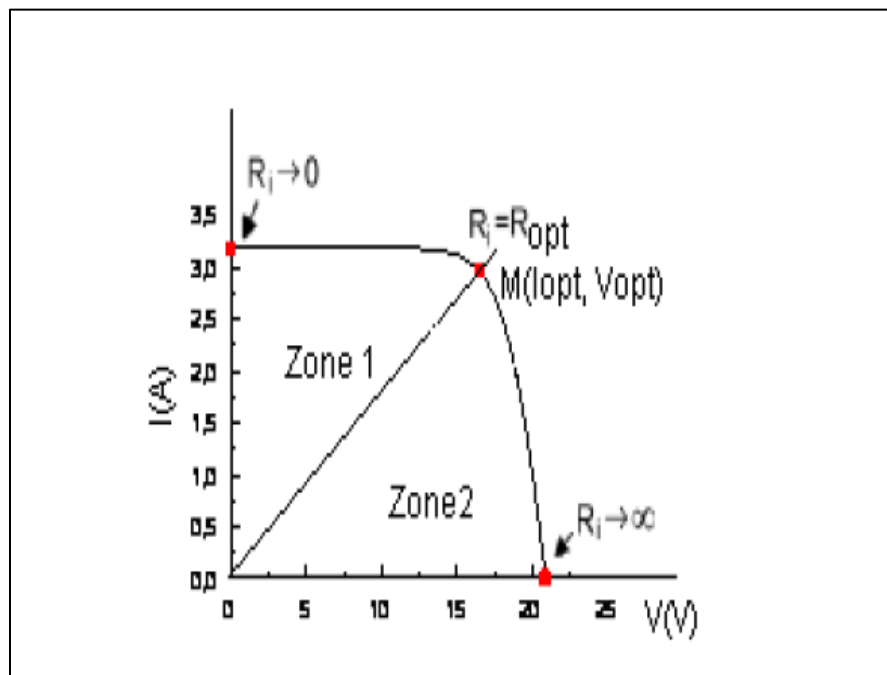


Figure (2.5) : répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur utilisé

Dans la figure (2.5), la zone.1 de la caractéristique courant-tension I-V est une zone de fonctionnement dans le mode « hacheur dévolteur » et l'MPPT est assurée pour toute résistance R_i comprise entre $[0, R_{opt}]$. Ceci s'inverse pour la zone.2 de la caractéristique courant-tension I-V qui présente la zone de fonctionnement dans le mode « hacheur survolteur » ou le fonctionnement du MPPT est assuré pour toute résistance R_i comprise entre $[R_{opt}, \infty]$.

Un choix de convertisseur dévolteur ou survolteur pour une charge donnée est impératif. L'un peut utiliser l'un des deux types de convertisseur selon la configuration du circuit. Si il y a une possibilité de fluctuation de la tension demandée par la charge au-dessous est au-dessus de celle débitée par la source, un Hacheur dévolteur/survolteur s'avère nécessaire. [34]

Divers travaux sur des commandes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV. En littérature on trouve fréquemment les techniques de maximisation de puissance suivantes

- MPPT basé sur la tension du circuit ouvert V_{oc}
 - Avec compensation de température
 - Sans compensation de température
- MPPT basé sur le courant de court-circuit I_{sc}
- Vrai MPPT
 - Perturbation et observation. (P&O).
 - La méthode d'incrément de la conductance
 - Méthode de capacité parasite.

Chacune de ces techniques a ses propres avantages et inconvénients du point de vue simplicité, efficacité et robustesse.

Dans notre travail, et puisque notre tâche principale est l'étude du convertisseur multi-niveau, on se contente par l'étude de l'MPPT à tension constante avec compensation de température qui est très simple à implanter, et de bon rendement.

II.3. 1. Technique MPPT à tension constante.

Cette technique connue aussi sous le nom de "*Technique de fraction de la tension du circuit ouvert*" est facile à mettre en œuvre, moins coûteuse pour les systèmes photovoltaïques.

Plusieurs études ont montré que le rapport entre la tension optimale (pour laquelle la puissance débitée est maximale) et celle en circuit ouvert est approximativement constant, pour un même module, sous des niveaux d'éclairement et températures différents.

Dans ce contexte, deux procédures sont possibles

- Technique MPPT à tension constante sans compensation de température
- Technique MPPT à tension constante avec compensation de température

La première technique suggère la connaissance préalable des paramètres de la source photovoltaïque, principalement la tension à circuit ouvert, à la base de laquelle on détermine la tension $V_{\text{réf}}$ qui sera prise comme référence telle que $V_{\text{réf}} = K V_{\text{oc}}$. La valeur de la constante K est fixe pour toutes les conditions de fonctionnement et est donnée empiriquement, figure (2.6).

Malgré sa simplicité et facilité d'implantation, cette technique souffre d'un handicap majeur qui réside dans sa insensibilité aux variations des conditions climatiques. Il est évident que pour toute variation de température, la valeur de la tension à circuit ouvert varie, figure (2.10).

La deuxième technique prévient les limitations de la technique précédente en tenant compte des variations des conditions climatiques (température et éclairage) en liant directement la valeur de référence $V_{\text{réf}}$ à la tension du circuit ouvert V_{oc} réellement mesurée à travers un panneau pilote, figure (2.7). [37,38]

Ceci est la base du fonctionnement à fraction de tension constante avec compensation de température qui peut être interprété par :

$$\frac{V_{MPP}}{V_{oc}} \cong K \quad (2.4)$$

La tension de circuit ouvert est mesurée en utilisant un module pilote de mêmes caractéristiques que le générateur utilisé et qui est implanté dans les mêmes conditions de fonctionnement. Le point maximum de fonctionnement de puissance est calculé en utilisant l'équation (2.4). La littérature [14] donne un intervalle de 71% et 78% comme bande de valeurs de la constante K . En réalité K n'est pas constant et est affecté par des niveaux de l'éclairage, la température et de type de module.

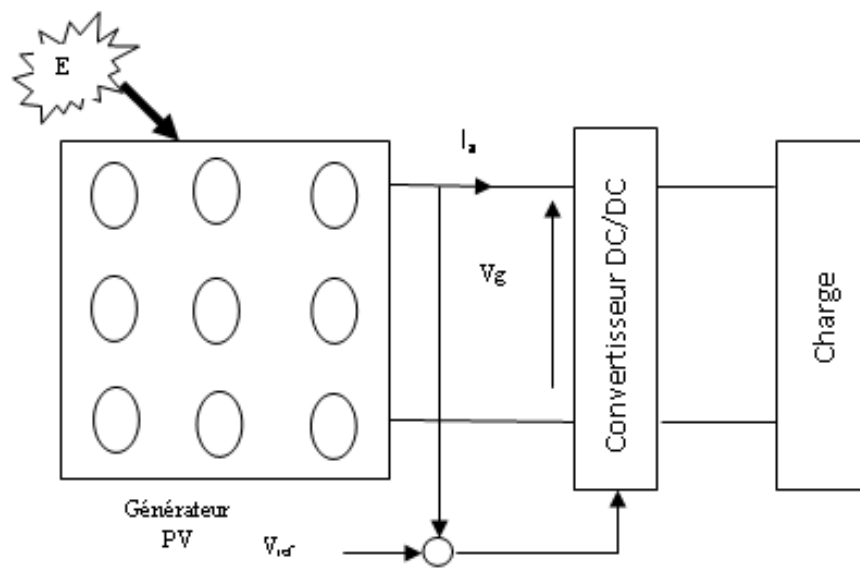


Figure (2.6) : MPPT sans compensation de température

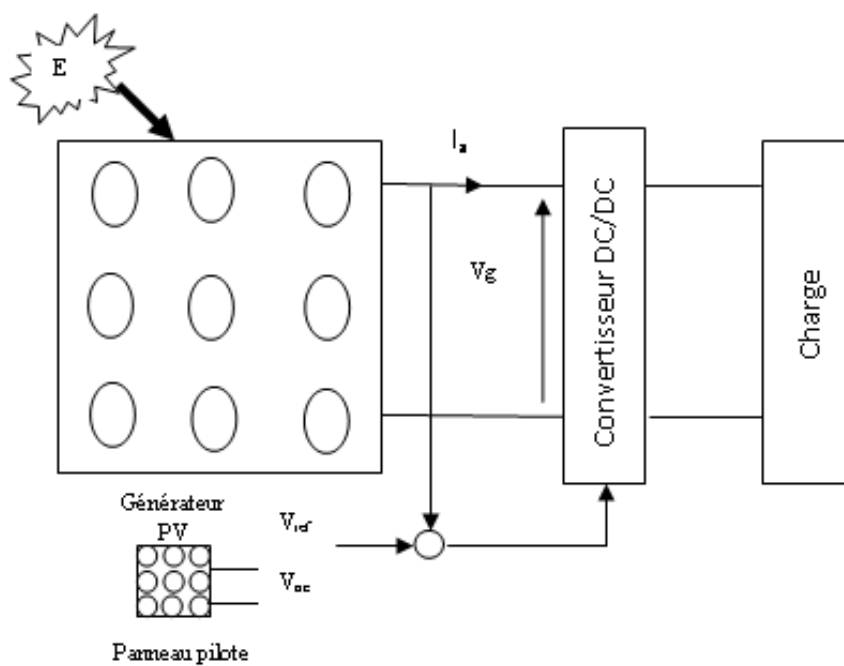


Figure (2.7) : MPPT avec compensation de température

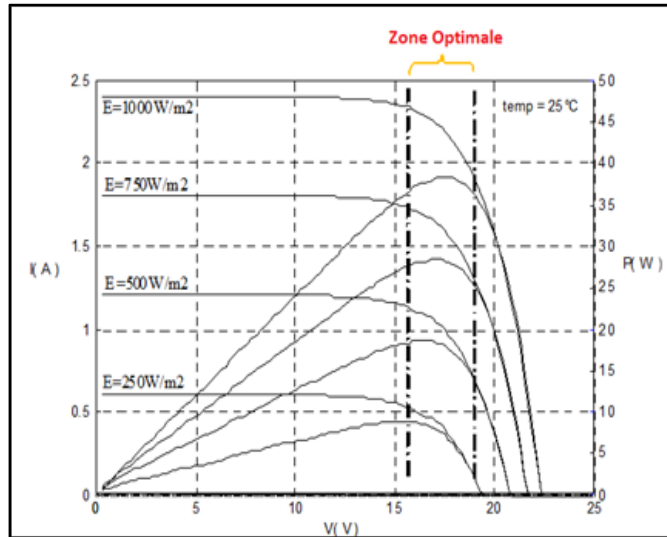


Figure (2.8) : Zone de fonctionnement à puissance maximale

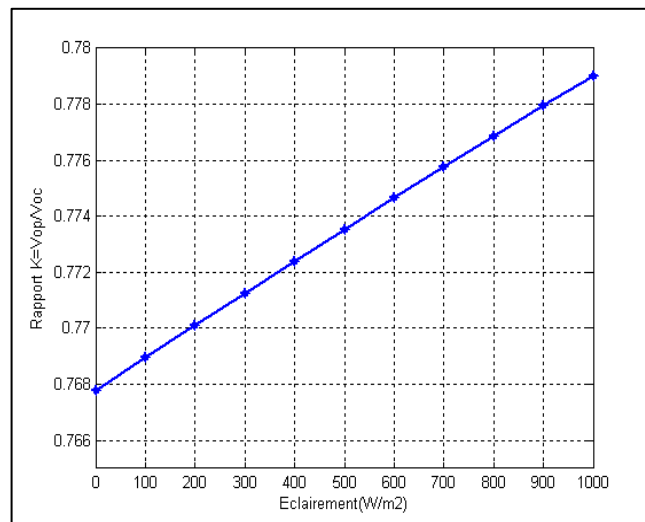


Figure (2.9): Rapport entre V_{op} et V_{oc} en fonction de l'éclairement

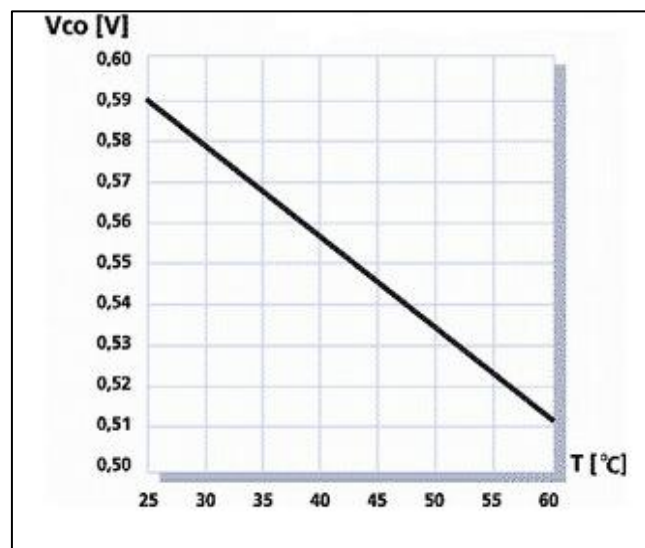


Figure (2.10) : La tension V_{op} en fonction de température

II.4. Convertisseur multiniveaux

Durant ces dernières années, on vit la naissance de nouveaux convertisseurs de puissance multiniveaux qui sont utilisés dans le domaine des entraînements de grande puissance et trouvent une intégration rapide dans le domaine PV. Parmi les convertisseurs multiniveaux, on peut citer les redresseurs multiniveaux et les onduleurs multiniveaux.

II.4. 1. Redresseurs multiniveaux :

Par leur structure, Les onduleurs à trois niveaux sont réversibles. Ils peuvent fonctionner en onduleur pour transférer l'énergie de la source de tension continue à la source de courant alternatif ou bien fonctionner en redresseur et assurer alors le transfert énergétique dans le sens inverse. Dans ce qui suit, on adoptera la convention générateur pour la source de courant et la convention récepteur pour la source de tension. [16,17]

II.4. 1.1. Structure générale d'un redresseur à trois niveaux [17]

La figure (2.11), ci-dessous représente la structure générale d'un redresseur de courant à trois niveaux structure NPC, le rôle de ce redresseur de courant est de générer une tension de sortie continue à partir d'une source alternative

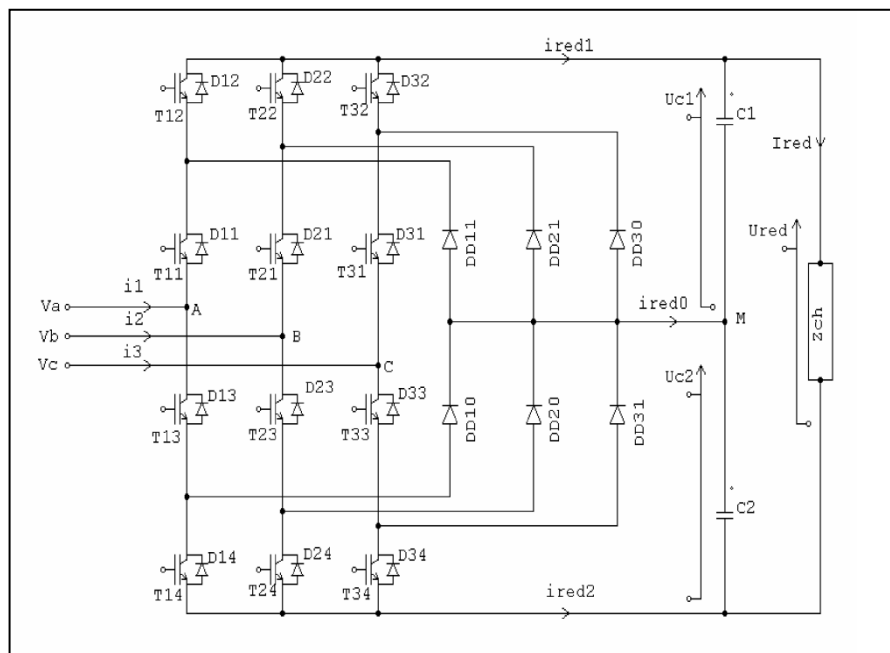


Figure (2.11): Structure générale d'un redresseur de courant à trois niveaux à MLI

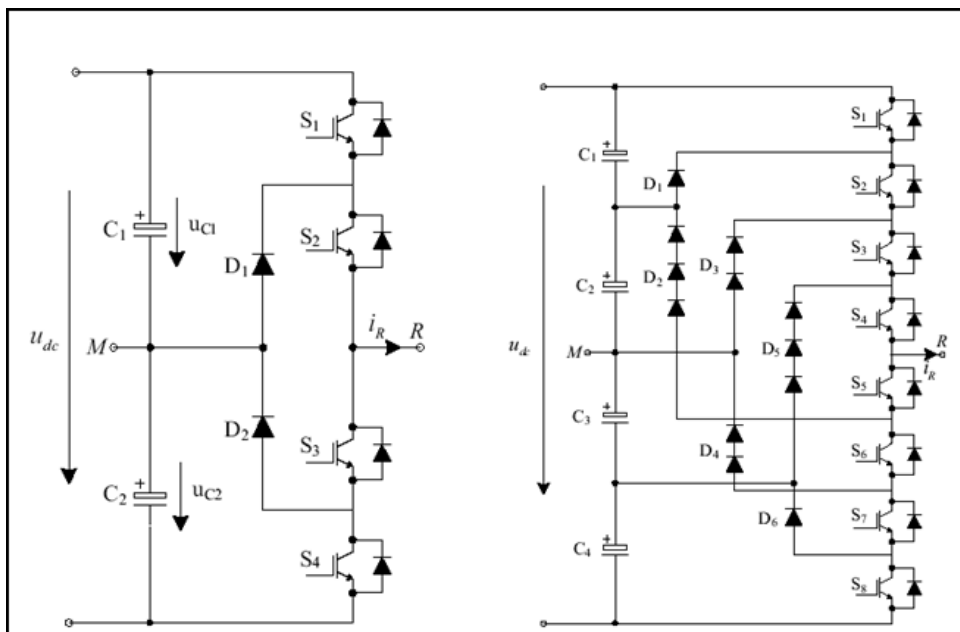
II.4.2. Différents topologie des onduleurs multiniveaux

Par définition, l'onduleur de tension multiniveaux possède trois ou plusieurs niveaux. L'objectif de cette partie est de donner un aperçu générale des trois topologies de base des onduleurs multiniveaux, [22]:

- la topologie à diode de bouclage
- la topologie à condensateur flottant
- la topologie en cascade

1. Onduleur de tension à diode de bouclage

Cette structure d'onduleur multiniveaux a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteur [18]. L'onduleur NPC à trois et cinq niveau est illustré dans la figure (2.12). [19]



a) –NPC trois niveaux, b)-NPC cinq niveaux

Figure (2.12): Topologies d'onduleurs NPC

Pour la génération de trois niveaux de tension, la topologie NPC présente plusieurs avantages par rapport à la topologie d'onduleur à deux niveaux. [21,22]

- les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.
- cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux.
- Toutes les phases partagent le même bus continu.
- la fréquence fondamentale assure un haut rendement.
- La méthode de contrôle est relativement simple.
- La forme d'onde de trois niveaux résulte dans une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux.

Par contre, cette topologie présente plusieurs difficultés techniques dans les cas de grande puissance tel que :

- Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à $E(N-1)/N$. Donc, les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception et soulève des questions de fiabilité et du coût de réalisation.
- Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée qui doivent être capable de supporter le courant de la pleine charge.
- Différents calibres pour les appareils de commutation sont nécessaires en raison de leur conduction cyclique.

Le maintien de l'équilibre de la charge des condensateurs demeure toujours une question ouverte pour les topologies des onduleurs NPC avec plus de trois niveaux. Bien que le l'onduleur NPC à trois niveaux fonctionne avec un facteur de puissance élevé, il est employé surtout dans les circuits de compensation. Cela est dû au problème d'équilibrage des capacités.

2. Onduleur de tension a condensateur Flottant

Dans la topologie multiniveaux proposée par T. Meynard et H. Foch en 1992. La structure de ce convertisseur est similaire à celle de l'onduleur à diode de bouclage sauf qu'au lieu d'utiliser des diodes de blocage, l'onduleur utilise des condensateurs à leur place. D'où l'appellation « Onduleur à Condensateurs Flottants ». Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de balancement de tension, et d'autre part le nombre excessif des diodes.

Dans la topologie suivante, figure (2.13), on représente l'onduleur à condensateur flottant à trois et cinq niveaux [23].

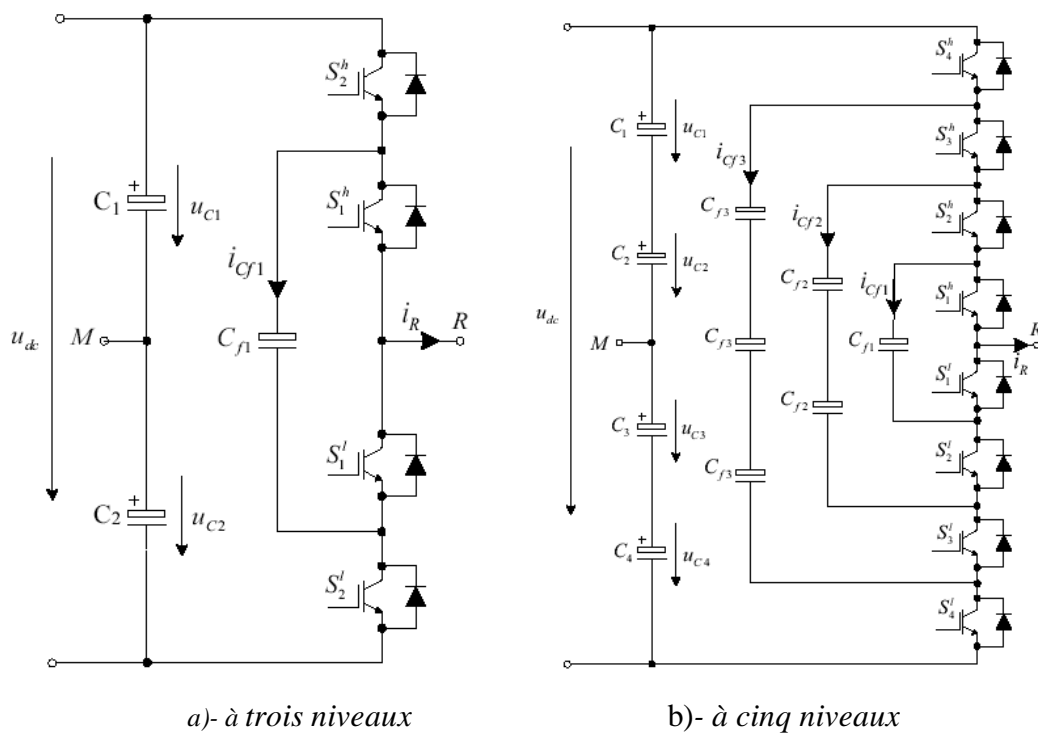


Figure (2.13): Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages : [25]

- Le concept de condensateur Flottant peut être appliqué à un certain nombre de convertisseurs de différents types, DC /AC ou AC/ DC
- La plupart des stratégies de modulation sont facilement appliquées à cette topologie
- Les tensions sur les condensateurs sont automatiquement équilibrées par cette stratégie de modulation conventionnelle. Si désiré, les tensions de condensateur peuvent être activement contrôlées par une modification appropriée des signaux de commande.
- La charge est par défaut partagée équitablement entre les commutateurs.
- La topologie est modulaire et ne dépend pas d'un transformateur.

Néanmoins, cette topologie présente quelques inconvénients, tel que:

- La topologie exige beaucoup de condensateurs à haute tension-beaucoup plus nombreux que d'autres topologies. Ces condensateurs doivent conduire le courant de pleine charge pendant au moins une partie du cycle de commutation. Heureusement, si la fréquence de commutation est élevée, ces condensateurs peuvent généralement être relativement faibles en valeur de la capacité.
- La topologie n'est pas intrinsèquement tolérante aux pannes.

3. Onduleur de tension en cascade

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

Les onduleurs multi-niveaux en cascade ont introduit l'idée d'utiliser des sources DC séparées pour produire une onde de tension AC. Chaque onduleur monophasé est connecté à sa propre source en courant continu. Les sorties de chaque onduleur monophasé, est une onde de tension alternative, Figure (2.14). [26]

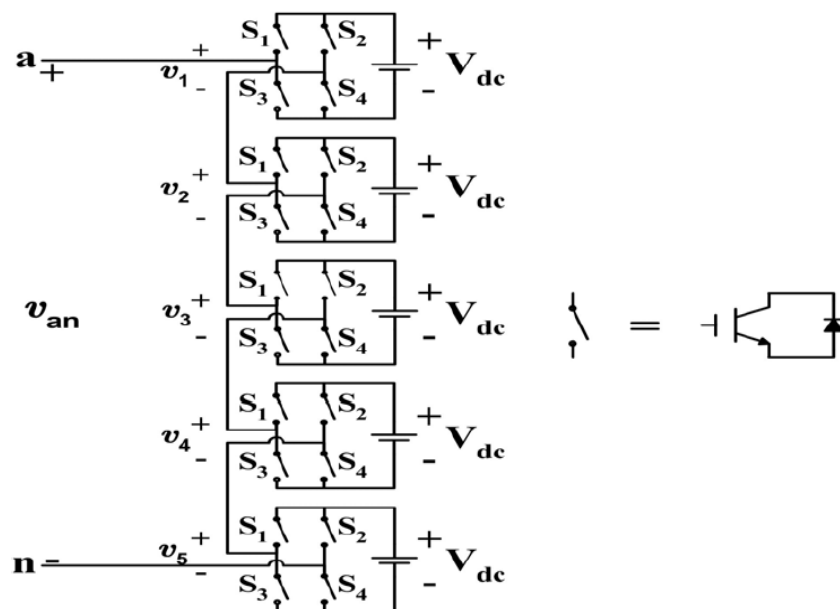


Figure (2.14): Structure d'un onduleur multiniveaux en cascade à cinq niveaux

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

Avantage:

- Pour atteindre le même nombre de niveaux de tension, ce type de convertisseur nécessite moins de composants.
- Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire.
- Fabrication modulaire, comme chaque pont monophasé a la même structure.
- La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par chaque onduleur monophasé.
- Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraîne moins de problèmes de sécurité.
- Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus du double du nombre de sources à courant continu ($N = 2s + 1$).

Inconvénients:

- Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur traditionnel.
- Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
- Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC. [26,27]

II.5. Différentes stratégies de commande des convertisseurs multiniveaux

Afin de générer une tension la plus sinusoïdale que possible [28], des techniques d'élimination des harmoniques et de commutation d'onduleurs ont été l'objet de recherche [29]

Les stratégies de commande des convertisseurs multiniveaux sont en générale une adaptation de celles appliquées aux convertisseurs à deux niveaux. Dans cette partie, nous présentons quelques techniques de commande.

II.5.1. Classification des stratégies de modulation

Les méthodes de modulation utilisées dans les onduleurs multiniveaux peuvent être classées en fonction de la fréquence de commutation.

La méthode la plus populaire dans les applications industrielles est celle à MLI à porteuse sinusoïdale (SPWM) qui utilise la technique du décalage de phase pour réduire les harmoniques de la tension de charge.

II.5.1.1. Commande par modulation de largeur d'impulsions

La commande par MLI consiste à découper la tension de sortie générée par le convertisseur en une série de motifs élémentaires de période très faible, et de rapport cyclique variable dans le temps. L'évolution temporelle du rapport cyclique de chaque interrupteur est alors déterminée par un signal modulant que l'on choisit en général sinusoïdal. Les ordres de commande de chaque cellule sont générés par l'intersection entre une porteuse triangulaire et le signal modulant. Selon la stratégie adoptée, ce dernier peut être échantillonné en synchronisme avec la porteuse triangulaire, ou comparé directement à celle-ci. Chaque interrupteur commute à une fréquence imposée par celle de la porteuse. [24]

Dans cette partie, on analyse trois stratégies de modulation à MLI sinusoïdale: classique, à double triangle et modifiée. Il s'agit de déterminer, pour un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC, le signal de commande généré par chacune des trois techniques. [22] cette méthode de commande permet:

- de repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie.
- de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

a. Modulation sinusoïdale classique

Comme pour les onduleurs à deux niveaux, les signaux de commande des interrupteurs sont obtenus à partir des intersections des trois signaux de référence sinusoïdaux déphasés entre eux de 120° , de fréquence f_{ref} et d'amplitude A_{ref} , avec un signal triangulaire d'amplitude A_p et de fréquence f_p , très supérieure à f_{ref} .

b. Modulation sinusoïdal triangles multiples

Cette technique est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale classique. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires de même fréquence f_p et de même amplitude A_p .

Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitude A_{ref} et de fréquence f_{ref} . C'est la modulation sinusoïdale à double triangle.

Pour les onduleurs avec un nombre de niveaux N supérieur à trois, la technique sinusoïdale classique avec son signal triangulaire unique, ne permet pas la génération de tous les signaux de commande requis. Alors, c'est la modulation sinusoïdale à triangles multiples qui le permet. Cette technique nécessite $(N-1)$ signaux triangulaires de même fréquence f_p et de même amplitude A_p .

Le taux de modulation m_a et le rapport de fréquence m_f sont donnés respectivement par les expressions (2.1) et (2.2).

$$m_a = A_{ref} / (N-1) A_p \quad (2.4)$$

$$m_f = f_p / f_{ref} \quad (2.5)$$

c- modulation sinusoïdale modifiée

Selon la caractéristique de la MLI sinusoïdale, les largeurs des impulsions s'approchent de l'amplitude maximale de l'onde sinusoïdale à un point qui ne change pas significativement avec la variation de l'indice de modulation.

Cela est dû à la caractéristique d'une onde sinusoïdale et la technique de MLI sinusoïdale peut être modifiée en appliquant l'onde sinusoïdale durant le début et la fin d'un intervalle de 60° par demi-cycle; c'est à dire 0 à 60° et de 120° à 180° .

Ce type de modulation est connu sous le nom de MLI sinusoïdale modifiée. La composante fondamentale est ainsi augmentée et les caractéristiques des harmoniques sont améliorées. [10]

II.5.1.2 .modulation vectorielle

A la différence de la MLI intersective, dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs afin d'obtenir en valeur moyenne une tension de référence à partir des états de commutation de l'onduleur sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques.

Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur. En général, la valeur moyenne du vecteur de référence peut être calculée en utilisant plus d'un vecteur par cycle de modulation, par l'approximation MLI valeur moyenne. Si l'on sélectionne les vecteurs adéquats et si l'on les applique dans l'ordre correct il est possible d'obtenir une fréquence de commutation à la sortie relativement élevée avec une fréquence de commutation réduite au niveau de composante.

La modulation vectorielle diffère, entre autres, des techniques intersectorielles par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de l'onduleur en même temps. [30]

II.5.1.3. Elimination d'Harmoniques sélective.

Cette technique de modulation, qui est une méthode très efficace et très importante pour la commande des onduleurs deux niveaux afin d'améliorer beaucoup plus la qualité de leurs tensions de sortie. Elle consiste à former l'onde de sortie de l'onduleur d'une succession de créneaux de largeurs variables. Généralement, on utilise une onde qui présente une double symétrie par rapport au quart et à la demi-période. [31]

II.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté les différents types de convertisseurs de puissances utilisés. L'hacheur en tant qu'adaptateur d'impédances, est en premier présenté ; Ensuite les techniques de commandes associées sont discutées.

Le redresseur multiniveaux est aussi présenté avant d'entamer l'étude de l'onduleur multiniveaux qui présente notre intérêt dans cette étude. Les différentes topologies de base de ce dernier sont données toute en exposant leurs avantages et inconvénients à savoir :

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

On a aussi présenté les différentes techniques de commande relatives à ce type de convertisseur. Le chapitre suivant, sera consacré à l'étude de l'onduleur de type NPC en mettant l'accent sur le principe de fonctionnement de l'onduleur trois niveaux et cinq niveaux.

CHAPITRE III

ONDULEUR DE TENSION MULTINIVEAUX DE TYPE NPC

III.1. Introduction

Le travail présenté dans ce chapitre porte en premier sur l'étude détaillée de l'onduleur de tension à trois et cinq niveaux de type NPC, sa structure et son principe de fonctionnement.

III.2. Onduleur à trois niveaux type NPC

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs supplémentaires alimentés chacun par une source de tension continue distincte, Figure 3.1.

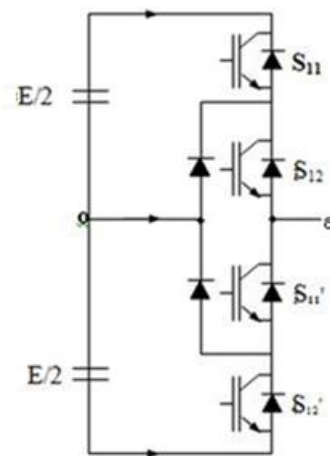


Figure (3.1): Schéma d'une branche d'onduleur NPC à 3 niveaux

En général un convertisseur NPC N-niveau à trois phases, est composé de $2 \cdot (N-1)$ interrupteurs connectés en série et $(N-1)$ liaisons à courant continu. La tension aux bornes du condensateur est égale à $(U_{dc} / N-1)$.

III.2.1. principe de fonctionnement

Pour décrire le fonctionnement de l'onduleur triphasé de type NPC, on considère un seul bras dont la structure est représentée dans la Figure (3.1). Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne "a" de la charge et le point neutre 0.

Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs S_{11} , S_{12} , S_{11}' et S_{12}' du bras.

Pour ce type d'onduleur, seules trois séquences sont fonctionnelles. Elles sont décrites comme suit:

- ✓ Séquence 1: S_{11} , S_{12} sont passants et S_{11}' , S_{12}' sont bloqués:
 - Dans ce cas la tension de sortie est : $V_{ao} = +E/2$.

- La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est:

$$V_{S11}' = V_{S12}' = +E/2.$$

- ✓ Séquence 2: S_{12} , S_{11}' sont passants et S_{11} , S_{12}' sont bloqués:

La charge est mise en court-circuit à travers l'un des interrupteurs S_{12} ou S_{11}' et l'une des diodes de bouclage (roue libre). Donc, le point « a » est relié directement au point neutre O.

Alors, la tension de sortie V_{ao} est nulle: $V_{ao} = 0$.

- La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est:

$$V_{S11} = V_{S12}' = +E/2.$$

- ✓ Séquence 3: S_{11} , S_{12} sont bloqués et S_{11}' , S_{12} sont passants:

- Dans ce cas la tension de sortie est : $V_{ao} = -E/2$.

- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{S11} = V_{S12} = +E/2.$$

Les figures suivantes illustrent les formes d'onde de la tension de sortie V_{ao} , ainsi que les signaux de commande de chaque interrupteur.

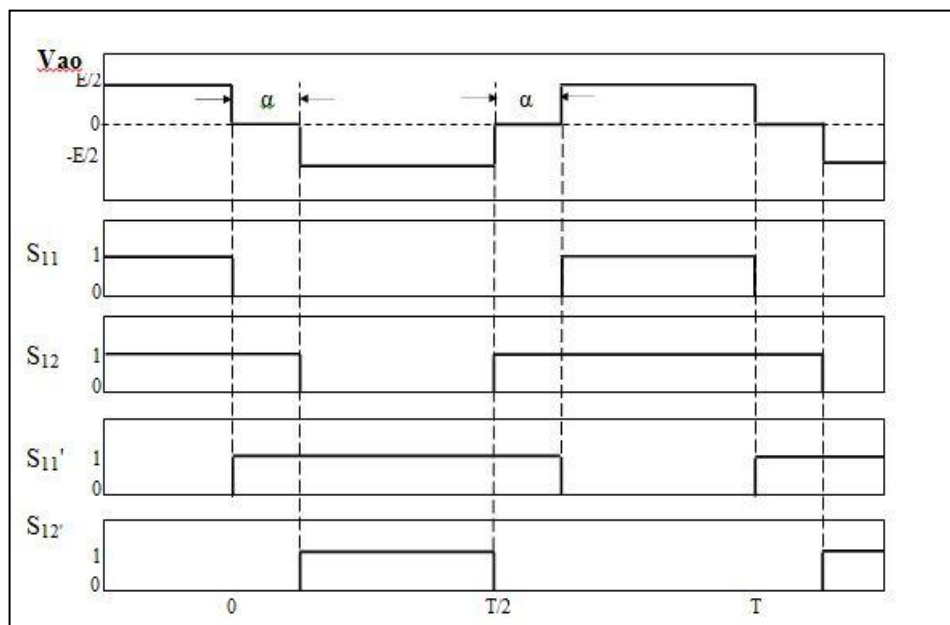


Figure (3.2): Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé trois niveau de type NPC

Cette analyse montre que la structure de l'onduleur à trois niveaux limite à $E/2$ la tension imposée à chaque interrupteur lorsqu'ils bloqués, alors que dans la structure classique de l'onduleur à deux niveaux, cette tension vaut la tension continue complète E .

C'est cette caractéristique de l'onduleur à trois niveaux qui permet de monté en tension et en

puissance dans le cas des applications de forte puissance

. III.3.Onduleur à cinqniveaux type NPC

La figure (3.3) présente l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structureNPCdans lequel les diodes sont utilisées pour réaliser la connexionavec le point de référence O. Pour l'obtention d'une tension de N-niveaux, N-1 capacités sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à $E/(N-1)$. Chaque couple d'interrupteurs (S_{xy}, S'_{xy}) forme une cellule de commutation, ces deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire.

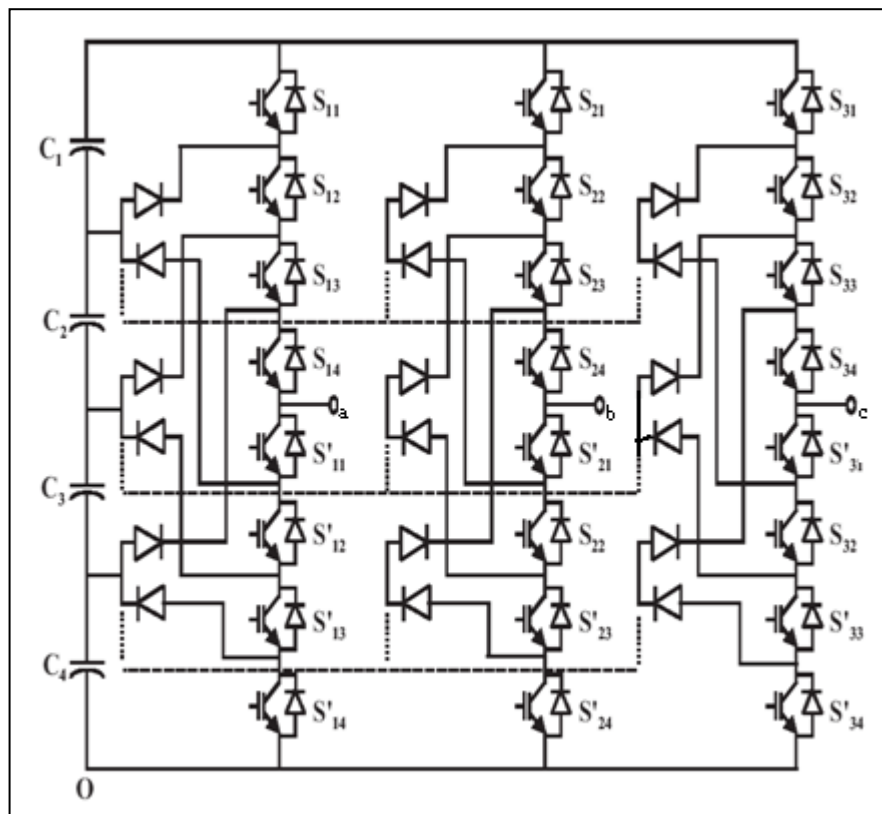


Figure (3.3): Structure triphasé d'un onduleur cinq niveaux

III.3.1. principe de fonctionnement

Pour ce type d'onduleur, seules cinq séquences sont fonctionnelles. Elles sont d'écrites comme suit:

✓ Séquence 1

S_{11}, S_{12}, S_{13} et S_{14} sont passant et $S'_{11}, S'_{12}, S'_{13}$ et S'_{14} sont bloqués:

- la tension de sortie est : $V_{a0} = +E/2$
- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :
 $V_{S'_{11}} = V_{S'_{12}} = V_{S'_{13}} = V_{S'_{14}} = +E/4.$

✓ séquence 2

S_{12}, S_{13}, S_{14} et S'_{11} sont passant et $S'_{12}, S'_{13}, S'_{14}$ et S_{11} sont bloqués :

- la tension de sortie : $V_{a0} = +E/4$
- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :
 $V_{S'_{12}} = V_{S'_{13}} = V_{S'_{14}} = V_{S_{11}} = +E/4$

✓ séquence 3

S_{13}, S_{14}, S'_{11} et S'_{12} sont passant et S'_{13}, S'_{14}, S_{11} et S_{12} sont bloqués :

- La tension de sortie : $V_{a0} = 0$
- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :
 $V_{S'_{13}} = V_{S'_{14}} = V_{S_{11}} = V_{S_{12}} = +E/4$

✓ séquence 4

S_{14}, S'_{11}, S'_{12} et S'_{13} sont passant et S_{11}, S_{12}, S_{13} et S'_{14} sont bloqués:

- La tension de sortie : $V_{a0} = -E/4$
- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :
 $V_{S_{11}} = V_{S_{12}} = V_{S_{13}} = V_{S'_{14}} = +E/4$

✓ séquence 5

$S'_{11}, S'_{12}, S'_{13}$ et S'_{14} sont passant et S_{11}, S_{12}, S_{13} et S_{14} sont bloqués:

- La tension de sortie $V_{a0} = -E/2$
- la tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :
 $V_{S_{11}} = V_{S_{12}} = V_{S_{13}} = V_{S_{14}} = +E/4$

La figure suivante représentée les formes d'onde de la tension de sortie V_{ao} , ainsi que les signaux de commande de chaque interrupteur.

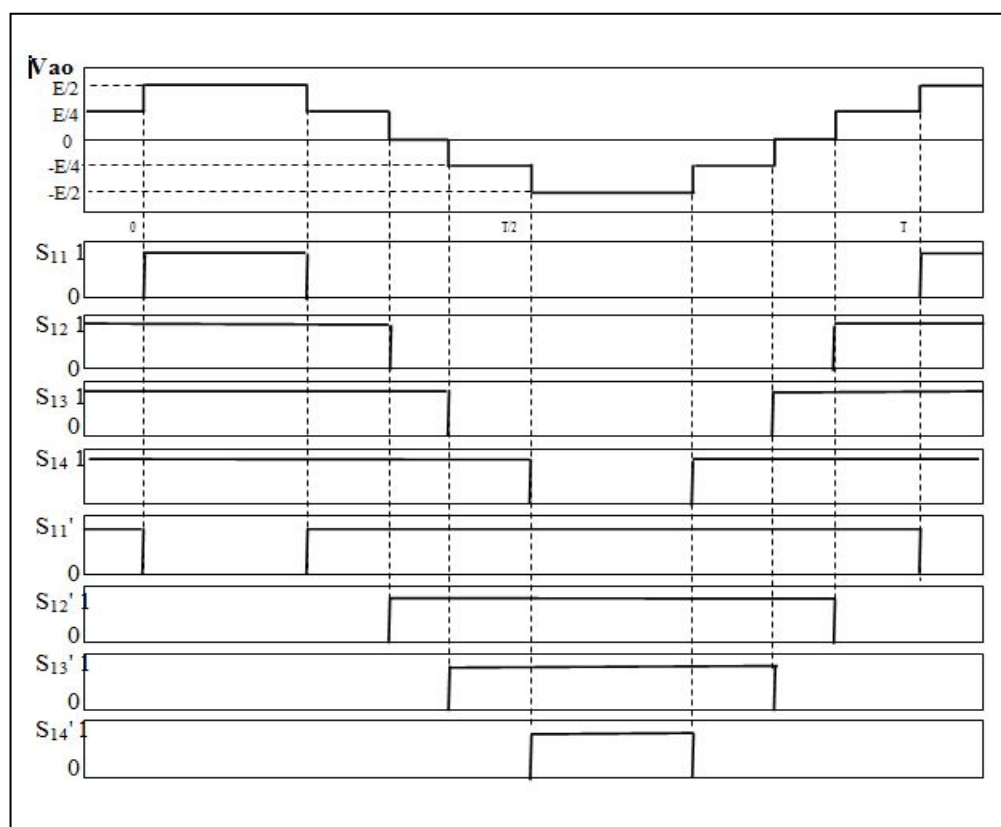


Figure (3.4): Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé cinq niveau de type NPC

III.4. Les techniques de modulation

Grâce à ses performances élevées, la technique à MLI sinusoïdale est la plus utilisée pour la commande des onduleurs à deux niveaux. Pour les mêmes raisons, elle est aussi utilisée dans les onduleurs multiniveaux.

Dans ce chapitre, on analyse la stratégie de modulation à MLI sinusoïdale, à double triangle.

III.4.1. Commande triangulo-sinusoidal à n porteuses

Le principe de cette stratégie de commande, est de comparer le signal de référence ou modulante V_{ref} de forme sinusoïdale avec le signal de n porteuses V_p de forme triangulaire, cette comparaison compte sur les intersections.

Toutes les stratégies de commande triangulo-sinusoidal sont caractérisées par deux paramètres essentiels :

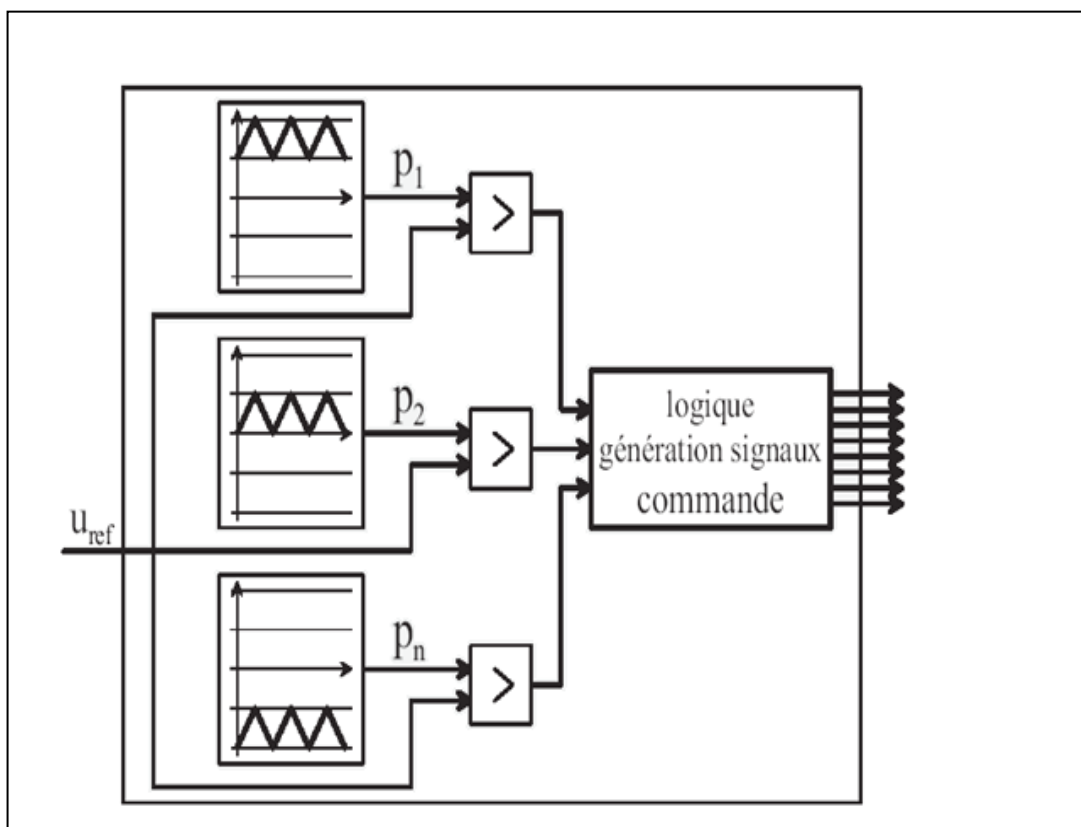


Figure (3.5):Modulation sinusoidal avec un ensemble de Porteuses

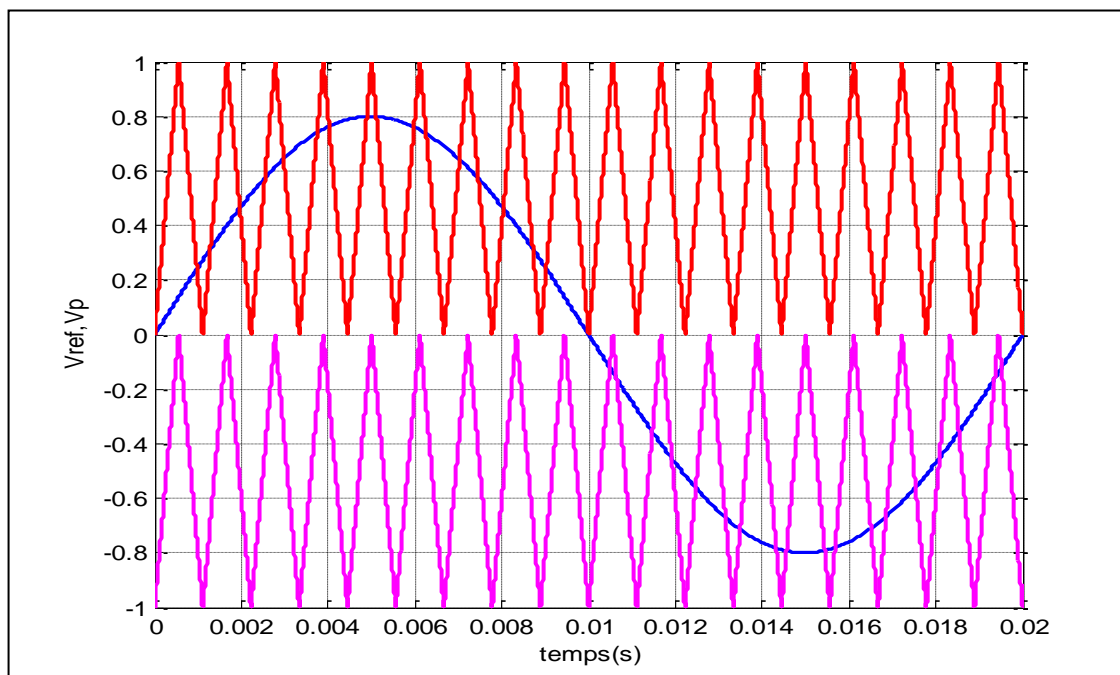


Figure (3.6) : principe de la MLI à double triangle

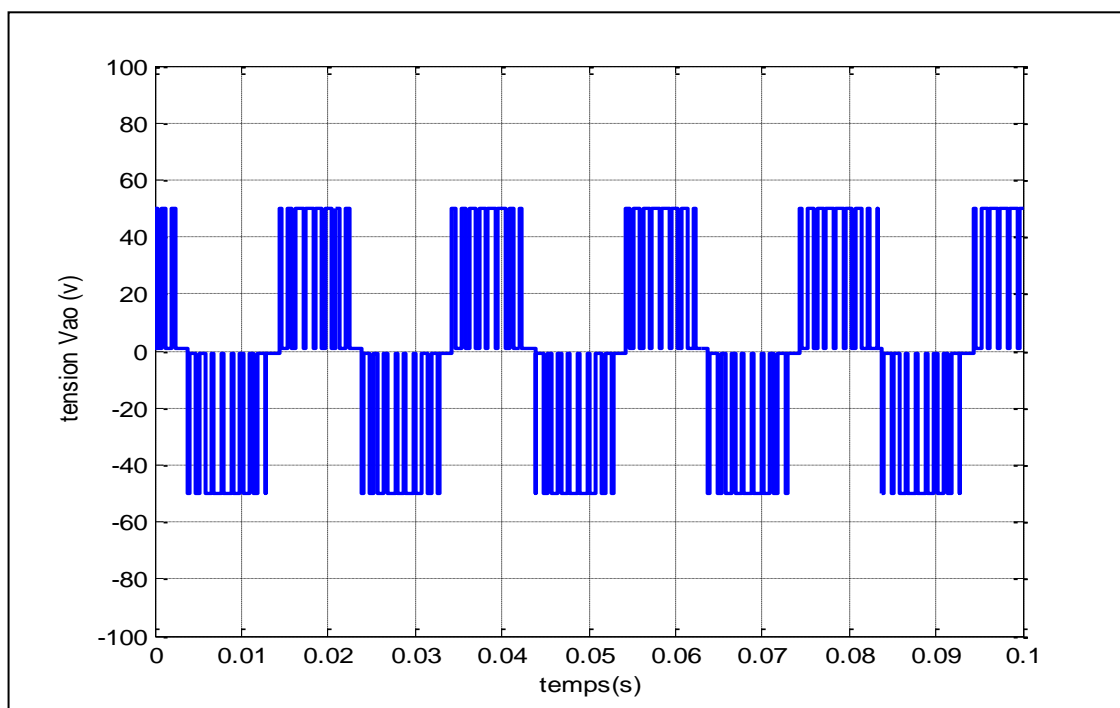


Figure (3.7) : Tension simple V_a de sortie de l'onduleur à trois niveaux
MLI à double triangle

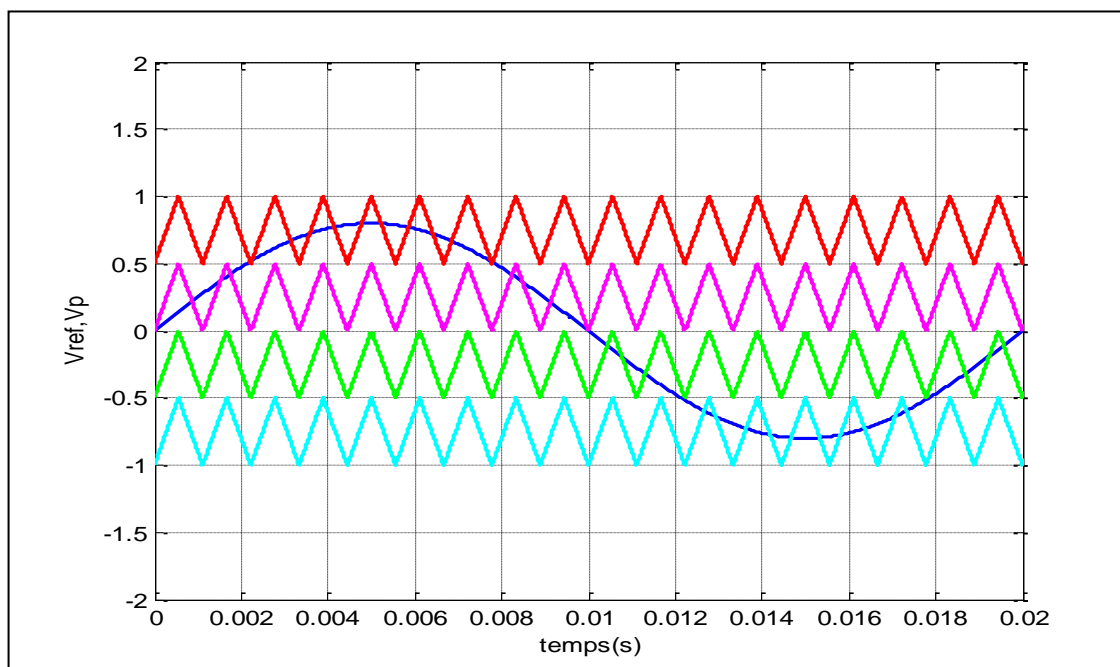


Figure (3.8) : Principe de la MLI à triangle multiple

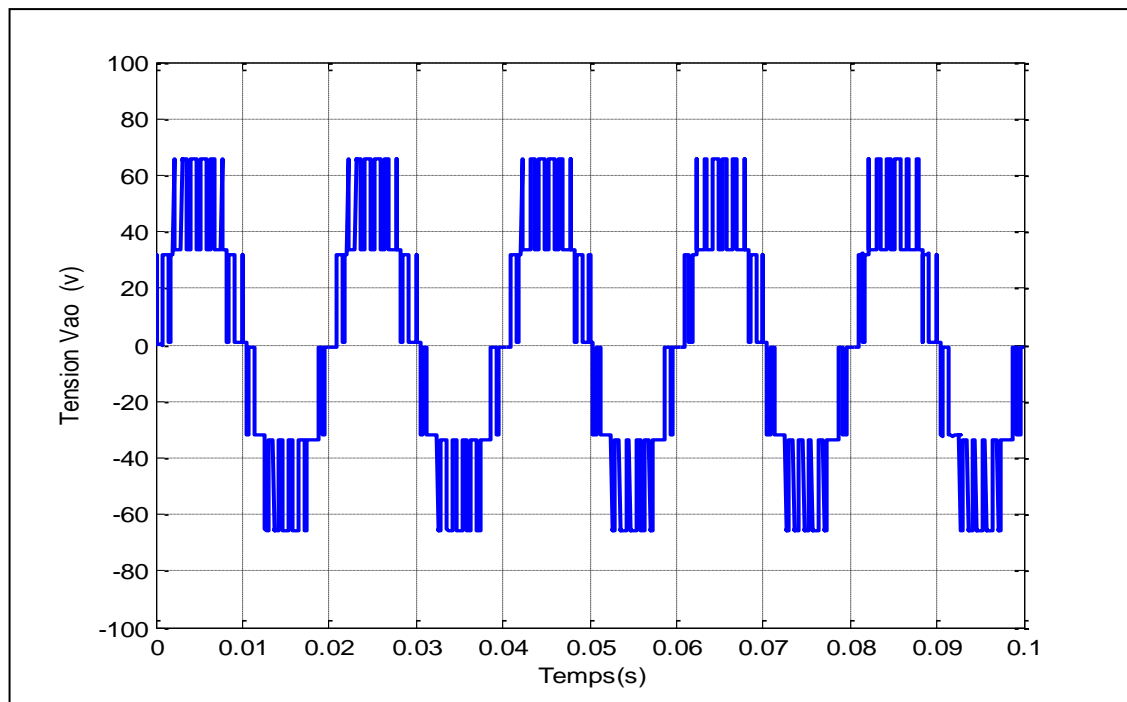


Figure (3.9) : Tension simple V_a de sortie de l'onduleur à cinq niveaux

III.5.Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation du convertisseur multi-niveaux (onduleur trois et cinq niveaux) de type NPC ainsi que la stratégie de commande adoptée, ce qui permet la simulation du système (générateur photovoltaïque, onduleur multiniveaux) qu'on va présenter dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV
SIMULATION DU GENERATEUR PV CONNECTE
AU RESAU ET INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, et afin de montrer le fonctionnement d'une source PV associée à un réseau électrique, une simulation des différents étages est réalisée. L'efficacité de la technique MLI multiple est analysée et la poursuite de la puissance maximale est aussi inspectée. De plus, comme notre générateur PV est relié au réseau domestique, cette interconnexion doit répondre aux exigences de cette action. La simulation est réalisée sous environnement MATLAB.

IV.2. Le générateur photovoltaïque « G PV »

IV.2.1. Module photovoltaïque

Dans ce travail nous avons simulé le module **STP 170S-24/Ab-1** qui comporte 72 cellules solaires de silicium monocristallin connectées en série.

Le module **STP 170S-24/Ab-1** peut produire une puissance maximale de 170 watts à 43.8 volts. Ceci nous a permis de déterminer la puissance et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairement de 1000 W/m² et une température T=25°.

Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque **STP 170S-24/Ab-1** en conditions de test standards sont représentées sur le tableau 4-1.

Grandeurs	Valeur
-Eclairement standard, E.	1000w/m ²
- Température standard, T.	25°
-Puissance crête maximale, P _m .	170W
- Tension optimal, V _m .	35.2
-Courant optimal, I _m .	4.83
- Tension de circuit ouvert, V _{co} .	43.8
- Courant de court-circuit, I _{cc} .	5.14

Tableau 4-1 Paramètres du module PV étudié

La figure ci-dessous présente le block du module photovoltaïque dans l'environnement SIMULINK.

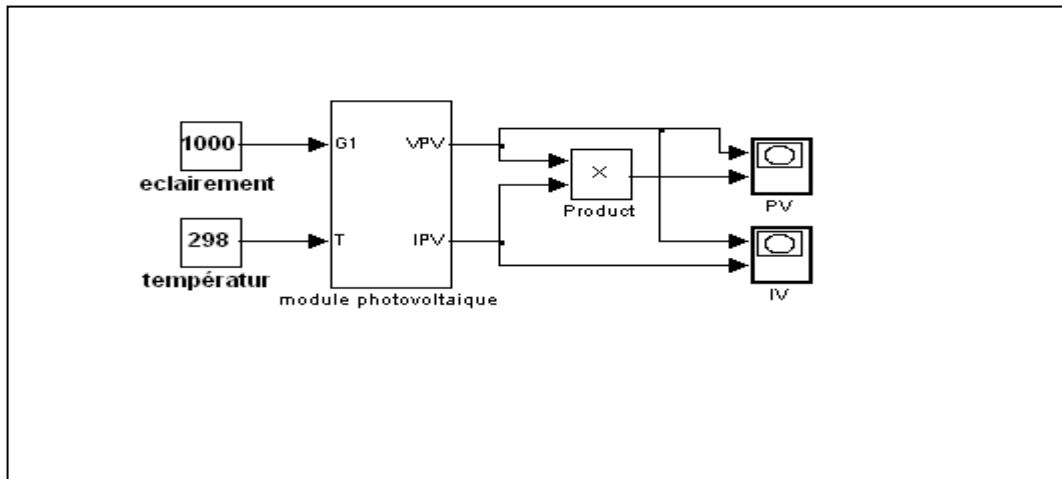
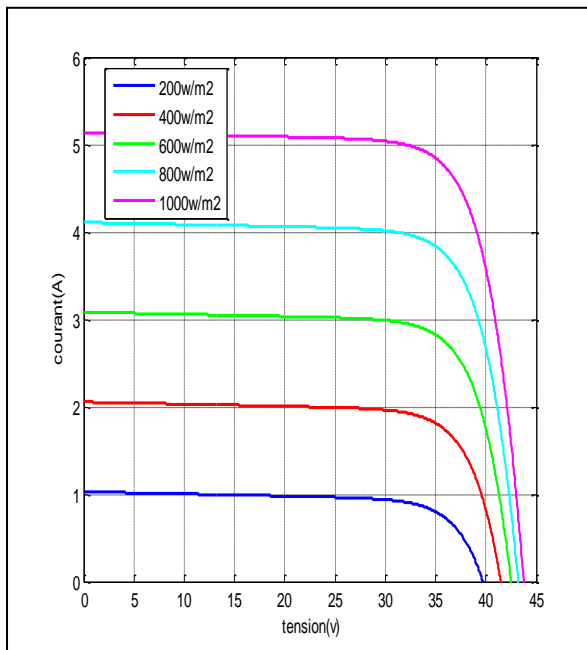
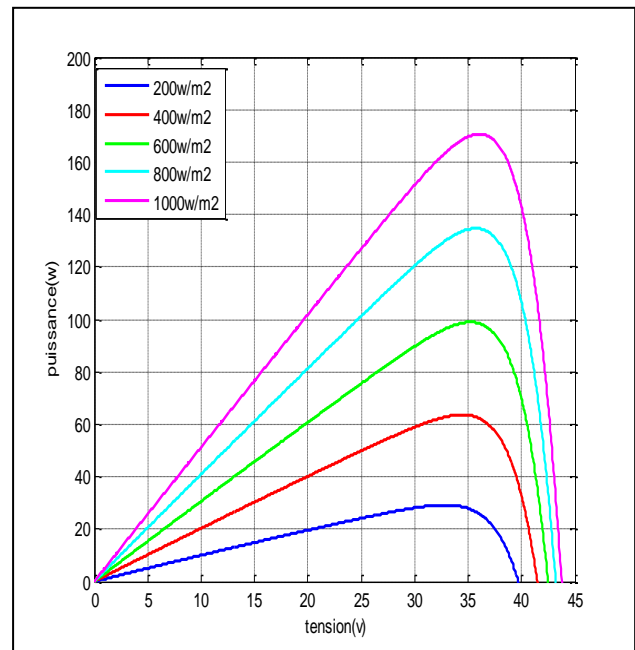


Figure (4.1): Block du module STP 17OS-24/Ab-1 dans SIMULINK.

Les figures (4.2) a et b montrent les caractéristiques électriques du module après simulation avec MATLAB / SIMULINK pour différentes valeurs d'éclairement et pour une température de 25°C.



a)



b)

Figure (4.2):a) Courbe I(V) du module, b) Courbe P(V) du module

IV.3.Simulation de l'onduleur trois niveaux

Pour réaliser les différentes simulations de l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC avec la stratégie de commande MLI, on représente d'abord sa structure générale donnée par la figure (4.3) schématisée par un schéma bloc développé dans l'environnement MATLAB.

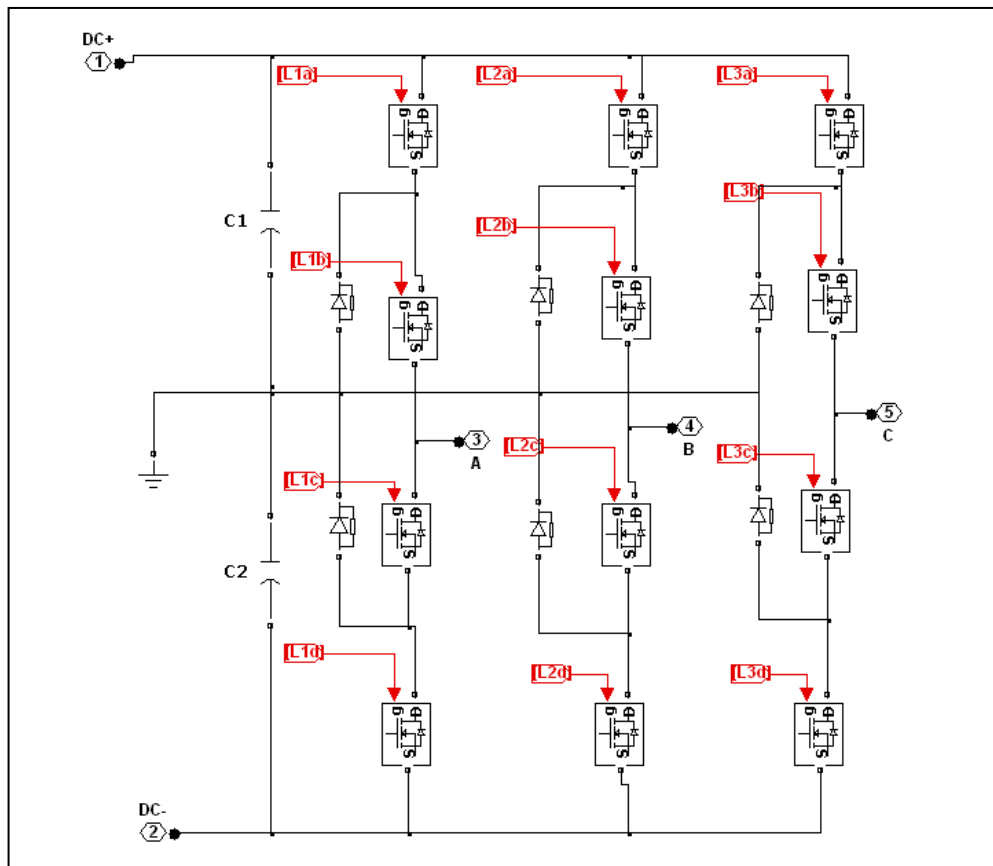


Figure (4.3) : Circuit de l'onduleur de tension trois niveaux

Le circuit globale à simulé est illustré dans la figure (4.4) ou l'onduleur considéré (soit 3 ou 5 niveaux) est alimenté par une source PV dont la tension de sortie est E . ($E=131V$). Les capacités $C1$ et $C2$ assurent la répartition équitable de cette tension entre les bras de l'onduleur. Autrement dit, les bras supérieurs et inférieurs sont soumis à une tension $E/2$ Chacun.

La sortie de l'onduleur est couplée au réseau domestique à travers un filtre passe-bas.

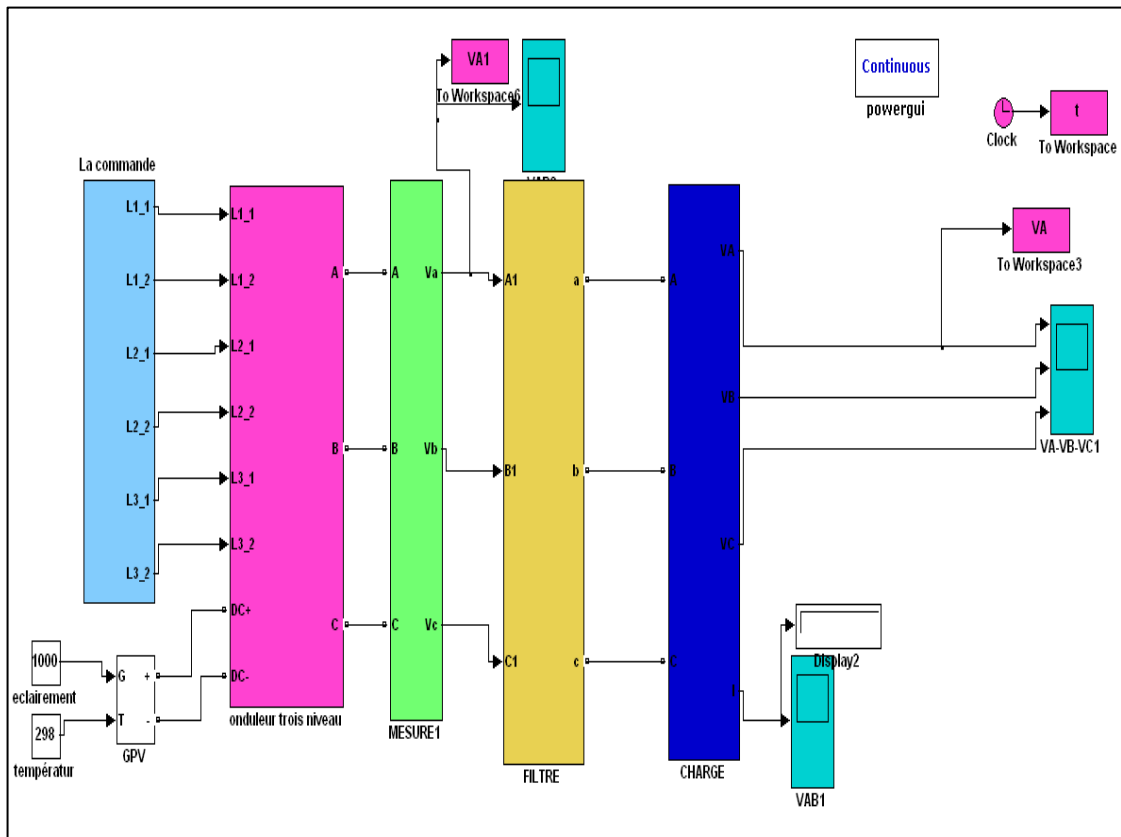


Figure (4.4) : Circuit de l'onduleur de tension trois niveaux dans le système photovoltaïque

Dans ce schéma, la commande de l'onduleur NPC à trois niveaux est assurée avec la technique MLI sinusoïdal multiniveaux avec la variation du taux de modulation d'Amplitude " m_a " et le rapport de fréquence " m_f ".

IV.3.1. Commande par modulation à double triangles

Cas 1 : fréquence de la porteuse $f=2250\text{HZ}$

Pour cette technique, deux porteuses (triangulaire) en phase et un signal de référence (sinusoïdale) sont utilisées pour générer la commande de chaque phase. Dans ce cas on fixe la fréquence de la porteuses à $f=2250\text{HZ}$ tout en variant le taux de modulation d'amplitude m_a .

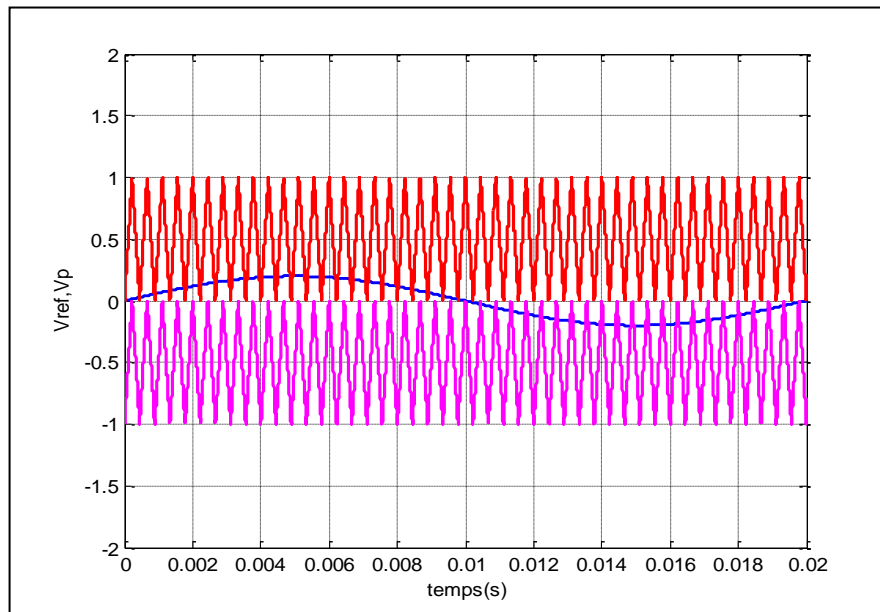


Figure (4.5): Signaux de références avec deux porteuses en phase $ma=0.2$

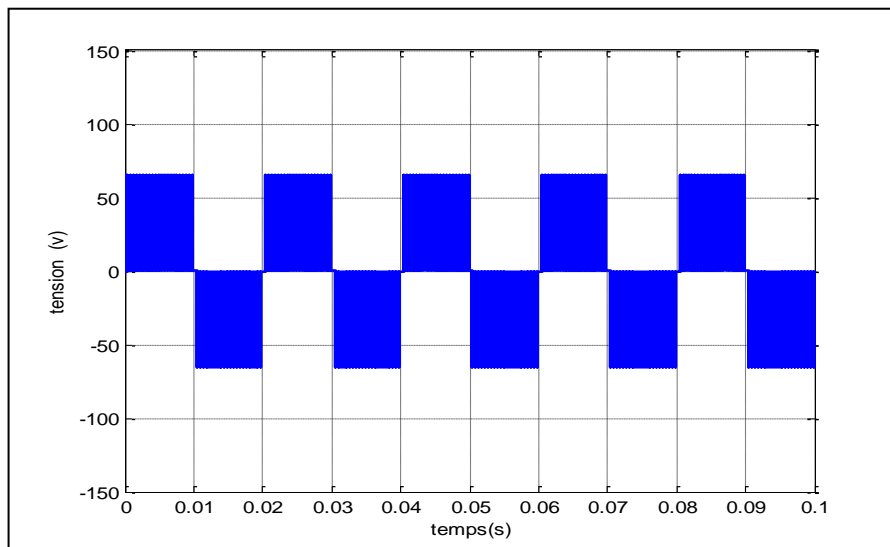
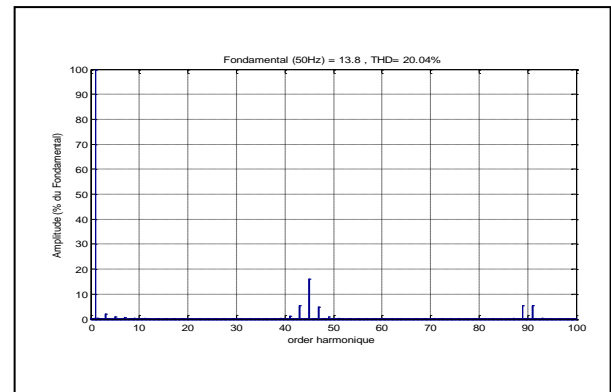
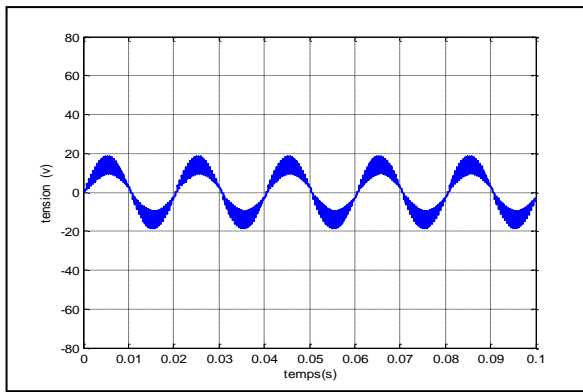
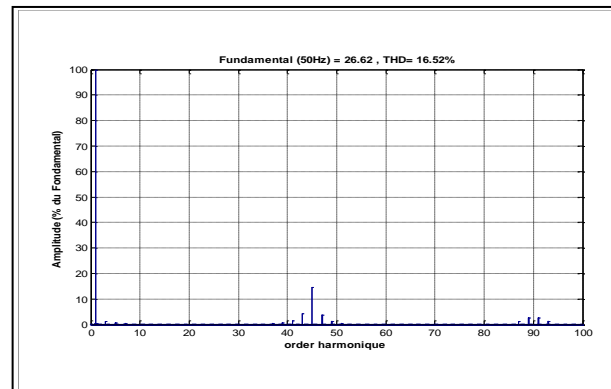
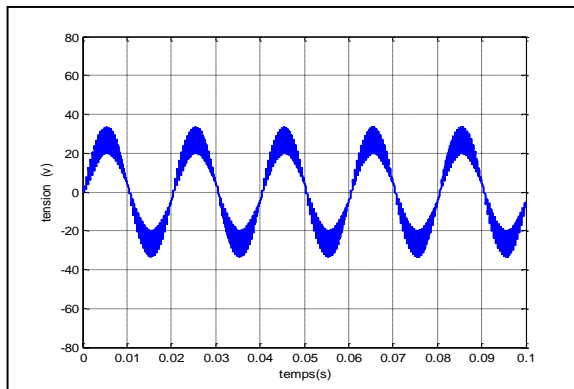


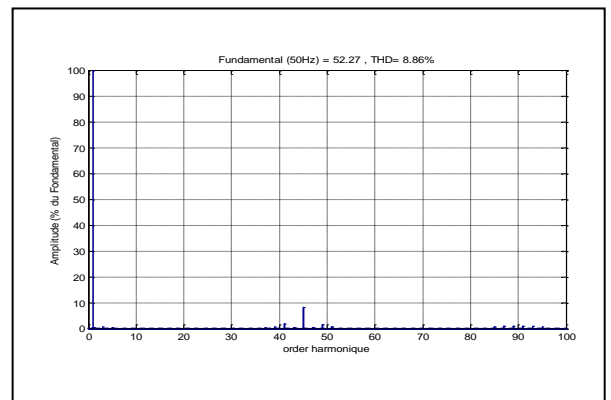
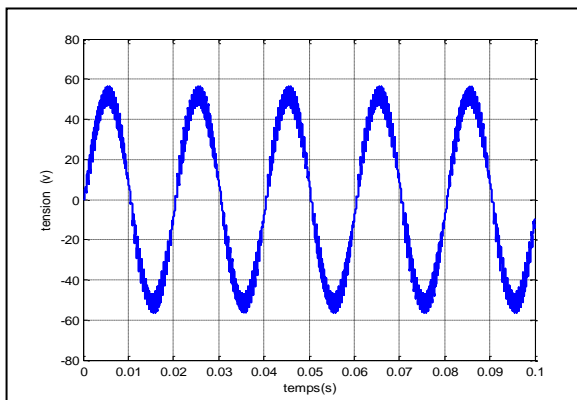
Figure (4.6): Tension simple de sortie de l'onduleur V_A



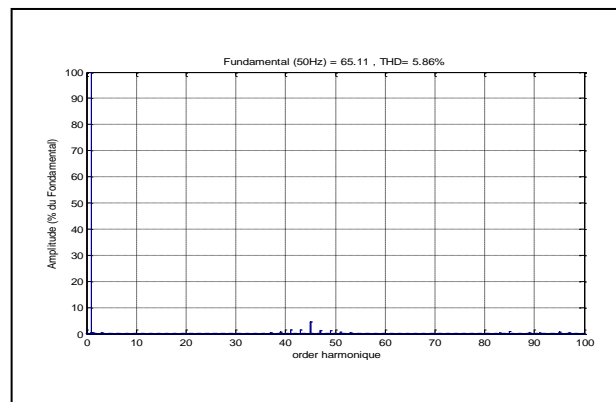
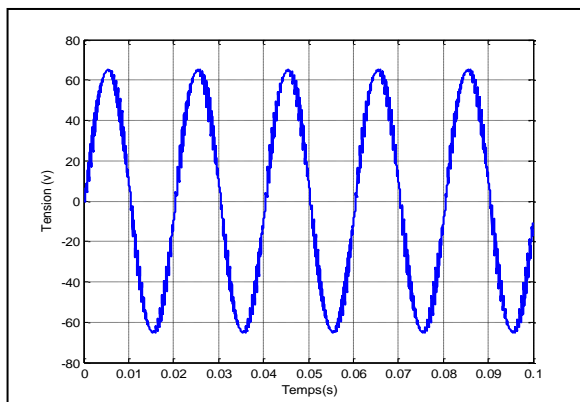
a : $m_a=0.2$



b : $m_a=0.4$



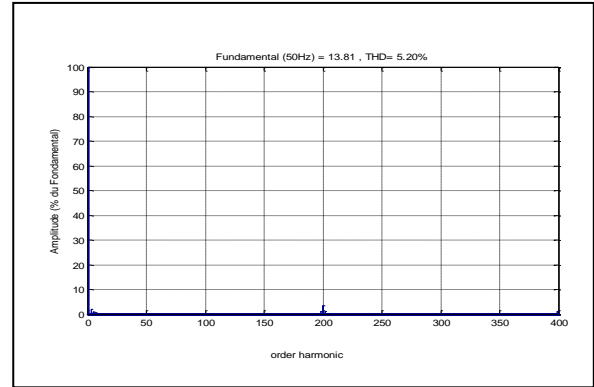
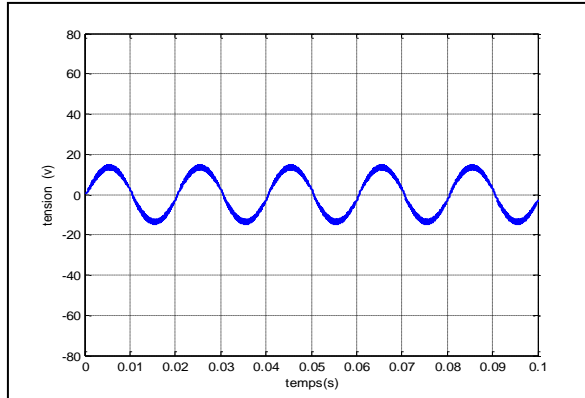
c : $m_a=0.8$



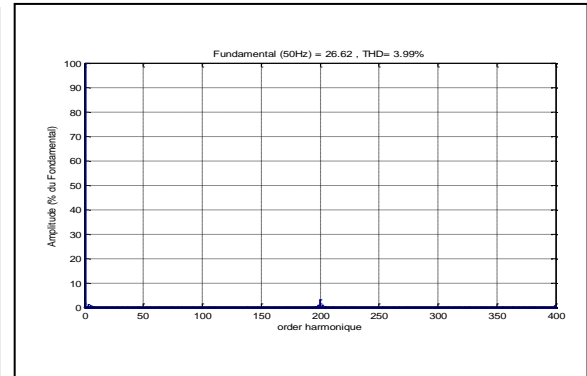
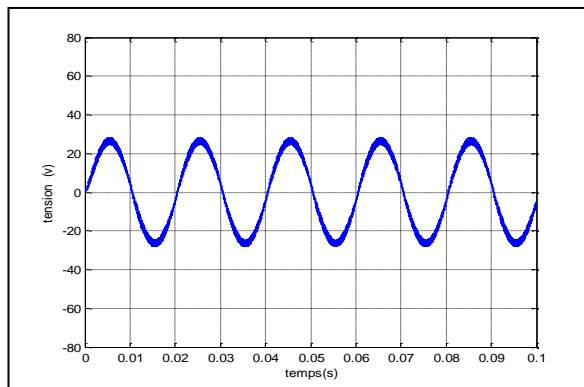
d : $m_a=1$

Figure (4.7): Tension V_A et le spectre correspondant pour $f_p=2250\text{HZ}$

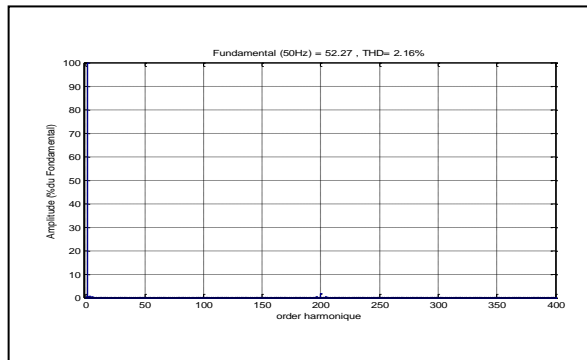
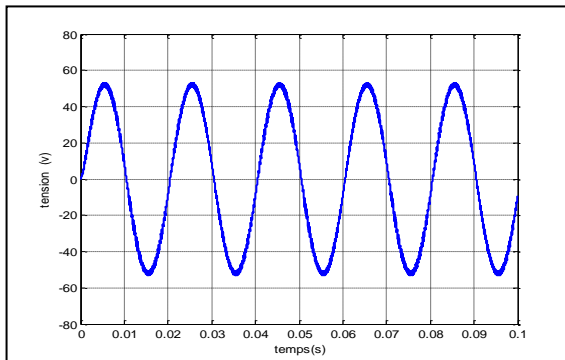
Cas 2: fréquence de porteuse $f=10\text{KHZ}$



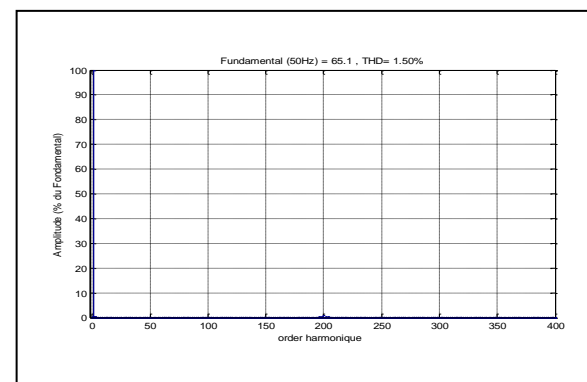
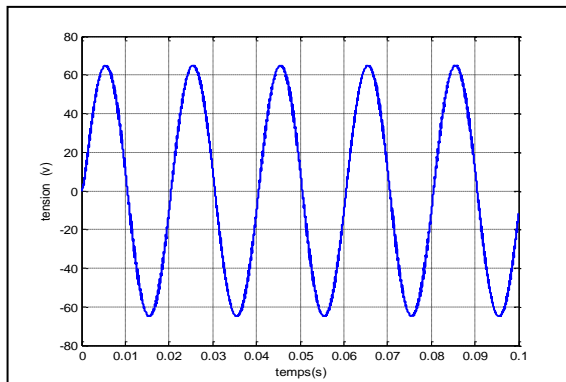
a : $m_a=0.2$



b : $m_a=0.4$



c : $m_a=0.8$



d : $m_a=1$

Figure (4.8): Tension V_A et le spectre correspondant pour $f_p=10\text{KHZ}$

IV.3.2. Interprétation des résultats

L'analyse rapide des courbes représentant la tension simple de sortie de l'onduleur et variation en fonction de la variation de la fréquence de la porteuse et la variation dans le taux de modulation d'amplitude, nous permet de tirer les remarques suivantes :

- On remarque qu'avec l'augmentation de l'amplitude de la tension, le taux d'harmonique diminue considérablement.
- Aussi, ce taux d'harmonique est liée directement au taux de modulation de fréquence m_f . L'augmentation de m_f nous permet de réduire systématiquement les harmoniques injectées au réseau.
- Selon l'analyse spectral en remarque que, pour la technique utilisé, les harmonique de la tension se regroupent en première famille centrée autour de $(m-1, m+1)$ et $(m-3, m+3)$ celle de la porteuse $f_p = m_f \times f_{ref}$ qui est la plus important du point du vue amplitude. La deuxième familles est centrée autour de $(2m-1, 2m+1)$ et $(2m-3, 2m+3)$ la fréquence $2mf$.
- L'amplitude de la tension de sortie est directement proportionnelle à la tension du bus continue de l'entrée.

IV.4.Simulation de l'onduleur à cinq niveaux

De même que précédemment, pour réaliser les différentes simulations de l'onduleur de tension à cinq niveaux de type NPC avec la stratégie de commande suggérée, on représente sa structure donnée par la figure (4.9) par un schéma bloc développé dans l'environnement Matlab.

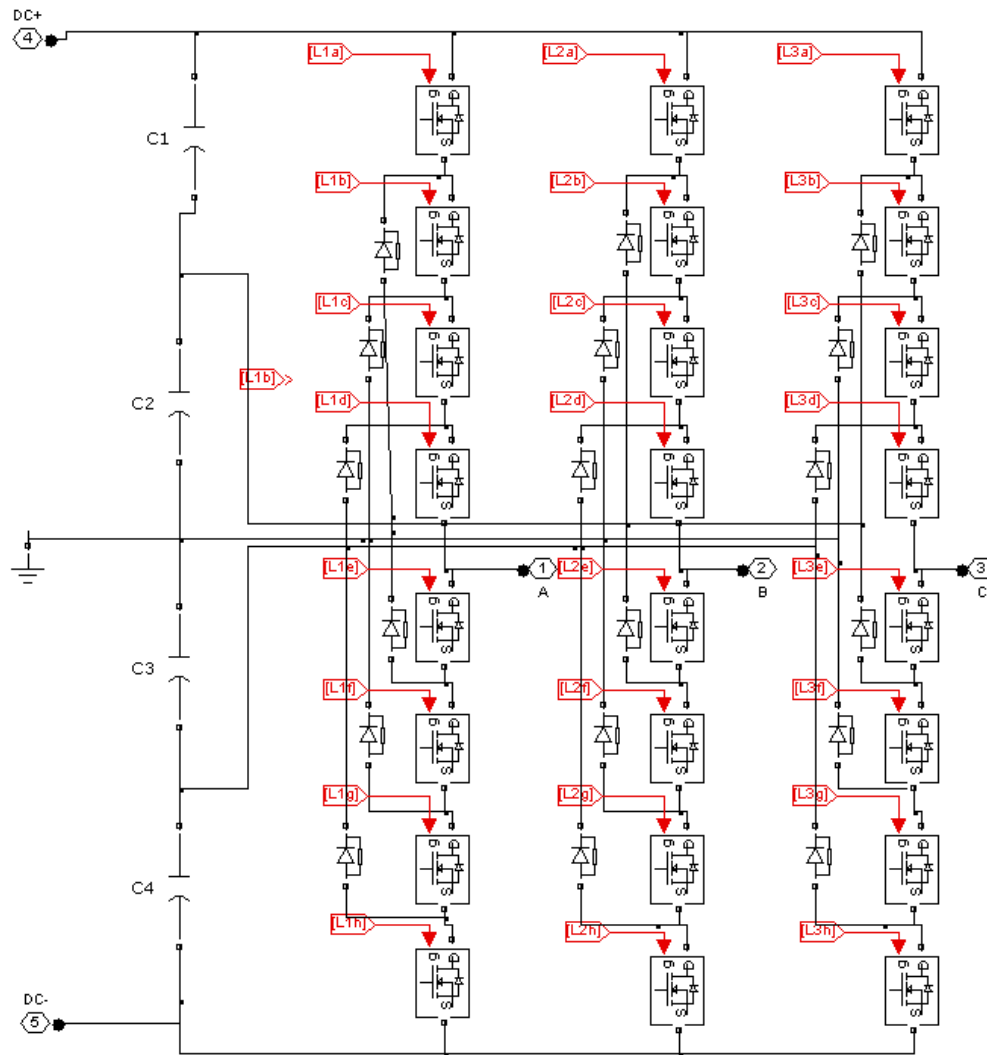


Figure (4.9) : Circuit de l'onduleur de tension à cinq niveaux

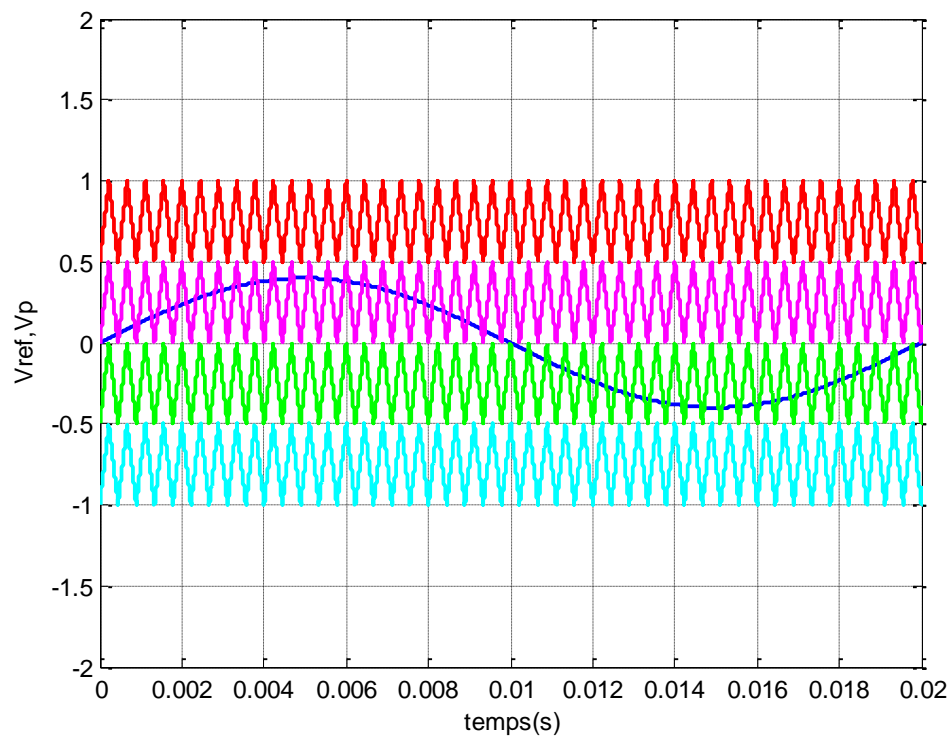


Figure (4.11): Signal de référence avec quatre porteuses en phase $ma=0.2$

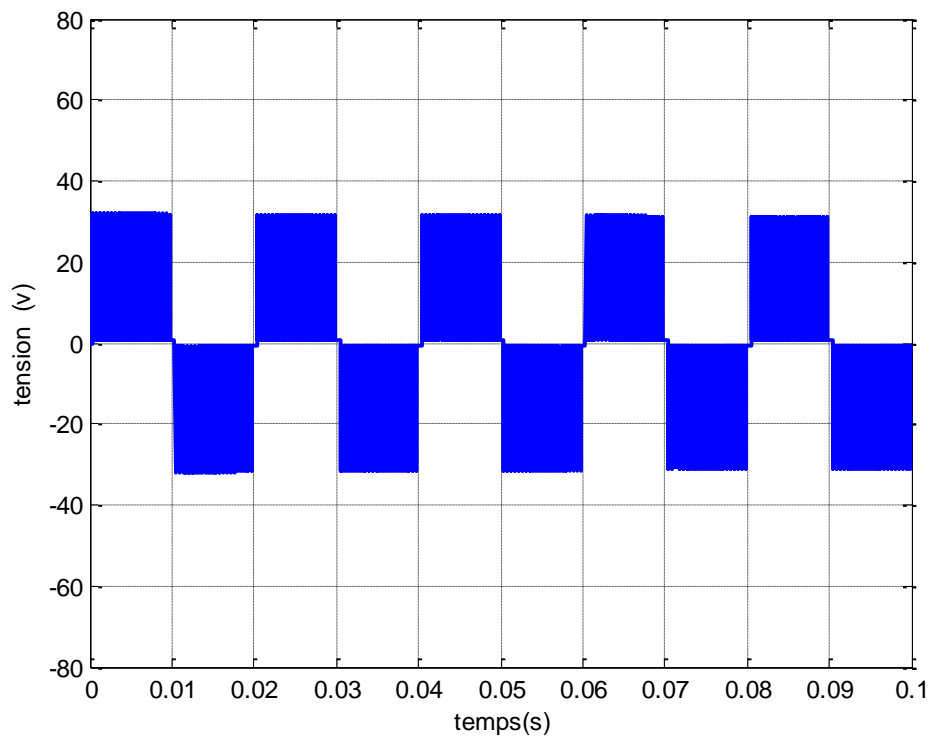
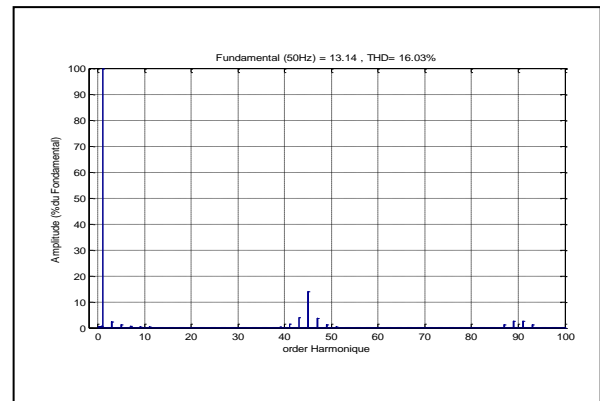
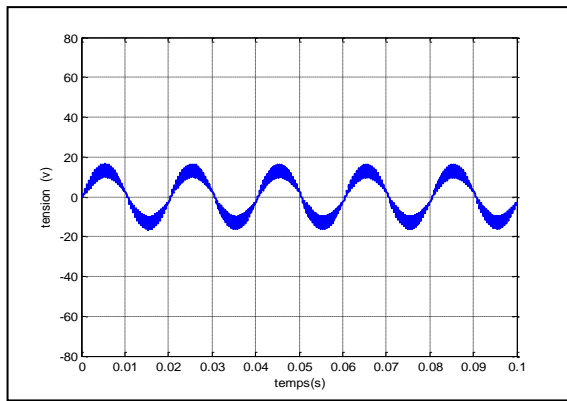
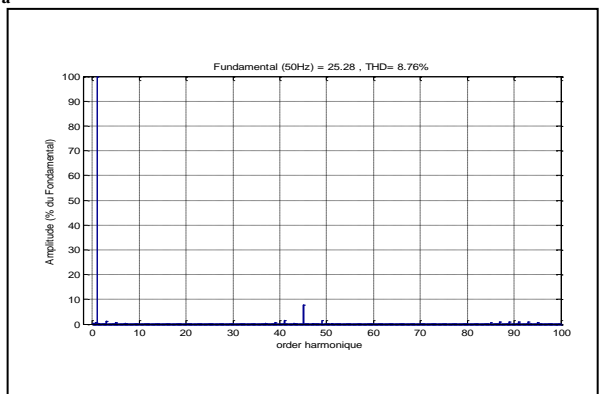
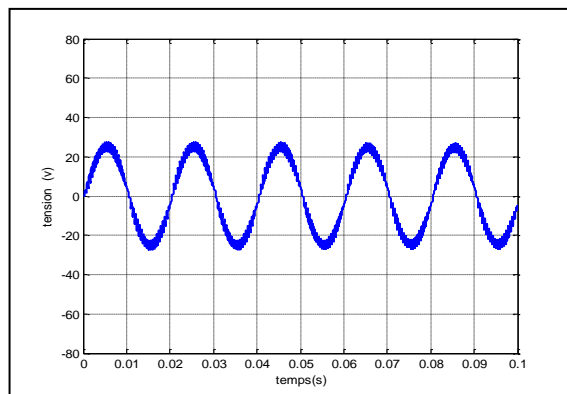


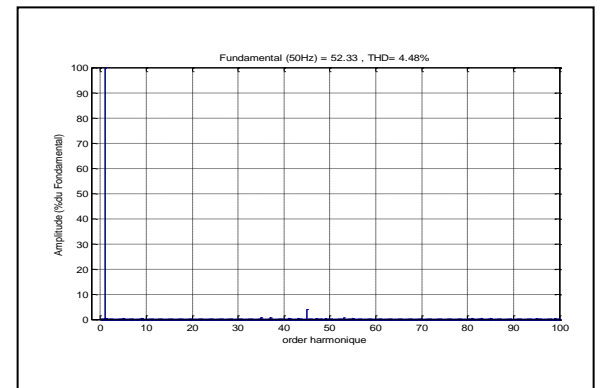
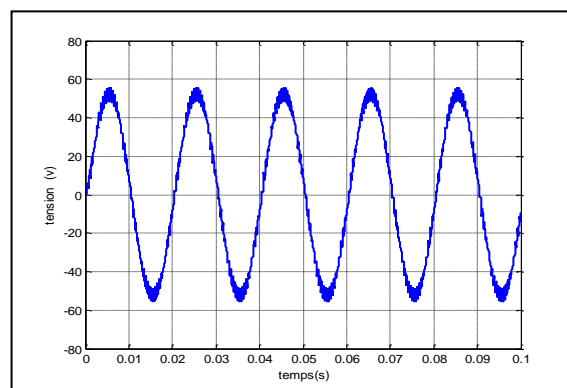
Figure (4.12): La tension simple de sortie de l'onduleur V_A



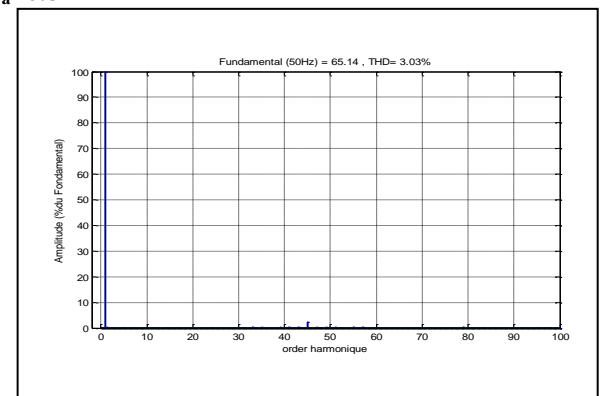
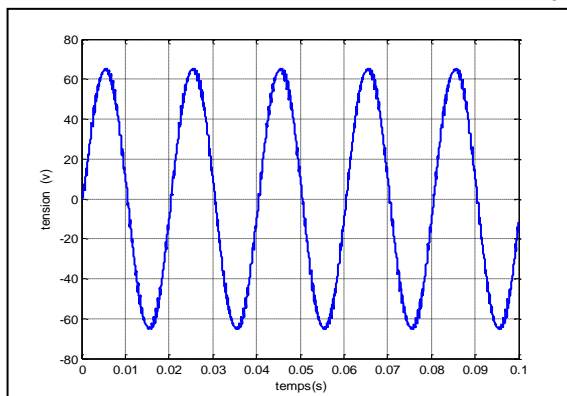
a : $m_a=0.2$



b : $m_a=0.4$



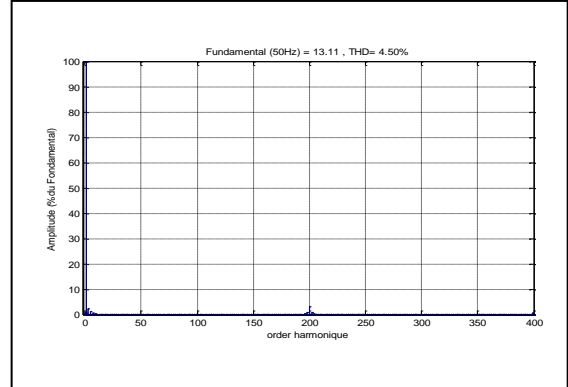
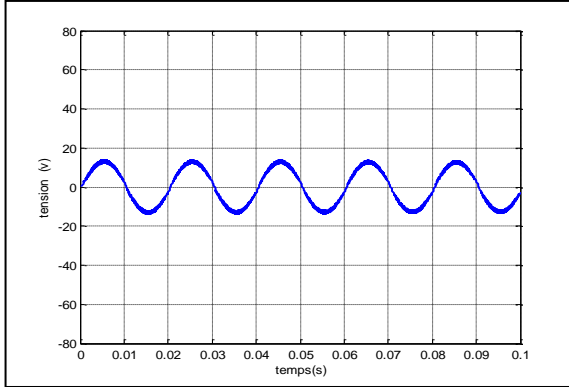
c : $m_a=0.8$



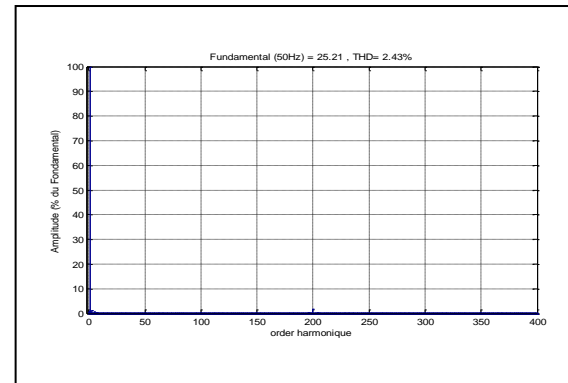
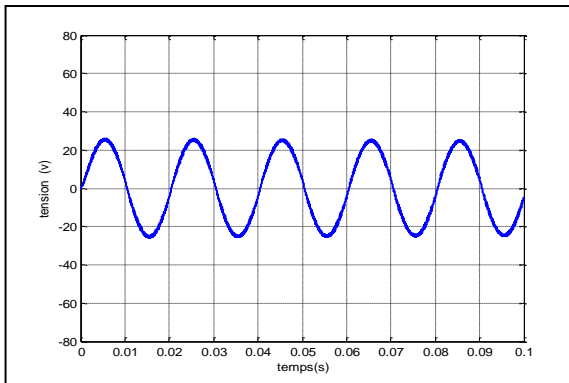
d : $m_a=1$

Figure (4.13): Tension V_A et le spectre correspondant pour $f_p = 2250\text{HZ}$

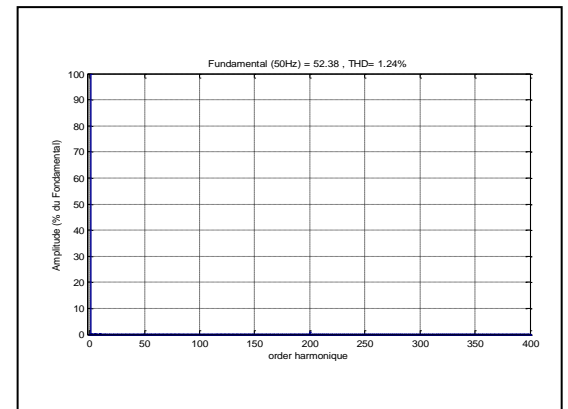
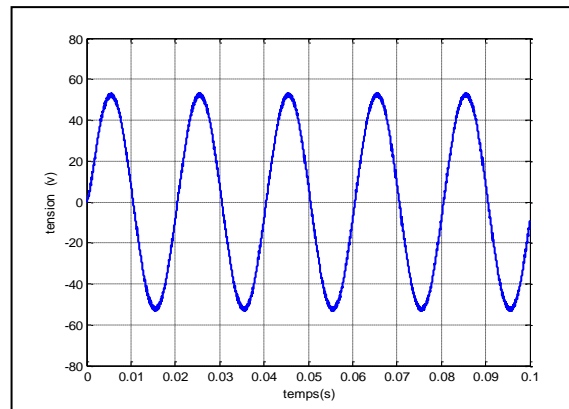
Cas 2: fréquence de porteuse $f=10\text{KHZ}$



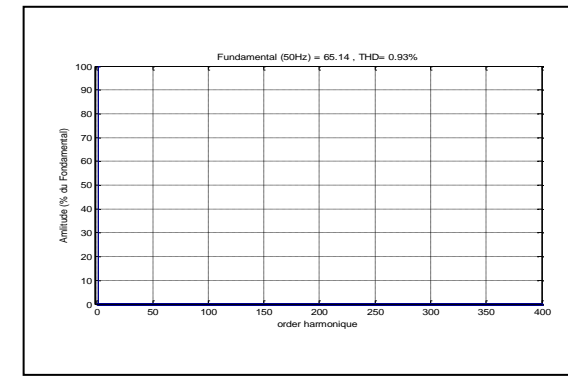
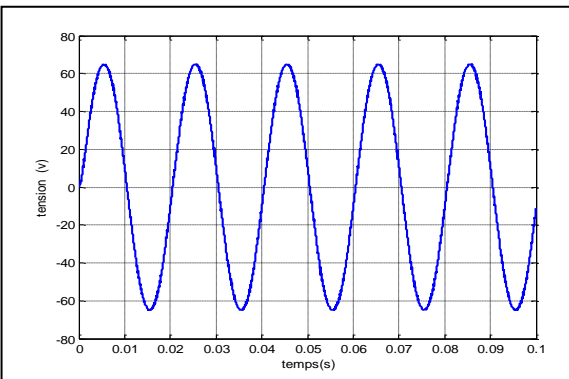
a : $m_a=0.2$



b : $m_a=0.4$



c : $m_a=0.8$



d : $m_a=1$

Figure (4.14): Tension V_A et le spectre correspondant pour $f_p=10\text{KHZ}$

Les résultats des figures 4.13 et 4.14 sont récapitulés dans la figure 4.15 qui illustre la variation du taux de distorsion totale d'harmonique (THD) en fonction de m_a selon la structure utilisée (3 ou 5niveau).

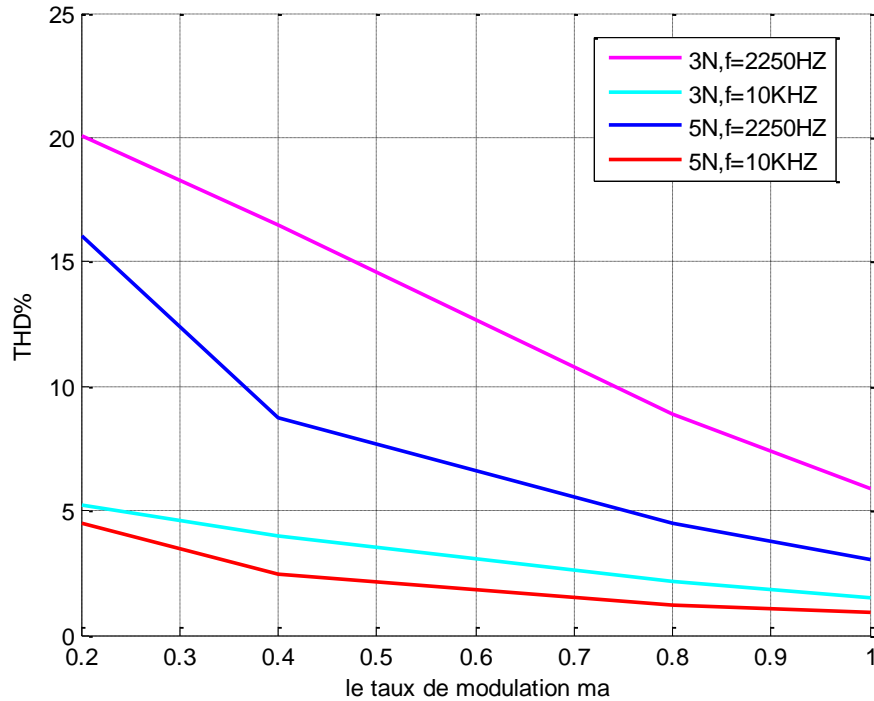


Figure (4.15) : Taux de distorsion total d'harmonique en fonction de m_a et m_f

IV.4.2. Interprétation des résultats

Les courbes précédentes montrent les résultats de simulation de l'onduleur NPC à trois et cinq niveaux pour chaque variation des indices de modulation d'amplitude m_a et de fréquence m_f .

On peut faire les constatations suivantes :

- La qualité de la tension de sortie s'améliore avec l'augmentation des indices m_a et m_f .
- Cette qualité est beaucoup plus influée par l'indice de modulation de fréquence m_f où on remarque que les résultats obtenus pour l'onduleur à trois et cinq niveaux ne sont pas trop différents pour une fréquence de 10 kHz.
- De l'analyse spectral de la tension simple V_A , on remarque que toutes les harmoniques sont très faibles et leurs amplitudes ne dépassent pas les 6% de la fondamentale.
- De plus, on remarque pour la technique utilisée, les harmoniques de la tension de sortie se regroupent en première famille centrée autour de $(m-1, m+1)$ et $(m-3, m+3)$ de celle de la porteuse f_p (égale à $m_f \cdot f_{ref}$), la plus importante du point de vue amplitude. La seconde famille est centrée autour de $(2m-1, 2m+1)$ et $(2m-3, 2m+3)$ la fréquence $2m_f$.

IV.5.Simulation de l'onduleur à cinq niveaux dans le système PV connecté au réseau

Dans cette partie on va entamer la simulation du système globale constitué de la source PV, L'MPPT, le convertisseur DC/AC et bien sûr une boucle de régulation pour assurer un fonctionnement adapté aux conditions du réseau. Dans cette étude on utilise un régulateur classique PI. Le schéma global de simulation sous MATLAB SIMULINK est donné par la figure (4.16), ci-dessous :

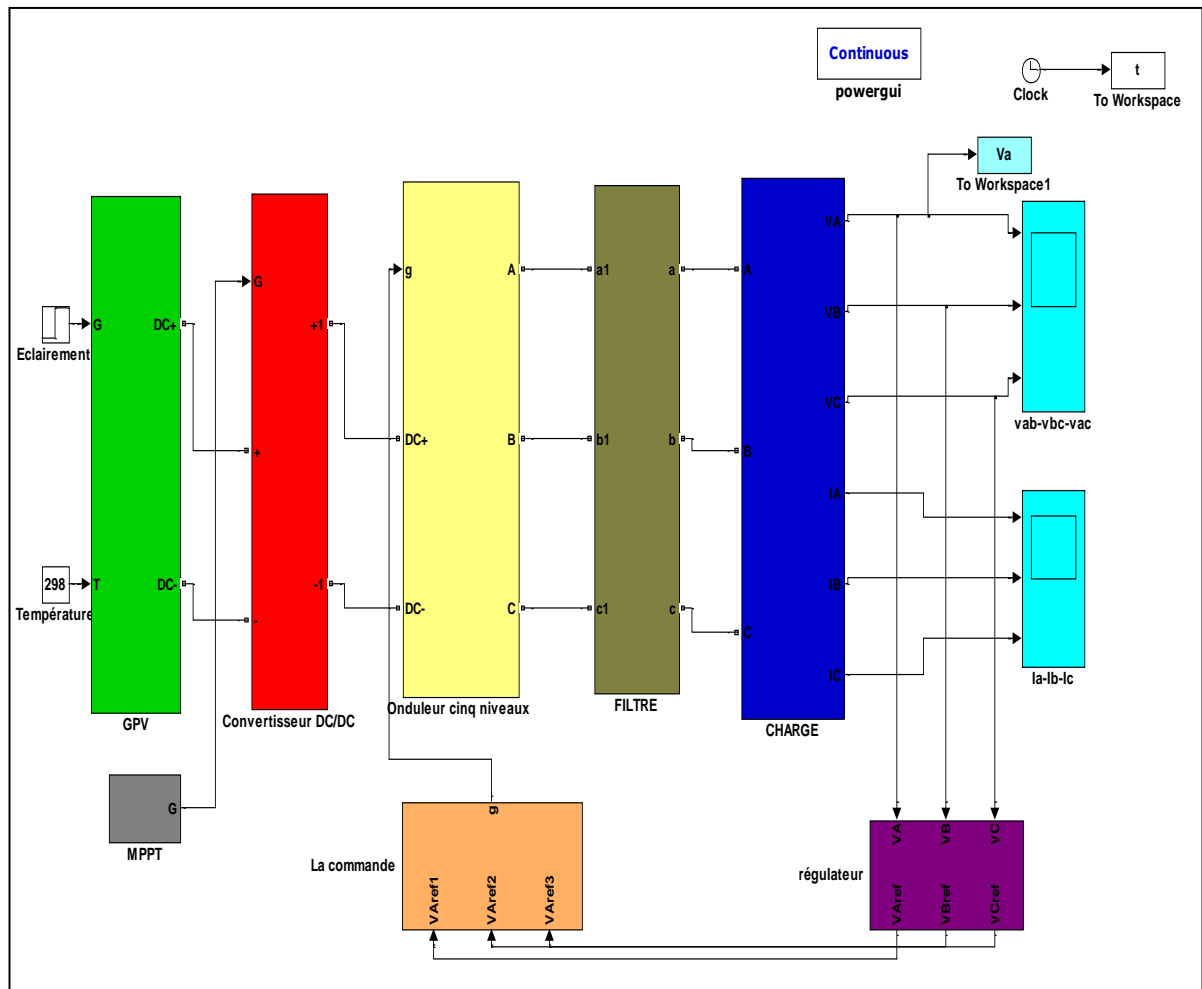


Figure (4.16):L'onduleur à cinq niveaux dans les systèmes PV connecté au réseau

1. Un générateur photovoltaïque

Notre générateur est formé 7 panneaux en série où chacun est constitué de 3 modules en série et 2 modules en parallèle dont on a étudié les performances précédemment (IV.3 et IV.4). Le nombre de panneaux est choisie afin d'assurer un fonctionnement optimal du système pour une puissance donné.

2. Convertisseur Dévolteur (DC/DC)

L'hacheur utilisé dans cette étude est celui dévolteur. Sous sa forme de base il est constitué des composants clés qui sont l'inductance (L), le commutateur (transistor), la diode (D) et le condensateur (C).

3. Convertisseur (DC/AC)

Le convertisseur utilisé dans ce cas est l'onduleur multiniveaux de type NPC à cinq niveaux, et la commande appliquée est celle sinusoïdale multi-triangulaire.

4. Le Filtre LC

Pour améliorer la qualité d'énergie injectée au réseau, un filtre basse bas s'avère nécessaire pour éliminer les harmoniques de découpage. Pour calculé les paramètres du filtre on adopte la méthodologie présenté par [39] ou la fréquence de résonance du filtre est fixée au dixième de celle de découpage. Ainsi on a:

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

$$\omega^2 = 2\pi f_c^2 \quad (4.2)$$

avec f_c : la fréquence de résonance.

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

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

F_d : fréquence de découpage.

Comme la fréquence de découpage est fixée à 1370Hz, donc on trouve :

$$L = 67.5 \text{ mH}$$

$$C = 20\mu\text{F}$$

5. Boucle de régulation de la tension de sortie.

Le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur exige une boucle d'asservissement fermée.

La tension V_A est mesuré puis comparé à une tension de référence $V_{ref} = 311\text{v}$ qui présente la valeur maximale de la tension simple du réseau. Le signal d'erreur issue du comparateur est injecté au régulateur PI ainsi utilisé. Les paramètres du régulateur sont choisis comme suite, [40] :

$$K_p = 0.1 \text{ et } K_i = 0.01.$$

Pour la simulation de système PV connecté au réseau et vérifié le bon fonctionnement de notre MPPT et régulateur de tension, on a utilisé le système à Cinque niveaux avec une perturbation sur l'éclairement de $E=200\text{w/m}^2$ à 800w/m^2 .

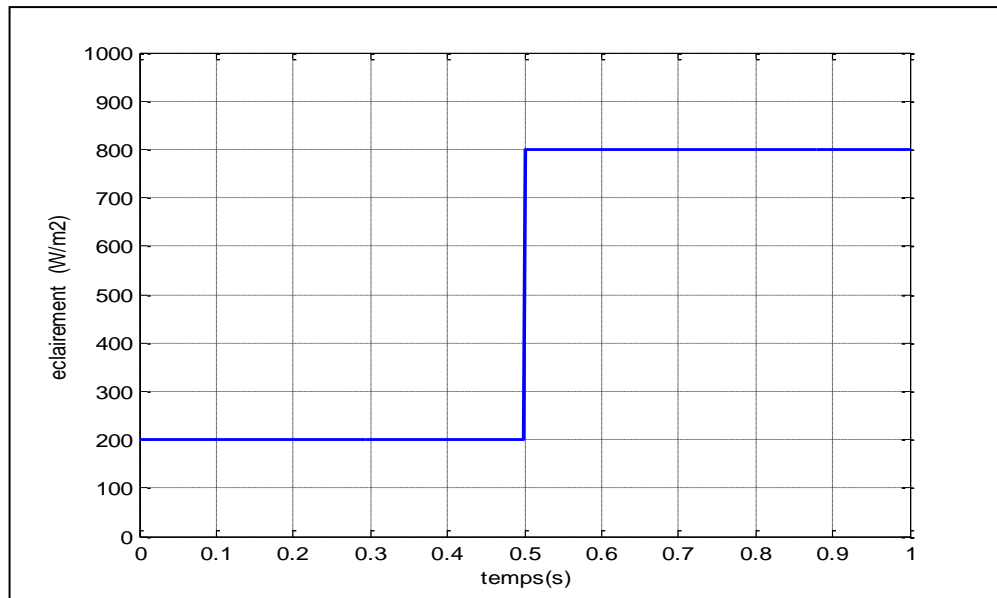


Figure (4.17): La variation de l'éclairement

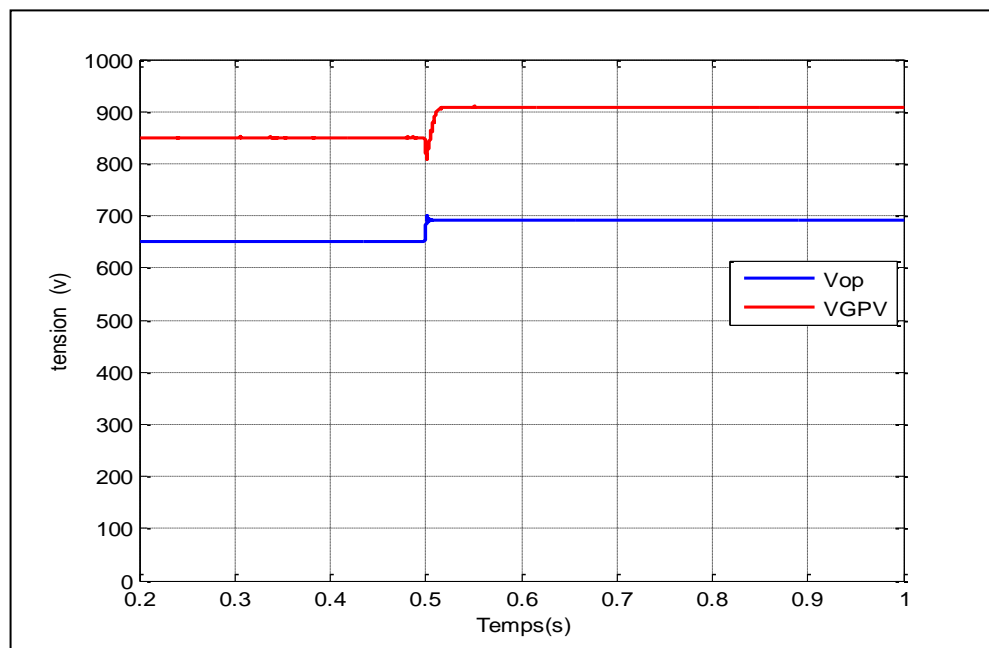


Figure (4.18): La tension du générateur PV et la tension optimisée en fonction de la variation de l'éclairement

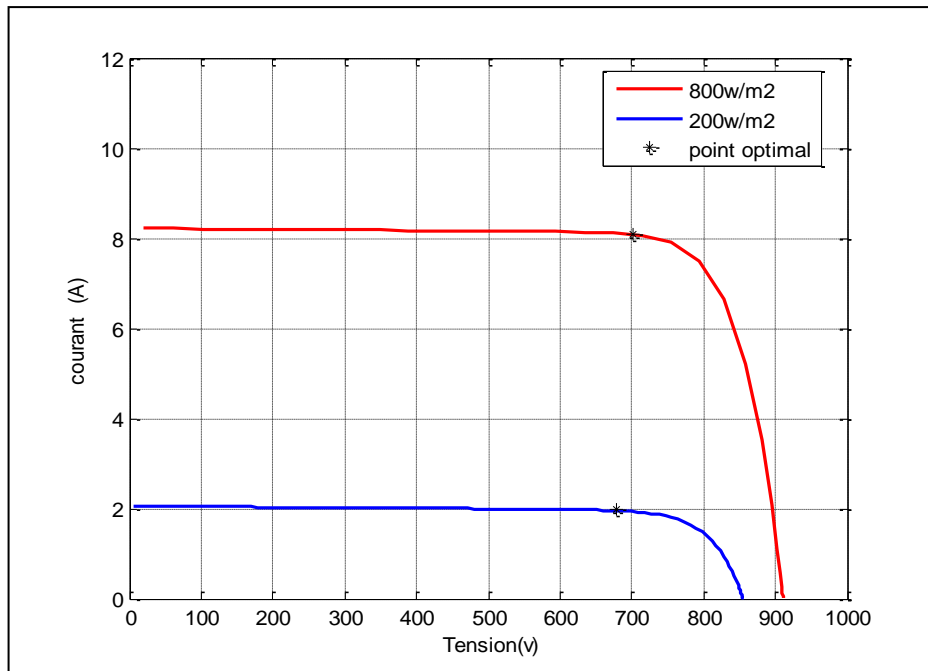


Figure (4.19): Point de fonctionnement optimal sur la Courbe courant tension en fonction de la variation de l'éclairement

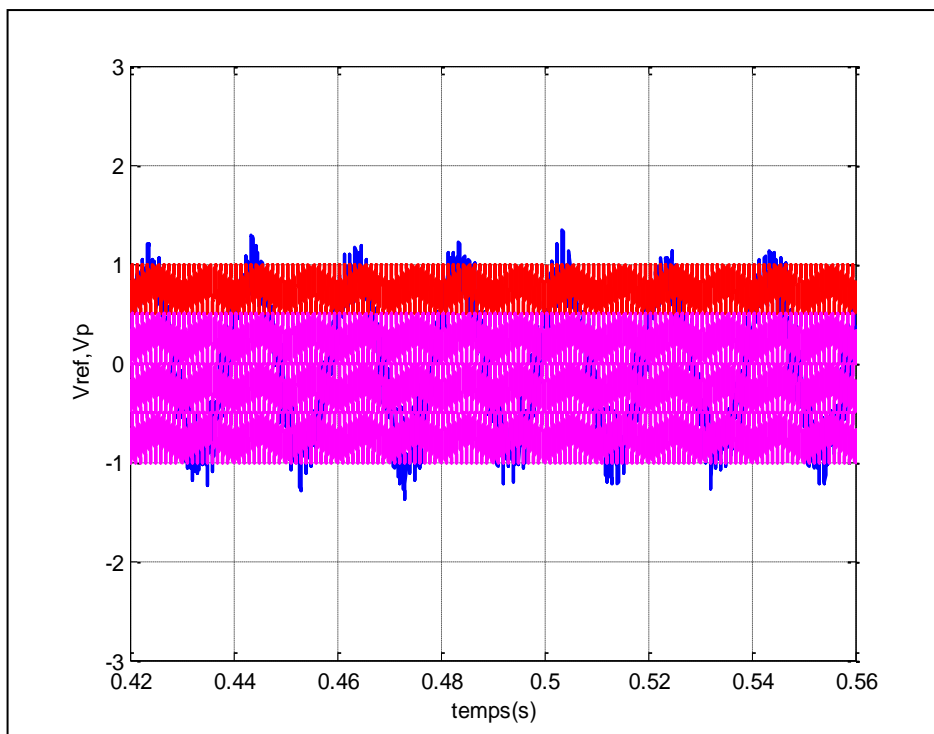


Figure (4.20): Signal de référence avec quatre porteuses en phase

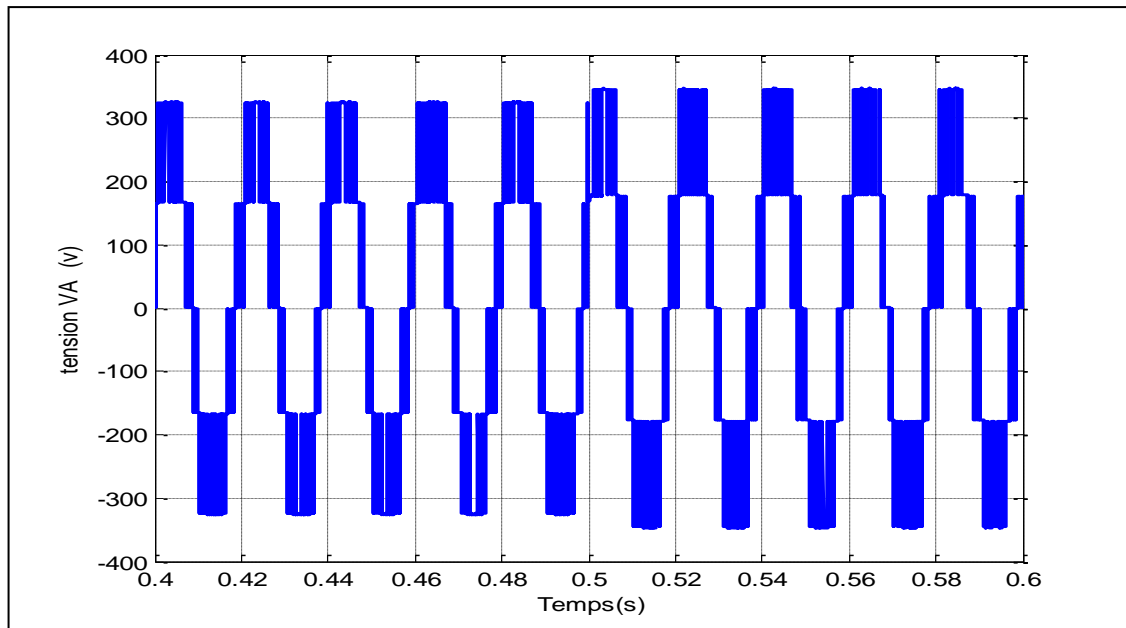


Figure (4.21): La tension de sortie simple V_A de l'onduleur.

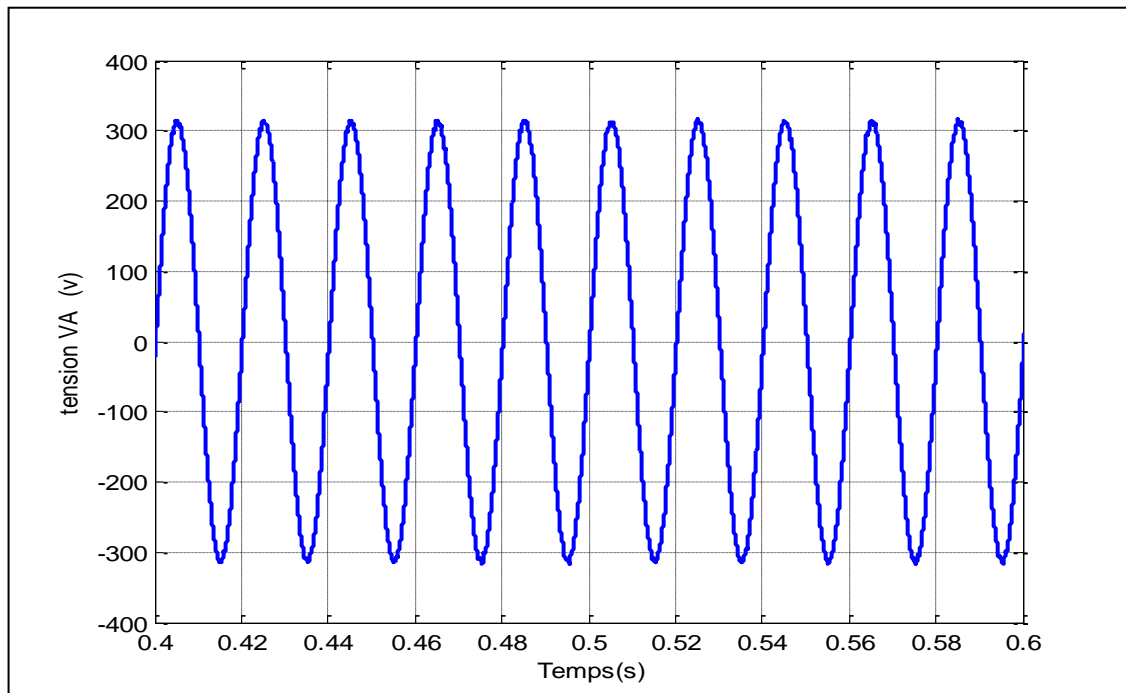


Figure (4.22): La tension de sortie simple V_A de l'onduleur après le filtre.

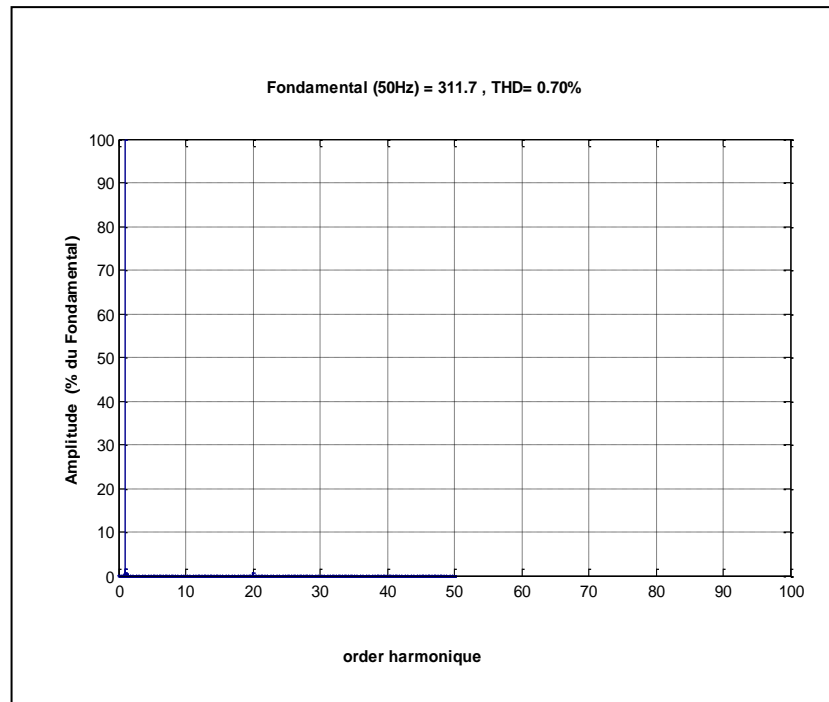


Figure (4.23): Spectre de la tension V_A de l'onduleur à cinq niveaux

IV.5.6. Interprétation des résultats

Après la simulation du système globale et afin de vérifier l'efficacité du module MPPT et celui de régulation de tension de sortie, une perturbation sur l'éclairage est ainsi admise.

Les résultats montrent la poursuite du point de fonctionnement optimale lors de la perturbation malgré que la technique utilisée est très classique. De plus après la perturbation, et la variation de la tension de sortie (optimale) qui s'en suit, le régulateur de tension réajuste l'indice de modulation de tension ma pour garder l'amplitude de la tension de sortie (tension fondamentale) constante. Il faut rappeler que le system de régulation est insensible aux variations de fréquence du réseau (on suppose que la fréquence du réseau est maintenue constante dans notre cas).

On remarque que la tension, selon son allure et son analyse spectrale, est de bonne qualité et Le taux d'harmonique de la tension est faible, les harmoniques sont tous pratiquement négligeables par rapport à la fondamental.

Le module MPPT assure le fonctionnement à puissance optimale, et le régulateur PI à assurer une tension de sortie à amplitude constante pour répondre aux exigences d'interconnexion d'une source a un réseau électrique.

On remarque que lors de l'augmentation de l'éclairement, l'amplitude de la tension du bus continue d'augmenter d'où l'augmentation de l'amplitude de niveau de tension à la sortie de l'onduleur. Pour maintenir l'amplitude de la fondamentale constante (après le filtre), le régulateur PI réajuste l'indice m_a .

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé les stratégies de commande MLI de l'onduleur de tension à trois et cinq niveaux. L'étude des caractéristiques de la tension de sortie de l'onduleur pour la stratégie définie dans ce chapitre, a montré qu'elle présente un taux d'harmoniques faible. L'augmentation du rapport de fréquence " m_f ", repousse les harmoniques de tension vers des ordres élevés ce qui facilite leur élimination. Mais cette augmentation cause bien sûr une augmentation des pertes de commutation et impose l'utilisation des interrupteurs statique de haute fiabilité (rapidité).

Les résultats montrent aussi que l'utilisation d'un onduleur à trois niveaux associé à une commande MLI avec $m_f=200$ donne des résultats presque semblable à ceux d'un onduleur cinq niveaux associé à une commande MLI avec $m_f=45$.

Donc on peut conclure qu'un compromis entre le nombre d'étage à utiliser et la fréquence de commutation des interrupteurs devrait être fait.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude des onduleurs multiniveaux dans le système photovoltaïque connecté aux réseaux électriques.

Ce mémoire est consacré à l'élaboration d'un système photovoltaïque connecté au réseau. Il consiste à choisir une configuration convenable d'onduleur NPC qui sera connecté au réseau tout en assurant un fonctionnement optimal de la source PV. Une boucle de régulation est aussi introduite pour répondre aux questions d'interconnexion.

En première partie, nous avons étudié le principe du système photovoltaïque où on a présenté le modèle des différents éléments constitutif (module, générateur,) ainsi que les différents types de central solaire.

En deuxième partie, nous avons brièvement présenté les différentes configuration de convertisseurs de puissance à noter ceux multiniveaux ainsi que les techniques d'optimisation de puissance des générateurs PV. ou on a opter pour notre étude pour le convertisseur à 5 niveaux associée à la technique MPPT à tension constante.

Dans la troisième partie, nous avons représenté le principe de fonctionnement des onduleurs NPC à trois et cinq niveaux associé à la commande triangle sinusoïdal à n porteuses.

Dans le quatrième chapitre, on a présenté la simulation sous Matlab/Simulink de l'ensemble « générateur PV, convertisseurs, MPPT et boucle de régulation » où on fait une étude comparative entre la qualité d'onde issue des deux type de convertisseurs, à savoir à 3 et 5 niveaux. L'étude spectrale a montré la supériorité du convertisseur à 5 niveaux. Néanmoins, on a montré aussi que l'augmentation de la fréquence de commutation peut engendrer des ondes de tension acceptable avec un onduleur 3 niveaux. Bien sûr, le compromis doit être joué entre la complexité de la configuration du convertisseur de puissance et la commande qui lui est associée.

En perspective, on compte d'améliorer le comportement des différents bloc; à savoir:

-Convertisseur DC/DC: -possibilité d'utilisation d'un convertisseur
dévolteur/survolteur

-utilisation des techniques de commande intelligente

-Convertisseur DC/AC: -Inspection des nouvelles topologies

- Utilisation des technique MLI avancées

- implémentation de boucle de régulation de tension

plus consistante

Simulation -simulé les conditions de fonctionnement « réelle» (déséquilibre, fluctuation de la fréquence etc)

Possibilité d'implémentation pratique en utilisant la carte D Space.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] : J. Royer, T.djiako, E.schiller, B. Sada, «Le pompage photovoltaïque», Institut de l'Energie Des Pays Francophone ,1998.
- [2] : A. Lobouret, M. Viloz, «Energie solaire photovoltaïque», Edition Dunod, 2006.
- [3] : M. Messoude, «Etude et optimisation d'un model de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage », Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2006.
- [4] : A.T. Singo, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat, Université d'Henri Poincaré, Nancy, 2010.
- [5] : B. Fléche, D. delagnes, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007.
- [6] : Y. Pankow, «Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension .application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Centre Nationale de Recherche Technologique de Lille, 2004.
- [7] : S. Brigand, «principe du photovoltaïque », complément technique 2008, www.Editionsdumoniteur.com.
- [8]: W. Omran, «Performance analysis of grid connected photovoltaic systems», Thèse de Doctorat, Université de Waterloo, 2010.
- [9] : Y. Riffonneau, «Gestion des flux énergétique dans un système photovoltaïque avec stockage connecte au réseau », Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, 2009.
- [10] : K. Merabet, « Commande MLI d'un onduleur triphasé Basé sur la dispersion de la tension triphasé », Mémoire de la Maitrise en Génie Electrique, Université du Québec, 2011.
- [11] : A. Kabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, S. Moussa et M. R. Benhaddadi, «Optimisation d'un système hybride (éolien –photovoltaïque) totalement autonome», Revue de Energies Renouvelables vol. 9, N°3, 2006, pp : 199-209.
- [12] : S. Belakehal, «Conception & commande des machines à aimant permanents dédiées aux énergies renouvelables», Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Constantine, 2010.

- [13] : Y. Riffonneau, F. Barrule et S. Bacha, «Problématique du stockage associé aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau », *Revue des Energies Renouvelables* vol.11, N°3, 2008, pp : 407-422.
- [14]: C. Cédric, «Optimization énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque», Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [15] : S. Abada, «Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic », Mémoire de Doctorat, Université Laval Québec, 2011.
- [16] : D. Mohamed Salah, «Etude comparative des redresseurs cascades et multiniveaux a commande MLI », Mémoire de Magister, Université Constantine, 2005.
- [17] : R. Aziza, «Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation alimentée par un convertisseur multiniveaux », Mémoire de Magister Université de Boumerdes, 2008.
- [18] : A. Benaboud, «Convertisseur de fréquence indirect à rapport de tension fixe : Interface entre turbo-alternateurs à haut vitesse et réseau électrique», Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [19]: L. Augusto Serpa, «Current control strategies for multilevel grid connected inverters», Thèse de Doctorat, Institut de Technologie Zurich, 2007.
- [20] : A. Lyes, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque», Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [21]: T. Cunnyngam, «Cascade multilevel inverters for large hybride-Electric vehicle applications with varaint DC sources », Thèse de Master, Université de Tennessee, 2011.
- [22] : Y. Khadidja, «Réduction des effets de tension homopolaire dans les associations onduleurs multiniveaux moteur à induction», Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [23] : B. Ouahid, «Contribution à l'analyse des onduleurs multiniveaux», Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [24]: D. Ostojic, «A multilevel conveter structure for grid connected PV plants», Thèse de Doctorat, Université Bologna, 2010.

- [25]: G. R. Walker, «Modulation and control of multilevel converters», Thèse de Doctorat, Université de Queensland, 1999.
- [26]: K. Jeremy McKenzie, «Eliminating harmonics in a cascaded H-bridges multilevel inverter using resultant theory, symmetric polynomials, and power sums», Thèse de Master, Université Tennessee, 2004.
- [27]: H. Liu, «Design and application of hybrid multilevel inverter for voltage boost», Thèse de Doctorat, Université de Tennessee, 2009.
- [28] : R. Taleb, A. Meroufel, P. Wira , «Commande par la stratégie d'élimination d'harmoniques d'un onduleur multiniveau asymétrique à structure cascade», Medimira Science Publisher, 2008.
- [29]: E. Ozdemir, S. Ozdemir, L. M. Tolbert, B. Ozpineci, «Fundamental frequency modulated multilevel inverter for three-phase stand-alone photovoltaic application», IEEE 2008, pp:978-4244-1874.
- [30]: J. Rodriguez, J. Sheng lai, F. Zheng peng, «Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications», IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 49, N°4, Aout 2002.
- [31] : Y. Sahali, M. K. Fellah, «Technique de modulation à sélection d'harmonique à Eliminer (SHEPWM) pour la commande des onduleurs de tension trois niveaux monophasé et triphasés», Intelligent Control and Electrical Power Systems Laboratory ICEPS, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2003
- [32] : A. Sadek, «Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien», Mémoire de Magistère, Université de Batna, 2009.
- [33] : B. Mohammed, «Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome», Mémoire de Magistère, Université de Bechar, 2008.
- [34] : F. Z. Zerhoni, M. H. Zerhoni, M. Zegrar et A. B. Stambouli, «Recherche du maximum de puissance d'un générateur photovoltaïque», Mediamira Science Publisher, 2012.
- [35]: V. A. Chandhari, «Automatic peak power tracker for solar PV modules using DSPACE software », Thèse de Master, Université de Deemed, 2005.

- [36] : B. Hacene. Omar, «Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique», Thèse de Magistère, Université de Tlemcen, 2011.
- [37] : K. Lamia, «Etude la protection thermique et UV des cellules photovoltaïque par un dépôt des fibres kératiniques afin d'améliorer leurs rendements », Mémoire de Magistère, Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [38] : T. Amel, «contrôle flou génétique hybride d'un moteur BLDC dans un système de pompage PV», Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2012.
- [39] : M. F. Almi, M. Marrouf, «Connection of photovoltaic generator to domestic three phase electrical network supply trough voltage source inverter», EFEEA'10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications, 2-4 November 2010, Ghardaïa, Alger.
- [40]: B. Shanthi, S. P. Natarjan, «FPGA based fuzzy logic control for single phase multilevel inverter», International Journal of Applications volume. 9, N°3, November 2010, pp: 0975-8887.

الملخص :

إن الهدف من هذا البحث هو تزويد الشبكة الكهربائية المحلية بالطاقة المنتجة من خلال التحويل الكهروضوئي على مستوى محطة توليد شمسية. تحتوي شبكة التحويل على محطة توليد كهروضوئية موصول بمطبر مخفض للجهد, موج متعدد المستويات بالإضافة الى مرشح موصول بالحمولة وهي الشبكة الكهربائية في هذه الحالة.

من أجل اشتغال فعال للمحطة الكهروضوئية, يجب علينا تشغيل الألواح الشمسية في طاقتها القصوى مهما تكن التغيرات الجوية. وعليه, يجب علينا ضمان توافق بين مصدر الطاقة والحمولة وذلك باستعمال المطبر المخفض للجهد. في حين أن عملية ضخ الطاقة المولدة نحو الشبكة والتحكم في الجهد والتواتر يكون عبر الموج المتعدد الطبقات من فئة NPC باعتماد طريقة التحكم التقليدية والمتمثلة في التحكم بطريقة MLI الجيبية المتعددة.

الكلمات المفتاحية: مولد الطاقة الشمسية, نوعية الطاقة, الشبكة الكهربائية.

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'assurer l'injection l'énergie électrique produite par un centrale PV au réseau de distribution. La configuration de ce système comporte un générateur photovoltaïque, connecté à un hacheur dévolteur, un onduleur de tension multiniveaux et un filtre et la charge.

Pour un fonctionnement optimale du système, on doit assurer un fonctionnement à puissance maximale du générateur photovoltaïque quelque soit les conditions climatiques.

L'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge a été effectuée moyennant le convertisseur DC/DC. Et l'injection d'énergie vers le réseau est assuré vie un onduleur multiniveaux de type NPC à commande MLI triangulo- sinusoïdale multiple.

Mots clés : sources photovoltaïque, qualité d'énergie, réseaux électrique hybrides