

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



N°d'ordre
Série

Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologies

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Energies Renouvelables

PAR : BAAMARA Mohammed

THEME:

**ETUDE DE L'ONDULEUR TRIPHASE A TROIS NIVEAUX -
APPLICATION PHOTOVOLTAÏQUE**

Soutenu le 30/05/2016

M^r DJELLOULI Tahar	Maitre-Assistant A	Univ. Ghardaïa	Président
M^r ABDELKRIM Thameur	Maitre de recherche A	URAER'. Ghardaïa	Encadreur
M^r BATOUN Bachir	Attaché de Recherche	'URAER'. Ghardaïa	Examinateur
M^r MOUATS Sofiane	Maitre-Assistant B	Univ. Ghardaïa	Examinateur

ANNEE UNIVERSITAIRE: 2015/2016

Remerciements

Louange à **dieu** qui nous a donné la force morale et physique qui nous a permis d'achever les travaux de ce mémoire.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur Monsieur: **ABDELKRIM Thameur** docteur à Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables 'URAER', GHARDAIA, pour avoir dirigé mon travail, son aide m'ont toujours été précieux .

Je suis extrêmement reconnaissant à Monsieur **DJELLOULI Tahar**, Maitre-Assistant à l'Université de Ghardaïa, pour avoir accepté d'être mon co-directeur de ce mémoire. Ses très nombreux commentaires et suggestions ont considérablement amélioré à la fois le contenu et la présentation de ce mémoire. Qu'il reçoit ici le témoignage de toute ma gratitude pour ses grandes qualités humaines et pour son soutien moral.

J'exprime ma plus profonde gratitude à **BATOUN Bachir** Attaché de Recherche à Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables 'URAER'. Ghardaïa , de m'avoir honoré en acceptant d'être examinateur.

J'exprime ma plus profonde gratitude à **MOUATS Sofiane**, Maitre-Assistant à l'Université de Ghardaïa, de m'avoir honoré en acceptant d'être examinateur.

Je dédie mon travail

À l'esprit humble de **mon père**

A **ma mère** qui m'a comblée de tendresse pour me voir réussir, à mes **sœurs** et **frères**, et toute **la famille de BAAMARA**, à mes **compagnons** de tristesse et de joie et **camarades** de cette promotion.

Résumé

L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque est de nos jours plus qu'indispensable vu la diminution des ressources fossiles ainsi que la pollution engendrée par ces dernières. Selon le type de l'application visée, différentes structures de convertisseurs peuvent être utilisées lors de la conversion de l'énergie photovoltaïque en courant alternatif. L'introduction des convertisseurs multiniveaux dans les chaînes de conversions d'énergies est d'un grand intérêt vu les avantages qu'ils offrent par rapport aux structures classiques. Ils sont utilisés dans les puissances élevées et permettent d'obtenir une meilleure forme d'onde à la sortie. L'objectif de ce travail est l'étude de la cascade de conversion d'énergie photovoltaïque à base de convertisseur triphasé à trois niveaux. Nous commencerons par présenter le modèle du générateur photovoltaïque (GPV) ainsi que l'influence des paramètres rayonnement et température sur sa puissance. Par la suite le modèle ainsi que deux stratégies de commandes (triangulo-sinusoïdale et MLI vectorielle) seront traités. En fin nous terminons par présenter les résultats de simulations obtenus de l'association GPV-onduleur trois niveaux – Charge.

Mots clés : PV , Onduleur à trois niveaux, MLI Vectorielle.

ملخص :

إن استعمال الطاقة الكهروضوئية في الوقت الراهن لا يمكن الإستغناء عنه، نظرا للنقص الذي تؤول إليه الثروات الباطنية بالإضافة إلى التلوث الناجم عنها. في هذا التطبيق، يمكن استخدام هياكل تحويل مختلفة في تحويل الطاقة الضوئية إلى تيار متردد. عن طريق موج متعدد المستويات في سلسلة تحويل الطاقة، الذي يمتاز بأهمية كبيرة بالنظر لما يمتاز به بالنسبة للهياكل الكلاسيكية. تستخدم هذه الطاقة عند الإستطاعات العالية، وتُمكن من الحصول على تَموج أفضل عند المخرج . والهدف من هذا العمل هو دراسة كيفية تحويل الطاقة الضوئية على أساس موج ثلاثي الأقطاب ذو ثلاث مستويات، حيث نبدأ من خلال تقديم نموذج مولد الكهروضوئي وتأثير التغيرات الإشعاعية ودرجة الحرارة على القوة. وبتابع النموذج المذكور، ستتم الدراسة باستراتيجيتين للتحكم طريقة المثلاث ذو التَموج الجيبي والموجه. وأخيرا، نهي الدراسة بتقديم نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها بتجميع مولد الكهروضوئي + المحول + الشحنة المقاومة. الكلمات المفتاحية : كهروضوئي ، موج ذو ثلاث مستويات، موج MLI.

Abstract

The use of photovoltaic solar energy is today more indispensable given the reduction of fossil resources and the pollution caused by them. Depending on the intended application, different converter structures may be used in the conversion of photovoltaic energy into alternating current. The introduction of multilevels converters in the energy conversion cascade is of great interest given the advantages they offer over conventional structures. They are used in

high power and allows to obtain a better output waveform. The objective of this work is the study of photovoltaic energy conversion cascade using the three-phase three-level inverter. We begin by presenting the model of the photovoltaic generator (PVG) and the influence of solar radiation and temperature on power. After that, two control strategies (triangulo-sinusoidale and space vector PWM) will be treated. At the end, we finish by presenting the simulation results obtained of the association of photovoltaic generator-three level inverter-load.

Keywords: photovoltaic, three-level inverter, space vector PWM.

Table des matières

Remerciements-----	b
Résumé-----	c
Table des matières-----	e
Liste des figures -----	h
Liste des abréviations explicité-----	j
Introduction générale -----	2
Chapitre I Modélisation du générateur photovoltaïque	
I.1 Introduction-----	5
I.2 Rayonnement solaire -----	5
I.3 Les générateurs photovoltaïques-----	7
I.3.1 Historique -----	7
I.3.2. L'effet photovoltaïque -----	7
I.4 Les éléments de base d'un générateur photovoltaïque -----	8
I.4.1 la cellule photovoltaïque -----	8
I.4.1.1 Structure et principe de fonctionnement-----	8
I.4.1.2 La jonction P-N -----	9
I.4.1.3 Technologies des cellules photovoltaïques-----	10
I.4.2 Le module photovoltaïque -----	12
I.4.2.1 Définition -----	12
I.4.2.2 Caractéristiques électriques des modules solaires-----	13
I.5 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques -----	13
I.6. Modélisation du générateur photovoltaïque-----	14
I.7 Les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque -----	16
I.7.1 Regroupement des modules en série -----	17

I.7.2 Regroupement des modules en parallèle-----	18
I.8 Conclusion-----	19
Chapitre II Modélisation et étude comparative des onduleurs à deux et à trois niveaux	
II.1 Introduction-----	21
II.2 Onduleur triphasé à deux niveaux-----	21
II.3 Onduleur triphasé à trois niveaux-----	22
II.4 Les avantages et les inconvénients des onduleurs multi-niveaux-----	22
II.4.1 Les avantages-----	22
II.4.2 Les inconvénients-----	23
II.5 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux-----	23
II.5.1 Structure-----	23
II.5.2 Différentes configurations d'un bras de l'onduleur à trois niveaux-----	24
II.5.3 Modèle de commande des onduleurs à trois niveaux-----	26
II.5.3.1 Commandabilité des convertisseurs statiques-----	26
II.5.3.2 Commande complémentaire des onduleurs à trois niveaux-----	26
II.5.3.3 Etats d'un bras de l'onduleur-----	27
II.5.3.4 Etats de l'onduleur-----	28
II.5.4 Fonction de conversion-----	30
II.6 Stratégie de la modulation triangulo-sinusoïdale bipolaire à une porteuse-----	31
II.6.1 Principe-----	31
II.6.2 Algorithme de la stratégie pour la modulation triangulo-sinusoïde-----	32
II.6.3 Simulation-----	33
II.7 Stratégie de la modulation triangulo-sinusoïdale bipolaire à deux porteuses-----	35
II.7.1 Algorithme de la stratégie pour la modulation triangulo-sinusoïde-----	35
II.7.2 Simulation-----	36
II.8 Conclusion-----	39
Chapitre III Modulation de largeur d'impulsion vectorielle de l'onduleur à trois niveaux	

III.1 Introduction	40
III.2 Diagramme vectoriel	40
III.3 Séquence des états de l'onduleur	44
III.4 Simulation	46
Chapitre IV Association GPV-Onduleur à trois niveaux -Charge	
III.5 Conclusion	48
IV.1 Introduction	50
IV.2 Modélisation du filtre intermédiaire	50
IV.2.1 GPV-Onduleur triphasé à trois niveaux commandé par la stratégie triangulo- sinusoïdale à deux porteuses	51
IV.2.2 GPV-Onduleur triphasé à trois niveaux commandé par la MLI vectorielle	54
IV.3 Conclusion	56
Conclusion Générale	58
Bibliographie	60

Liste des figures

Figure I. 1. Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil.	6
Figure I. 2. Spectres solaires relevés selon différentes valeurs d'air masse AM.	6
Figure I. 3. Principe de l'effet photovoltaïque.	8
Figure I. 4. Évolution de la taille des cellules silicium photovoltaïques ces dernières années.	9
Figure I. 5. Exemple d'un matériau semi-conducteur dopé (le silicium).	9
Figure I. 6. Schéma de principe de la conversion photoélectrique.	10
Figure I. 7. Module photovoltaïque de 75 WC (0,68m ²).	12
Figure I. 8. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.	14
Figure I. 9. Schéma bloc du GPV.	15
Figure I. 10. Caractéristique I(V) & P(V) pour différentes valeurs de rayonnement solaire à température fixe 25 °C.	17
Figure I. 11. Caractéristique I(V) & P(V) pour différentes valeurs de température à rayonnement solaire fixe 1000 W/m ²	17
Figure I. 12. Caractéristique I(V) pour Regroupement des modules en série.	18
Figure I. 13. Caractéristique I(V) pour Regroupement des modules en parallèle.	19
Figure II. 1. Onduleur à deux niveaux.	21
Figure II. 2. Onduleur à trois niveaux à structure NPC.	24
Figure II. 3. Bras d'onduleur à trois niveaux.	25
Figure II. 4. Différentes configurations possibles du fonctionnement d'un bras.	25
Figure II. 5. Etats d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.	28
Figure II. 6. Etats de l'onduleur.	29
Figure II. 7. schéma de principe de la technique tringulo-sinusoïdale.	32
Figure II. 8.: Tensions des références avec la porteuse bipolaire pour r=0.8 et m=10.	33
Figure II. 9. Tension de premier bras V _{AM} pour r=0.8 et m=20.	34
Figure II. 10. Tension de sortie V _A et leur spectre harmonique pour m=10, THD= 0.82.	34
Figure II. 11. Tension de sortie V _A et leur spectre harmonique pour m=20, THD= 0.68.	35
Figure II. 12. Tensions de références avec les porteuses bipolaire pour r=0.8 et m=10.	36
Figure II. 13. Tension de premier bras V _{AM} pour r=0.8 et m=5.	37
Figure II. 14. Tension de sortie V _A et leur spectre harmonique pour m=5, THD= 0.63.	38
Figure II. 15. Tension de sortie V _A et leur spectre harmonique pour m=10, THD= 0.60.	38
Figure III. 1. Diagramme vectoriel de l'onduleur à trois niveaux.	41
Figure III. 2. Régions du diagramme vectoriel.	42
Figure III. 3. projection du vecteur de référence normalisé dans la première région.	43

Figure III. 4. Les projections pour les régions 1, 2 et 3,4	44
Figure III. 5. Etats x, y et z pour les différentes régions du diagramme vectoriel.	45
Figure III. 6. Tension de premier bras V_{AM} pour $r=0.8$ et $f_c=1$ kHz.....	47
Figure III. 7. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=10$, THD= 0.38.....	47
Figure III. 8. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=20$, THD= 0.35.....	48
Figure IV. 1.GPV-Onduleur-Charge.....	50
Figure IV. 2. Association GPV-Onduleur triphasé à trois niveaux – Charge.	50
Figure IV. 3. Tensions et courant de système pour $r=0.8$ et $m=10$	52
Figure IV. 4. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=10$, THD= 0.61.....	53
Figure IV. 5. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=20$, THD=0.56.....	53
Figure IV. 6. Tensions et courant de système pour $r=0.8$ et $m=20$	55
Figure IV. 7. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=20$, THD= 0.36.....	55
Figure IV. 8. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=40$, THD= 0.33.....	56

Liste des abréviations explicité

GPV	Générateur photovoltaïque
C	Vitesse de la lumière
c	Capacité de condensateur
E_s	Eclairement ou le flux incident (W/m^2)
E_{sref}	Eclairement de référence ($1000W/m^2$)
T_j	Température de jonction de la cellule ($^{\circ}C$).
T_{jref}	Température de référence des modules ($25^{\circ}C$).
k	Constante de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23} J/K$)
q	Charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19} C$)
A	Facteur d'idéalité de la jonction.
E_g	L'énergie de gap.
P_1, P_2, P_3 et P_4	Paramètres constants
I_{cc}	Courant de court-circuit (A)
I_G	Courant fourni par le groupe de modules (A)
I_{ph}	Courant dépendant de l'ensoleillement et de la température des modules (A).
I_{sh}	Courant traversant la résistance shunt (A).
I_{sat}	Courant de saturation (A).
V_G	Tension aux bornes du groupe de modules (V).
V_{co}	Tension circuit ouvert
R_s	Résistance série (Ω).
R_{sh}	Résistance shunt (Ω).
NP	Nombre des modules en parallèle
NS	Nombre des modules en série.
A, B, C	Indices correspondant aux trois phases « A », « B » et « C ».
M	Point milieu.
U_c	Tension aux bornes de condensateur.
E	Tension de batterie.
K	Bras d'onduleur ($k=1, 2,3$).
NPC	Neutral Point Clamping.
F_{ki}	Fonction de connexion de l'interrupteur i.
F_{km}^b	Fonction de connexion du demi-bras.
f	Fréquence de la référence.

f_c	Fréquence de commutation.
r	Taux de réglage (modulation).
m	Indice de modulation
V_m	Amplitude maximale de la référence sinusoïdale.
U_p	Amplitude maximale de la porteuse.
THD	Taux de distorsion harmonique.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions.
F_{km}^b	Fonction de connexion du demi-bras.
f	Fréquence de la référence.
f_c	Fréquence de commutation.
r	Taux de réglage.
m	Indice de modulation
V_m	Amplitude maximale de la référence sinusoïdale.
U_p	Amplitude maximale de la porteuse.
THD	Taux de distorsion harmonique.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions.

Introduction générale

Une grande partie de la production mondiale d'énergie électrique est assurée à partir des sources fossiles comme le charbon, le pétrole, le gaz, concurrents à partir du 18^{ième} siècle. Ces sources d'énergie beaucoup plus utilisées, ne sont pas équitablement réparties dans le monde. D'où la recherche des ressources d'énergie alternatives est devenue donc une question cruciale de nos jours. Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées dans le secteur des énergies renouvelables, telles que la production d'électricité à partir transformations d'énergie photovoltaïque et éolienne.

Les applications domestiques ou industrielles étant généralement alimentées en courant alternatif, il est nécessaire de convertir le courant continu produit par le générateur photovoltaïque (GPV), en courant alternatif avec les mêmes caractéristiques (tension, fréquence, ...) du réseau, cette transformation est réalisée grâce à un onduleur.

Étant monophasés ou triphasés, autonomes ou non autonomes, de tension ou de courant, les onduleurs sont basés sur une structure en pont ou en demi pont, constitués le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée [Lef-05].

La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présentée dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW). L'assemblage des composants électroniques (IGBT, MOSFET, GTO,...) de différentes manières permet d'aboutir à plusieurs topologies d'onduleurs.

L'objectif du présent travail, porte sur l'amélioration des performances de l'onduleur à trois niveaux alimenté par GPV en appliquant comme stratégie de commande la MLI vectorielle.

Le manuscrit est présenté comme suit:

La modélisation de la source photovoltaïque est présentée au premier chapitre. Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur le rayonnement solaire ainsi que sur l'effet PV permettant la transformation de l'énergie solaire en électricité.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le modèle de l'onduleur triphasé à trois niveaux ainsi que les deux stratégies de la modulation MLI triangulo-sinusoïdale et MLI vectorielle.

Dans le dernier chapitre, nous présentons les résultats de simulations obtenus de l'association GPV-Onduleur à trois niveaux-Charge commandé par chaque une des stratégies de commande étudiés pour différents indices de modulation.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [Ala-06].

Dans ce chapitre, nous commencerons par le rayonnement solaire et l'énergie solaire puis le générateur photovoltaïques et les composants de ce générateur ainsi principe de fonctionnement. Puis nous présentons les éléments de base d'un générateur photovoltaïques. Puis les avantages et les inconvénients de ce système .Enfin modélisation et caractéristiques d'un module photovoltaïque.

I.2 Rayonnement solaire

Le soleil, notre plus grande source d'énergie, est une étoile située à une distance moyenne de 149 598 000 Km de la terre. Elle émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10 μm [Chr-05]. Ce rayonnement est composé de grains de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ par la relation suivante [Tam-11].

$$E P = h * C/\lambda \quad (\text{I.1})$$

Où h : est la constante de Planck,

C : est la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde.

Le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre en traversant l'atmosphère. Ceci est dû essentiellement à l'absorption partielle du rayonnement par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Le flux énergétique reçu au sol ne dépasse pas 1200 W/m². Pour tenir compte de la position relative du soleil qui modifie l'épaisseur de l'atmosphère traversée, on introduit un coefficient appelé nombre d'air masse AM [Tam-11]. La figure ci-dessous illustre ce principe.

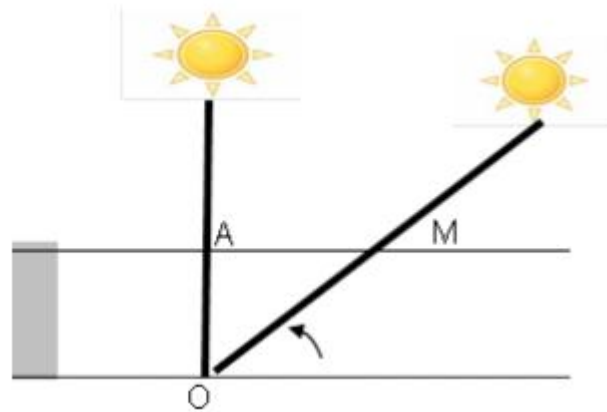


Figure I. 1. Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil.

Le nombre d'air masse est obtenu par la relation suivante:

$$AM = 1/\sin(\alpha) \quad (I.2)$$

Avec : α ($^{\circ}$) l'élévation du soleil sur l'horizon.

Le concept de nombre d'air masse caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (par exemple 1 353 W/m² pour AM0); d'autre part, il sert à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques [Tam-11]. La figure ci-dessous montre le spectre solaire relevé dans plusieurs conditions selon différentes valeurs d'air masse.

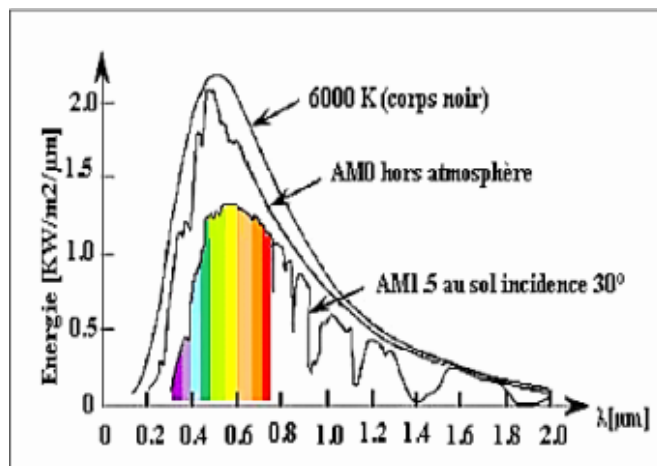


Figure I. 2. Spectres solaires relevés selon différentes valeurs d'air masse AM.

Ainsi les conditions standards de qualification des cellules sont un spectre AM1.5, une puissance incidente de 1 000 W/m² et une température de 25°C. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) [Tam-11].

I.3 Les générateurs photovoltaïques

I.3.1 Historique

La connaissance de l'effet photovoltaïque date depuis très longtemps. Les dates les plus remarquables de son historique sont les suivantes [Flè-07] :

- 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.
- 1950 : Les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.
- 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 4000 km en Australie.

I.3.2. L'effet photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». Cet effet peut être expliqué par le fait qu'un photon reçu du rayonnement solaire, heurte une cellule PV, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule. Avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome (de la bande de valence à la bande de conduction traversant la bande interdite), créant ainsi un trou qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique. C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou [Wur-09], comme la montre la figure ci-dessous.

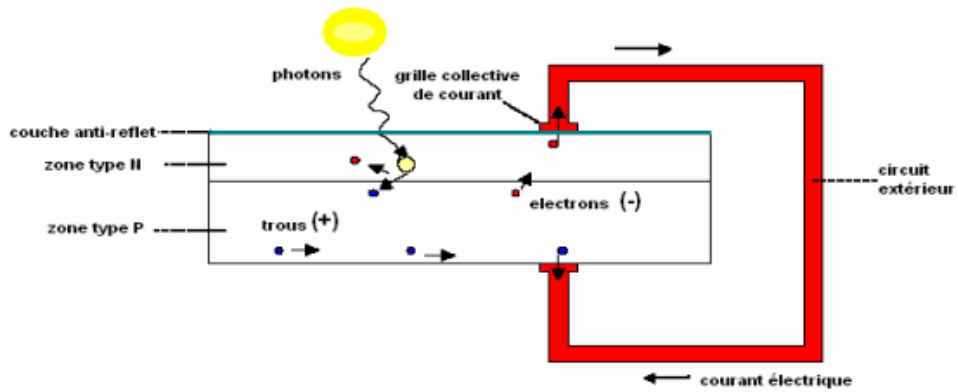


Figure I. 3. Principe de l'effet photovoltaïque.

La structure la plus simple d'une cellule PV, comporte une jonction entre deux matériaux semi-conducteurs dopés de sorte que l'une conduise les charges négatives et l'autre, les charges positives. Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne permanent, il se crée donc une différence de potentiel entre les deux couches de la cellule. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les bornes de la jonction à un circuit extérieur [Wur-09].

I.4 Les éléments de base d'un générateur photovoltaïque

I.4.1 la cellule photovoltaïque

I.4.1.1 Structure et principe de fonctionnement

Les photopiles ou cellules photovoltaïques figure (I.4) sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 [Bel-08]. Celui-ci consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Ces cellules sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants comme les transistors ou les puces dans un ordinateur. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière [Roy-98].



Figure I. 4. Évolution de la taille des cellules silicium photovoltaïques ces dernières années.

Ces cellules sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants comme les transistors ou les puces dans un ordinateur. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière [Oli-02].

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des "impuretés") sont substitués à des atomes de silicium dans un réseau cristallin figure (1.5) c'est ce que l'on appelle le dopage :C'est une technique est utilisée pour tous les semi-conducteurs [Flè-07] [Mer-10].

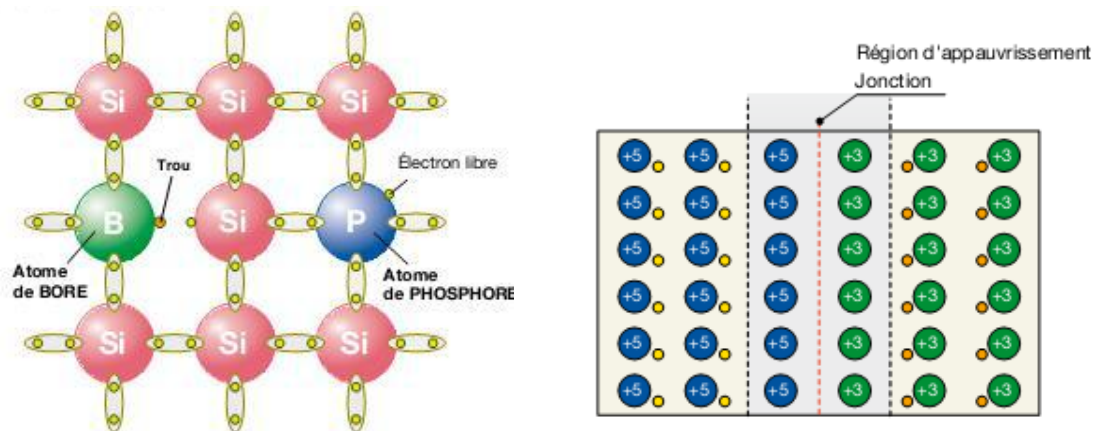


Figure I. 5. Exemple d'un matériau semi-conducteur dopé (le silicium).

I.4.1.2 La jonction P-N

La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons figure (I.6) dont l'énergie ($h\nu$) est supérieure à celle de l'énergie du matériau appelée l'énergie de bande gap (E_g), le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type-P et celui de trous du semi-conducteur de type-N augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [Bel-08].

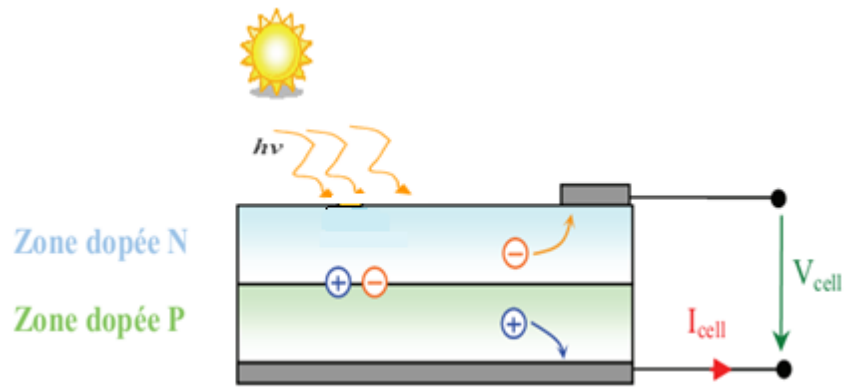


Figure I. 6. Schéma de principe de la conversion photoélectrique.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo jonction) ou entre deux matériaux différents (hétéro jonction) [Bel-08], [Mer-10] :

- Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type "N" (figure (I.5), dopage au phosphore).
- Si l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le Silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type "P"(figure (I.5) , dopage au bore).

I.4.1.3 Technologies des cellules photovoltaïques

On distingue trois générations des cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques [Wur-09].

a. Technologies de la 1^{ère} génération à base de Silicium Cristallin

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et poly cristallin [Mak-13].

b. Technologies de la 2^{ème} génération à base de couche-mince

Plus récemment sont apparues les technologies de couches minces, plus fines et dont la part du marché semble promise à une augmentation rapide. Les cellules dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir :

- le silicium amorphe (a-si).

- le tellurure de Cadmium (CdTe).
- le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS).

c. Technologies de 3^{ème} génération (les cellules organiques)

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules: les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et développement [Mak-13] .Dans le tableau (I.1), ci-dessous on résume les différentes performances des technologies citées précédemment [Mce-12] :



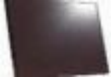


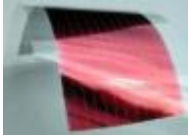
Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
Silicium Monocristalline	13-17%	Bon rendement pour une cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium Poly-cristallin	11-15%	Bon rendement pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium Amorphe	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
CdTe	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	
CIGS	20%	Energie de gap ajustable, 99% des photons absorbés	Manque de matière première	
Cellules Organiques	≤ 5%	Faible cout de fabrication, flexible	Rendement encore trop bas	

Tableau I. 1. Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques.

I.4.2 Le module photovoltaïque

I.4.2.1 Définition

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. En effet pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (I.7). Les cellules sont en soudant le contact avant de chaque cellule au contact arrière de la suivante [Hat-08].

Les modules actuels sont généralement composés de 36 cellules (18 V) ou 72 cellules PV en série (36 V). Les deux dimensions de cellules les plus répandues sont des cellules de 125x125 (5 pouces) ou 150x150 (6 pouces) [Vig-10], où les connexions en série de ces cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

Ces cellules sont protégées de l'humidité, des chocs et des nuisances par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène vinyl- acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène.

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation, permet la fixation de ce module sur différents types de supports, donc les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes [Bel-08] :

- protection des cellules contre les agents atmosphériques ;
- protection mécanique et support.
- connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

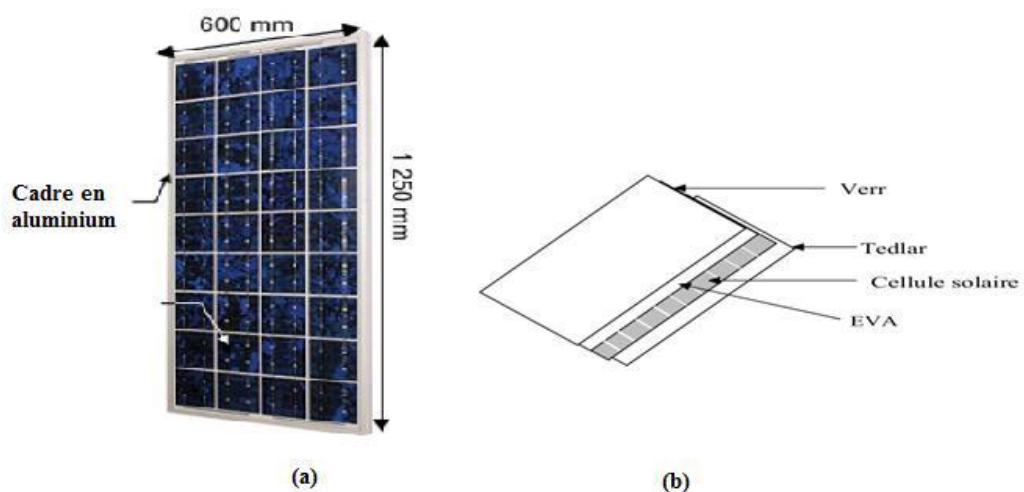


Figure I. 7. Module photovoltaïque de 75 WC (0,68m²).

I.4.2.2 Caractéristiques électriques des modules solaires

a. La puissance crête, P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²) Ceci correspond approximativement à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil le midi par temps clair, Il s'agit donc de conditions idéales conventionnelles qui sont très rarement remplies dans la pratique. La puissance crête sera proportionnelle à la surface du module, [Cha-08].

b. Rendement : Rapport de la puissance électrique maximale à la puissance de la radiation incidente à la température de référence (Ex : une cellule de silicium monocristallin ayant une surface de 100 mm aura une efficacité d'environ 14 % et produira environ 1,4 Wc à 0,5 volt) [Boi-08], [Has-10].

$$\eta = P_{max} / P_i = V_m / S_{eff} \cdot G \quad (I.3)$$

Où : P_i est la puissance incidente, S_{eff} la surface effective de la cellule solaire, G le flux incident et (I_m, V_m) les Coordonnées du point de fonctionnement maximale.

c. Facteur de forme: On appelle facteur de forme FF (En anglais: filling factor), rapport entre la puissance maximale P_m pouvant être extraite $(I_m * V_m)$ de la photopile sous les conditions de mesures standardisées et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} * I_{cc}$ [Boi-08].

La qualité électrique de la cellule est déterminée par le facteur de forme FF, donné par l'équation suivante [Le1-07] :

$$FF = I_m \cdot V_m / I_{cc} \cdot V_{co} \quad (I.4)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70 % [Aki-07].

I.5 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

A. Avantages [Mak-13]

1. Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.
2. Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc. Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.
3. ils ne font pas de pollution, sans émissions ou odeurs discernables.
4. ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.

5. ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.
6. ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
7. ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant.

B. Inconvénients [Arr-07],[Nab-13]

1. prix: les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale. rayonnement du soleil: l'intensité d'irradiante du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et flotte.
2. le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %,
3. ils sont tributaires des conditions météorologiques.
4. l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.

I.6. Modélisation du générateur photovoltaïque

Le modèle à une diode est le modèle le plus classique de la littérature. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, deux résistances (série et shunte) pour les pertes, le modèle d'une cellule est celui de la figure ci-dessous Figure (I.8)[Rek-08].

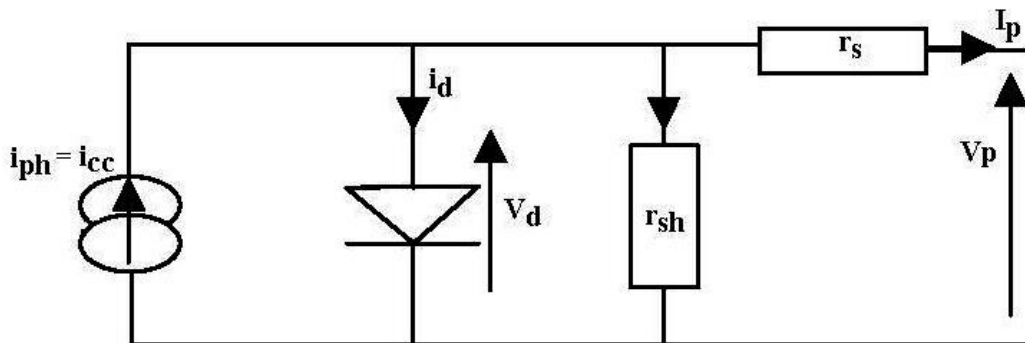


Figure I. 8. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrée sont: E_s - ensoleillement dans le plan des modules (W/m^2) et T_j - température de jonction de la cellule ($^{\circ}C$). Les deux variables de sortie sont: I_G - courant fourni par le groupe de modules (A) et V_G la tension aux bornes du groupe de modules (V).

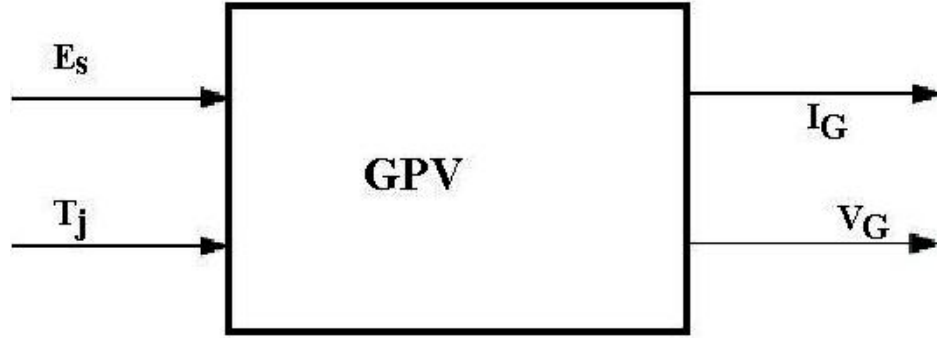


Figure I. 9. Schéma bloc du GPV.

Nous obtenons alors l'équation caractéristique pour un groupe de modules photovoltaïques déduite du schéma électrique équivalent de la figure (I.8).

$$I_G = I_{ph} - I_d - I \cdot R_{sh} \quad (I-5)$$

Le courant, I_{ph} est directement dépendant de l'ensoleillement et de la température des modules et peut se mettre sous la forme:

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref})] \quad (I-6)$$

Où: $E_{sref} = 1000 \text{ W/m}^2$, est l'ensoleillement de référence. $T_{jref} = 25 \text{ °C}$ est la température de référence des modules. P_1 , P_2 et P_3 sont des paramètres constants.

Le courant de polarisation de la jonction PN, I_d est donné par l'expression:

$$I_d = I_{sat} \cdot \left[\exp\left(\frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V_G + R_s \cdot I_G)\right) - 1 \right] \quad (I-7)$$

Avec: I_{sat} est le courant de saturation ; k la constante de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) ; q la charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) ; A le facteur d'idéalité de la jonction.

Le courant de saturation de la diode est:

$$I_{sat} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp(E_g/k \cdot T_j) \quad (I-8)$$

Où: E_g est l'énergie de gap et P_4 est un paramètre constant.

Enfin, le courant traversant la résistance shunt s'écrit sous la forme:

$$I_{sh} = \frac{V_G}{I_G} \quad (I-9)$$

Nous pouvons alors écrire l'équation finale:

$$I_G = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref})] - \frac{V_G}{R_{sh}} - P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V_G + R_s \cdot I_G)\right) - 1 \right] \quad (I-10)$$

Nous obtenons une fonction implicite de la forme:

$$I_G = f(I_G, V_G, E_s, T_j) \quad (I-11)$$

Avec 7 paramètres à déterminer $P_1, P_2, P_3, P_4, A, R_s$ et R_{sh} .

La résistance série doit être plus petite que possible et la résistance shunt doit être très grande pour que le maximum de courant soit délivré pour la charge. $P_1 = 0,0036$; $P_2 = 0,0001$; $P_3 = -0,0005$; $P_4 = 70,843$; $A = 1$; $R_s = 0,614 \Omega$; $R_{sh} = 151,16 \Omega$.

I.7 Les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque

Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante).

Pour tracer les caractéristiques $I=f(V)$ les paramètres du module SIEMENS Tableau (I.2) sont utilisés.

Paramètres	Valeur
P_{PV}	110W
I_{mpp}	3.15A
V_{mpp}	35V
I_{cc}	3.55A
V_{co}	36.5V
α_{sc}	1.4mA/°C
β_{oc}	-152mV/°C
P_{mpp}	110W

Tableau I. 2 : Paramètre d'un module photovoltaïque SIEMENS SM110-24 [Rek-08]

Logiciel Matlab (program) a été utilisé pour simulé le système.

Les figures (I.10), (a), (b) représentés L'évolution de la caractéristique I(V) et P(V) pour différentes valeurs de rayonnement à température fixe de 25°C. Les figures (I.11), (a), (b) représentent L'évolution de la caractéristique I(V) et P(V) pour un rayonnement fixe de 1000 W/m² est différents valeurs de températures. On remarque l'augmentation du courant de sortie avec l'augmentation de du rayonnement solaire, et diminution du tension de sortie avec l'augmentation du température de la cellule.

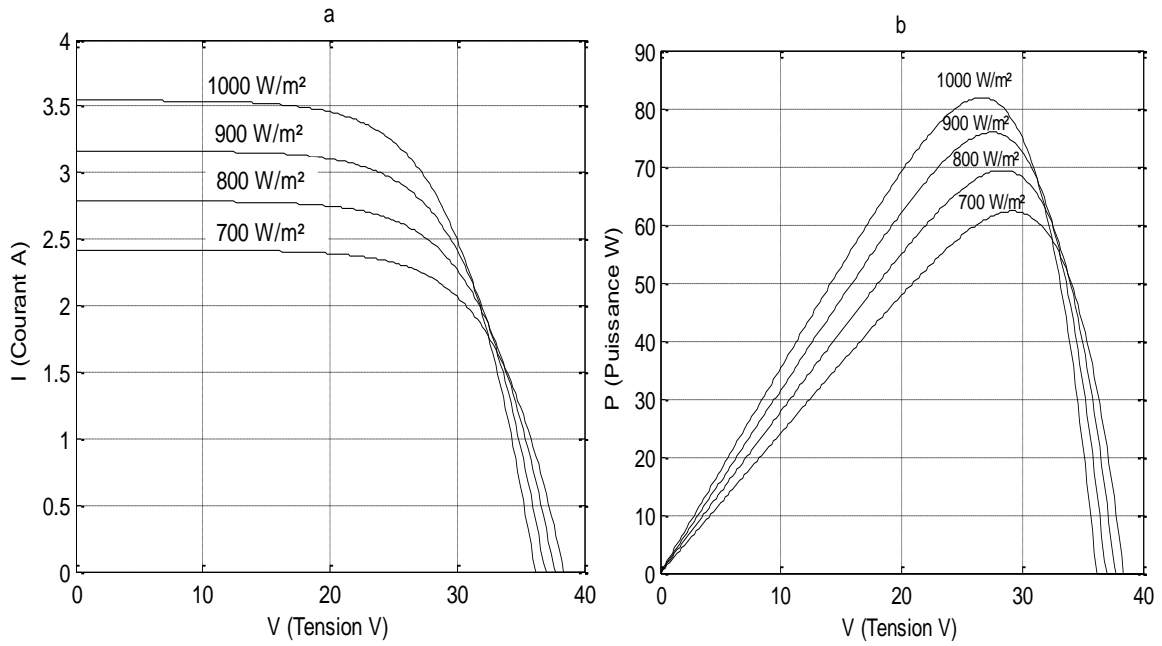


Figure I. 10. Caractéristique I(V) & P(V) pour différentes valeurs de rayonnement solaire à température fixe 25 °C

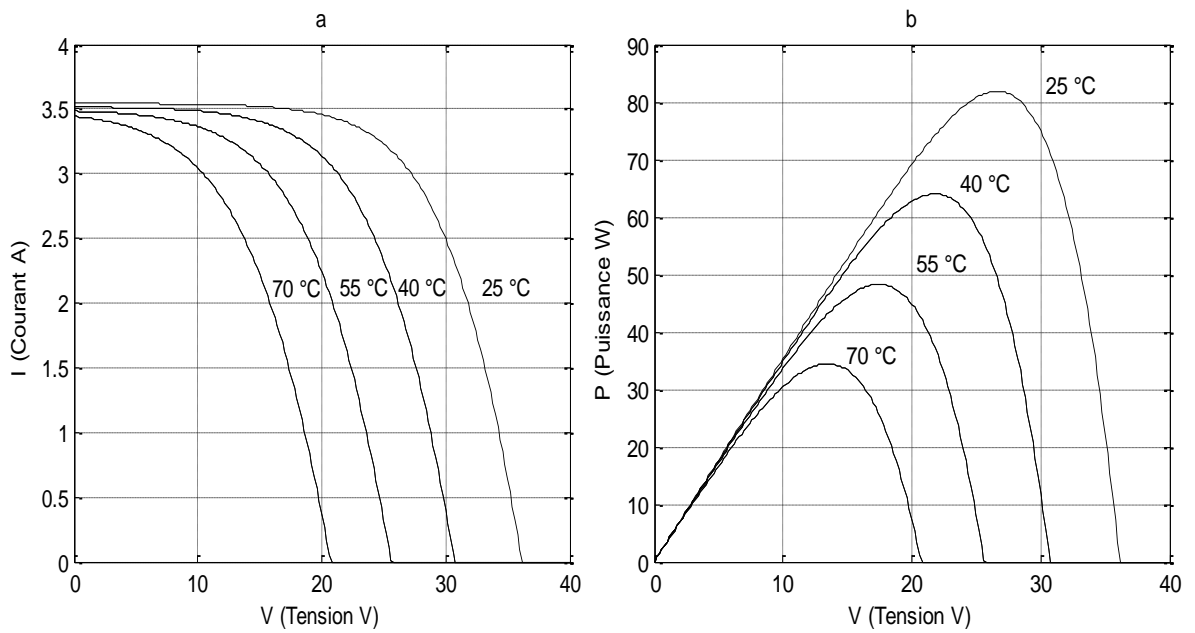


Figure I. 11. Caractéristique I(V) & P(V) pour différentes valeurs de température à rayonnement solaire fixe 1000 W/m²

I.7.1 Regroupement des modules en série

Une association de (N_s) module en série figure (I.12) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les modules sont alors traversés par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque module . L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (N_s) modules [Pet-09].

$$V_{co\ Ns} = Ns * V_{co} \quad (I-12)$$

$$I_{cc\ Ns} = I_{cc} \quad (I-13)$$

$V_{co\ Ns}$: la somme des tensions en circuit ouvert de N_s modules en série ; $I_{cc\ Ns}$: courant de court-circuit de N_s modules en série.

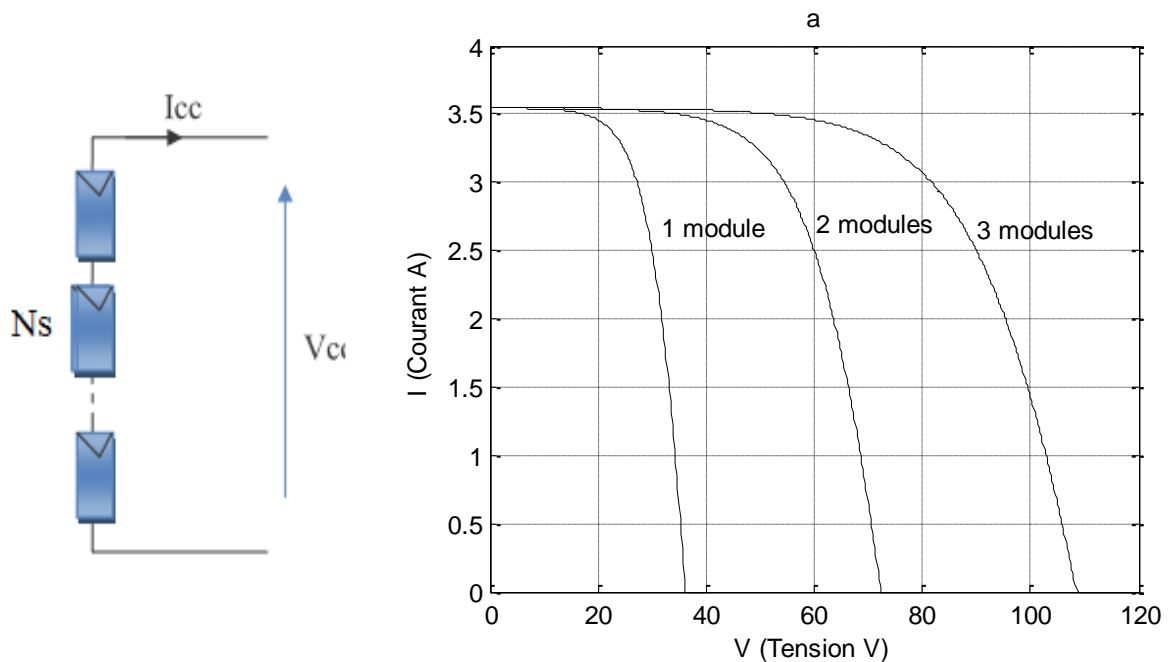


Figure I. 12. Caractéristique I(V) pour Regroupement des modules en série

I.7.2 Regroupement des modules en parallèle

Une association parallèle de (N_p) module figure (I.13) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de modules identiques connectées en parallèle, les modules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [Abb-11].

Avec :

$$I_{cc\ Np} = Np * I_{cc} \quad (I-14)$$

$$V_{co\ Np} = V_{co} \quad (I-15)$$

$I_{cc\ Ns}$: la somme des courants de court circuit de (N_p) module en parallèle ; $V_{co\ Np}$: tension du circuit ouvert de (N_p) modules en parallèle

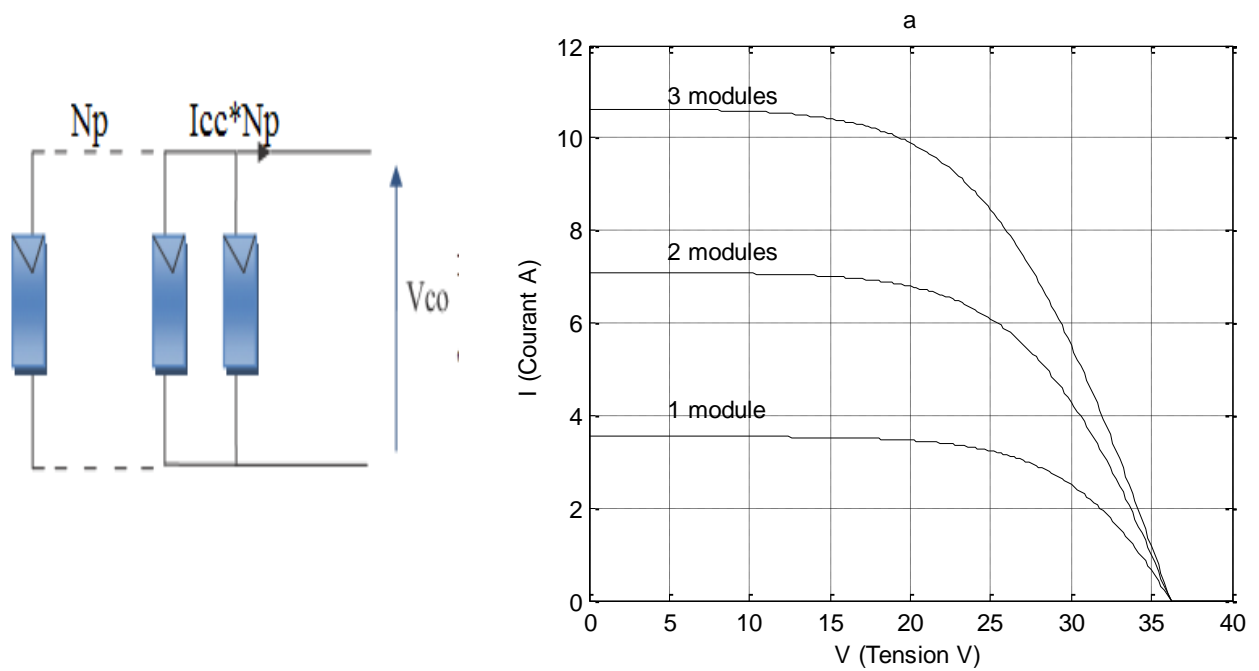


Figure I. 13. Caractéristique I(V) pour Regroupement des modules en parallèle

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes technologies des cellules solaires, ainsi que les modèles à une diode du module PV. Par la suite nous avons montré l'influence du rayonnement et de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) du module.

Le chapitre suivant sera destiné à la modulation de l'onduleur à 3 niveaux.

II.1 Introduction

Après avoir présentés le module ainsi que les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du GPV, nous présentons dans ce chapitre la modulation ainsi qu'une étude comparative entre l'onduleur classique et l'onduleur à 3 niveaux.

Nous commencerons par présentés les structures ainsi que les modèles de ces convertisseurs, par la suite nous intéressons au stratège de commande triangulo-sinusoidale appliquée aux deux onduleurs. En fin nous terminons par une étude comparative où les avantages et les inconvénients seront présents.

II.2 Onduleur triphasé à deux niveaux

L'onduleur classique à deux niveaux de tension est représenté sur la figure (II.1). Il est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor qui travaillent en commutation forcée. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. En mode commandable, le bras d'onduleur est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension.

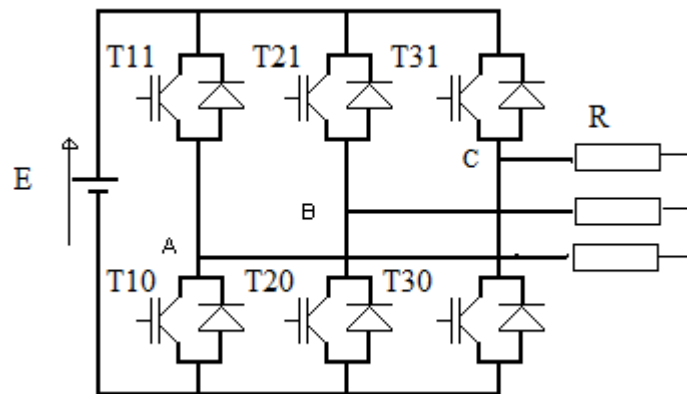


Figure II. 1. Onduleur à deux niveaux

Pour un convertisseur à 2-niveaux de tensions. Nous avons deux séquences de fonctionnement possible permettant de générer les deux-niveaux de tensions:

Séquences 1 : Génération du niveau maximum

Dans ce cas, l'interrupteur K1 est passant et K0 est bloqué. La tension de sortie V_{KM} est:

$$V_{KM} = +E.$$

Séquences 2 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, l'interrupteur K1 est bloqué et K0 est passant. La tension de sortie V_{KM} est:

$V_{KM} = 0$.

Les 2 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau (II.1).

K1	K0	V_{KM}
1	0	E
0	1	0

Tableau II.1. États possibles de l'onduleur usuel à 2 niveaux.

II.3 Onduleur triphasé à trois niveaux

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Les premières topologies multi-niveaux ont été introduites au début des années quatre-vingt Nabae, Takahachi et al 1981 [Gré-10]. La valeur limitée de la tension de blocage des interrupteurs réalisables jusqu'à présent est à la base du développement des onduleurs multi-niveaux. Cette valeur limite est repoussée au fil de l'amélioration des techniques de réalisation, mais elle est toujours inférieure à une dizaine de kV, et ne devrait franchir cette limite qu'avec l'avènement de nouvelles technologies. Cette tension est inférieure à la tension de service des équipements haute tension. La réalisation d'un convertisseur multi-niveau consiste à employer un convertisseur de topologie plus complexe. Leur commande nécessite d'avantage de signaux, mais le convertisseur résultant présente de meilleures performances. En plus de permettre d'obtenir une tension de service plus élevée [Mar-05].

II.4 Les avantages et les inconvénients des onduleurs multi-niveaux

II.4.1 Les avantages

Un convertisseur multi-niveau présente d'autres avantages que l'on peut résumer dans les points suivants [Mar-05]:

- ✓ La résolution obtenue est plus élevée, le convertisseur est capable de générer plus que deux ou trois niveaux. Le réglage de la tension est plus fin, ce qui permet de réduire les contraintes imposées à la charge qui subit sans cela une tension qui commute entre ses deux valeurs maximales. La taille des filtres passifs parfois nécessaires pour limiter ces sollicitations peut être réduite.
- ✓ Dans le même temps, le système gagne une plus grande dynamique et cela permet un réglage plus rapide.

- ✓ La tension commutée est réduite à la valeur du pas du convertisseur, c'est-à-dire à la valeur de tension bloquée par ses interrupteurs. Cela réduit d'autant les pertes par commutation. D'autre part, la fréquence de pulsation de chacun de ses éléments est plus basse que la fréquence de pulsation apparente de la tension appliquée à la charge. Cela autorise une augmentation de cette fréquence de pulsation qui permet une réduction de la dimension des filtres ou une amélioration de la qualité des signaux filtrés.
- ✓ En terme de production, selon la topologie choisie, il est possible de réaliser un convertisseur modulaire composé de modules identiques. Le nombre de modules peut éventuellement être adapté à la tension de service du convertisseur.

II.4.2 Les inconvénients

Moyennant un accroissement de complexité et de coût, il est imaginable d'avoir des modules redondants permettant la poursuite du fonctionnement du convertisseur en cas de défaillance de modules. Il ne faut toutefois pas trop s'enthousiasmer sur le gain possible en terme de fiabilité, car l'augmentation de complexité va généralement de pair avec la diminution de la fiabilité. En effet, le nombre de défaillances possibles augmente considérablement, il est donc difficile de prévoir ce qui va se passer suite à la défaillance d'un ou de plusieurs modules [Mar-05].

II.5 Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux

II.5.1 Structure

Les convertisseurs véhiculant des puissances élevées voient les composants qui les constituent subir des contraintes considérables lors de la commande à l'ouverture ainsi qu'à la fermeture. L'idée est de garder une puissance élevée sans pour autant sur dimensionner les interrupteurs et d'associer des structures en séries au niveau de la partie concernant la conversion continue-alternative. L'association en série de convertisseurs, certes, rend l'analyse des phénomènes relatifs à l'interaction plus complexe, mais offre en contre partie une distribution raisonnable et acceptable des contraintes. Grâce à cette mise en série, les contraintes dues aux phénomènes de commutation sollicitant les interrupteurs sont abaissées de moitié. Pour éviter les problèmes de ce type de groupement, on commence à utiliser les onduleurs multi niveaux [Abd-04].

La figure (II.2) montre le circuit de puissance de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC (Neutral point clamping). Chaque bras de l'onduleur est constitué de quatre paires (Diode - Transistor) représentant chacune un interrupteur bidirectionnel en courant et deux diodes médianes permettant d'avoir le niveau zéro de la tension de sortie de l'onduleur. Cette structure impose l'utilisation des interrupteurs commandables à l'amorçage et au blocage. Dans notre cas, on utilisera des IGBT en antiparallèle avec des diodes.

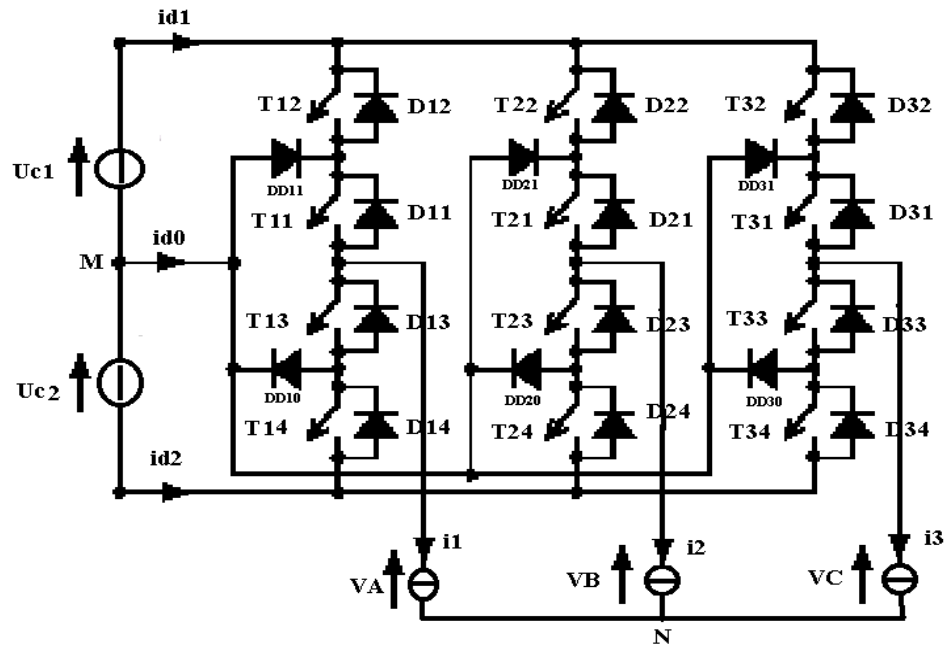


Figure II. 2. Onduleur à trois niveaux à structure NPC.

II.5.2 Différentes configurations d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

La figure (II.3) représente la structure d'un bras d'onduleur à trois niveaux. Le bras concerné est désigné par la lettre k . Les courants i_{d0} , i_{d1} et i_{d2} fixent le sens de transfert d'énergie de l'élément conducteur (transistor-diode).

Lorsque la source réseau est génératrice et la source de courant en sortie est réceptrice, la liaison des deux sources s'effectue à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la sortie vers l'entrée, ce sont les diodes qui assurent le passage du courant.

Pour décrire les différentes séquences de fonctionnement du convertisseur regardons d'abord les valeurs que peut prendre une tension simple V_{AM} . Cette tension est totalement définie par l'état des quatre interrupteurs du bras.

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles. La figure (II.4) représente ces différentes configurations ($U_{c1}=U_{c2}=U_c$) [Abd-04].

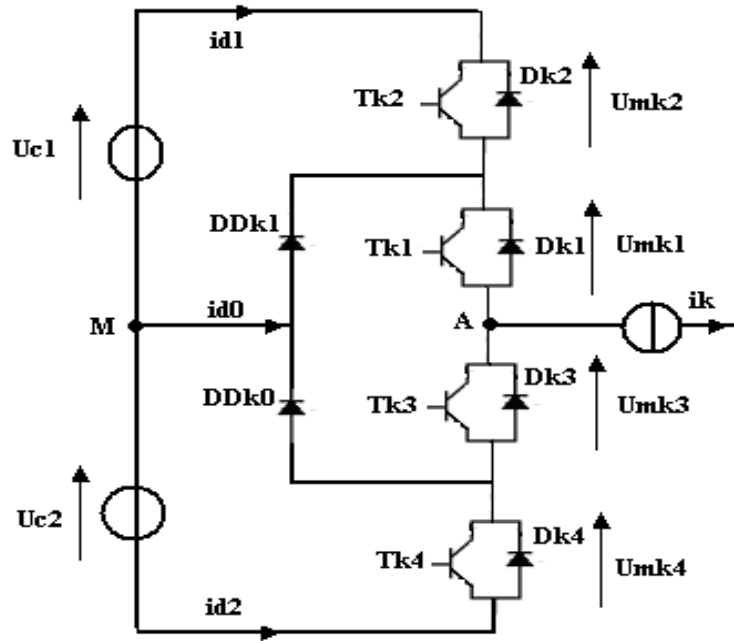


Figure II. 3. Bras d'onduleur à trois niveaux.

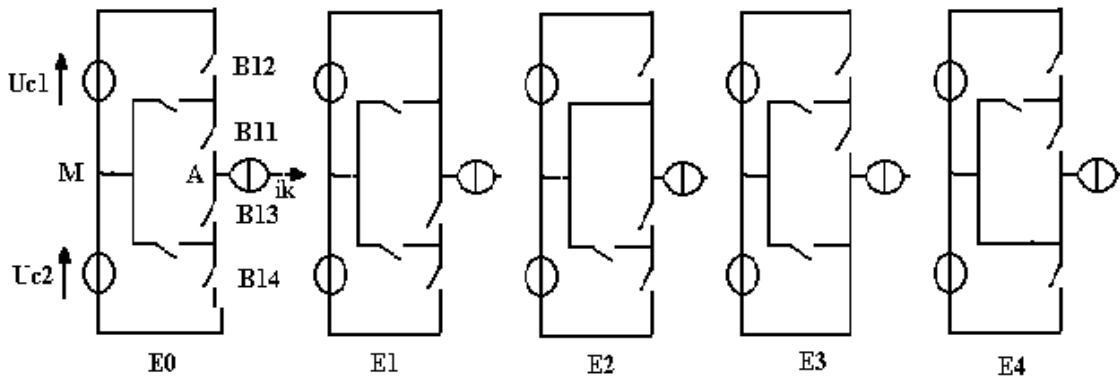


Figure II. 4. Différentes configurations possibles du fonctionnement d'un bras.

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans le tableau (II.2) (avec M origine des potentiels et V_K le potentiel du nœud k du bras k). Pour la configuration E_0 , le potentiel V_K dépend de la charge.

Cette analyse montre que la structure du convertisseur à trois niveaux limite à $U_c/2$ la tension imposée à chaque interrupteur lorsqu'il est bloqué, alors que dans le cas de la structure

classique, onduleur à deux niveaux, cette tension vaut la tension continue complète U_c . C'est cette caractéristique qui permet de monter en tension et en puissance dans le cas de l'onduleur à trois niveaux [Gaa-00].

E_0	$i_k = 0$
E_1	$V_k = + U_{c1} = U_c$
E_2	$V_k = 0$
E_3	$V_k = - U_{c2} = - U_c$
E_4	$V_k = 0$

Tableau II.2. Grandeurs électriques caractérisant chacune des configurations.

II.5.3 Modèle de commande des onduleurs à trois niveaux

II.5.3.1 Commandabilité des convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est dit en mode commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et par suite une conduction continue de ce convertisseur [Ber-95].

II.5.3.2 Commande complémentaire des onduleurs à trois niveaux

Afin d'avoir un fonctionnement totalement commandable qui permet à l'onduleur de délivrer les trois niveaux de tension désirés, on doit le faire fonctionner avec son mode commandable. Trois commandes complémentaires peuvent être appliquées sur un bras [Ber-95.1].

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k3} = \overline{B_{k4}} \end{array} \right. , \quad \left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k3}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k4}} \end{array} \right. , \quad \left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{array} \right.$$

Il a été démontré [Ber-95] que la commande donnée par la relation (II.1) est celle qui donne les trois niveaux U_{c1} , 0 et $-U_{c2}$ de façon optimale, qui permet donc le fonctionnement en mode commandable, mais après l'élimination du cas inconnu (Tableau (II. 3)).

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{array} \right. \quad (\text{II. 1})$$

Le tableau (II. 2) Montre la table d'excitation associée à cette commande complémentaire.

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{k1} = \overline{B_{k4}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k3}} \end{array} \right. \quad (\text{II. 1})$$

Le tableau (II. 3) Montre la table d'excitation associée à cette commande complémentaire.

B_{k1}	B_{k2}	B_{k3}	B_{k4}	V_k
0	0	1	1	$-U_{c2}$
0	1	0	1	Inconnue
1	0	1	0	0
1	1	0	0	U_{c1}

Tableau II.3. Table d'excitation associée à la commande complémentaire proposée.

B_{ki} : commande de la base du transistor T_{ki}

Les fonctions de connexion des interrupteurs du bras K sont liées par les relations

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \quad (\text{II. 2})$$

On définit une fonction de connexion du demi-bras qu'on notera F_{km}^b avec k : numéro du bras, m=1 pour le demi-bras du haut, et m=0 pour le demi-bras du bas [Ber-95].

Pour un bras k, les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases} \quad (\text{II. 5})$$

F_{k1}^b Est associée au demi-bras du haut (la paire (T_{DK1}, T_{DK2})) et F_{k0}^b au demi-bras du bas (la paire (T_{DK3}, T_{DK4})).

Le système d'équation (II.5) montre que la fonction de connexion du demi-bras F_{km}^b vaut 1 dans le cas où les deux interrupteurs du demi-bras associés à F_{km}^b sont tous fermés, et nulle dans tous les autres cas.

II.5.3.3 Etats d'un bras de l'onduleur

En mode commandable, chaque bras de l'onduleur à trois états possibles Figure (II.5)

Etat P: Les deux interrupteurs du haut B_{k1} et B_{k2} sont fermés, tandis que les deux interrupteurs du bas B_{k3} et B_{k4} sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (M) est U_{c1} .

Etat O: Les deux interrupteurs du milieu B_{k1} et B_{k3} sont fermés, tandis que les deux interrupteurs des extrémités B_{k2} et B_{k4} sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (M) est 0.

Etat N: Les deux interrupteurs du bas B_{k3} et B_{k4} sont fermés, tandis que les deux interrupteurs du haut B_{k1} et B_{k2} sont ouverts. La tension de sortie par rapport au neutre de la source (M) est $-U_{c2}$ [Lai-96].

II.5.3.4 Etats de l'onduleur

Chaque bras de l'onduleur peut prendre trois états. Ainsi l'onduleur triphasé a $3^3=27$ états possibles. Ces états sont identifiés en indiquant les états des trois bras. Par exemple, l'état PON indique que le premier bras est à l'état P, le deuxième est à l'état O, et le troisième est à l'état N. La Figure (II.6) résume les états de l'onduleur triphasé à trois niveaux [Lal-09].

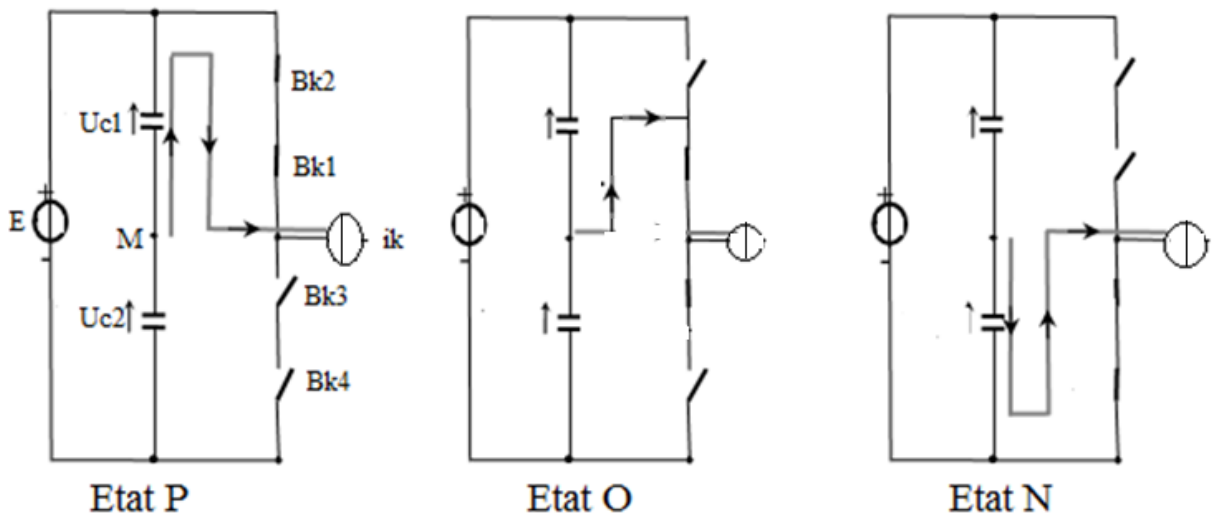


Figure II. 5. Etats d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.

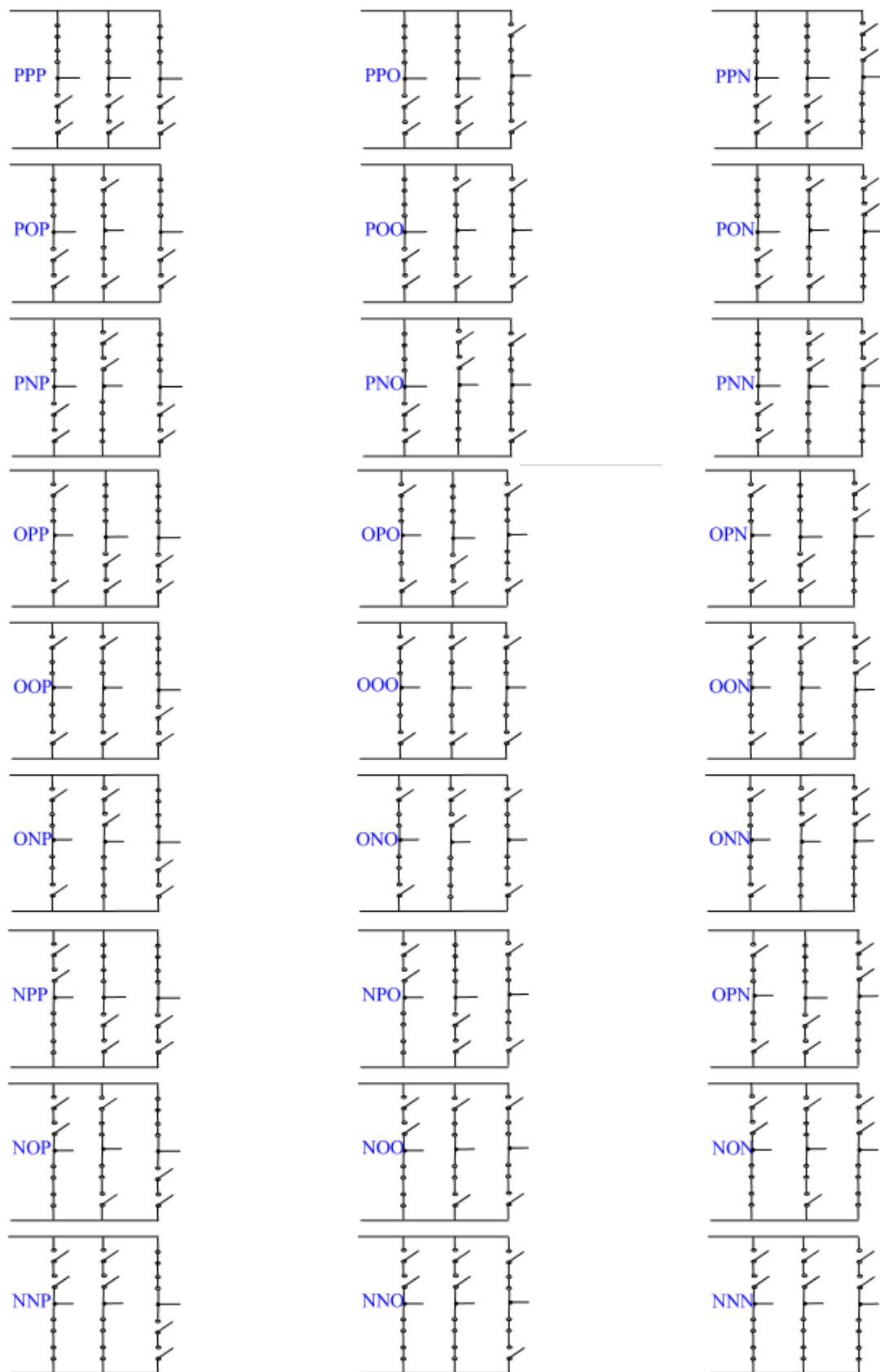


Figure II. 6. Etats de l'onduleur.

II.5.4 Fonction de conversion

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point M de la source de tension d'entrée, sont donnés par le système suivant : (on suppose $U_{c1}=U_{c2}=U_c$).

$$\begin{aligned} V_{AM} &= F_{11}F_{12}U_{c1} - F_{13}F_{14}U_{c2} = (F_{11}F_{12} - F_{13}F_{14})U_c \\ V_{BM} &= F_{21}F_{22}U_{c1} - F_{23}F_{24}U_{c2} = (F_{21}F_{22} - F_{23}F_{24})U_c \\ V_{CM} &= F_{31}F_{32}U_{c1} - F_{33}F_{34}U_{c2} = (F_{31}F_{32} - F_{33}F_{34})U_c \end{aligned} \quad (\text{II. 6})$$

On constate d'après le système (II. 6), que l'onduleur de tension à trois niveaux est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux en série.

Les différentes fonctions de connexion des demi bras définies selon la relation (II-5) sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{11}^b = F_{11} \cdot F_{12} \\ F_{10}^b = F_{13} \cdot F_{14} \end{array} \right. , \quad \left\{ \begin{array}{l} F_{21}^b = F_{21} \cdot F_{22} \\ F_{20}^b = F_{23} \cdot F_{24} \end{array} \right. , \quad \left\{ \begin{array}{l} F_{31}^b = F_{31} \cdot F_{32} \\ F_{30}^b = F_{33} \cdot F_{34} \end{array} \right. \quad (\text{II.7})$$

En introduisant l'expression de ces dernières dans les tensions d'entrée, on aboutit à :

$$\begin{aligned} V_{AM} &= F_{11}^b U_{c1} - F_{10}^b U_{c2} = (F_{11}^b - F_{10}^b)U_c \\ V_{BM} &= F_{21}^b U_{c1} - F_{20}^b U_{c2} = (F_{21}^b - F_{20}^b)U_c \\ V_{CM} &= F_{31}^b U_{c1} - F_{30}^b U_{c2} = (F_{31}^b - F_{30}^b)U_c \end{aligned} \quad (\text{II. 8})$$

Les tensions simples sont données comme suit (avec $U_{c1}=U_{c2}=U_c$) :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_c \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Pour les courants, on peut écrire la relation donnant les courants d'entrée i_{d1} et i_{d2} en fonction des courants i_1 , i_2 et i_3 de la charge en utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{22} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{32} \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{13} \cdot F_{14} \cdot i_1 + F_{23} \cdot F_{24} \cdot i_2 + F_{33} \cdot F_{34} \cdot i_3 \end{cases}$$

(II.10)

En utilisant les fonctions de connexion des demi-bras, le système (II.10) s'écrit :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_1 + F_{21}^b \cdot i_2 + F_{31}^b \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_1 + F_{20}^b \cdot i_2 + F_{30}^b \cdot i_3 \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Le courant i_{d0} , dans le cas de la commande complémentaire proposée, est lié aux différents courants de l'onduleur triphasé à trois niveaux par la relation suivante :

$$i_{d0} = F_{11} \cdot F_{13} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{23} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{33} \cdot i_3 \quad (\text{II.12})$$

En introduisant les équations (II.2) et (II.10), le courant i_{d0} peut s'écrire comme suit :

$$i_{d0} = i_1 + i_2 + i_3 - i_{d1} - i_{d2} \quad (\text{II.13})$$

La relation (II.12) peut être aussi exprimée en utilisant les fonctions de connexion des demi-bras comme indiqué ci-dessous :

$$i_{d0} = (i_1 + i_2 + i_3) - (F_{11}^b + F_{10}^b)i_1 - (F_{21}^b + F_{20}^b)i_2 - (F_{31}^b + F_{30}^b)i_3 \quad (\text{II.14})$$

II.6 Stratégie de la modulation triangulo-sinusoidale bipolaire à une porteuse

II.6.1 Principe

Le principe de cette technique consiste à comparer un signal triangulaire (U_p) d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure appelée porteuse, au trois signaux sinusoidaux (V_{ref1} , V_{ref2} , V_{ref3}), d'amplitude variable et de fréquence f_{ref} appelée référence.

L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs. [Zem-10].

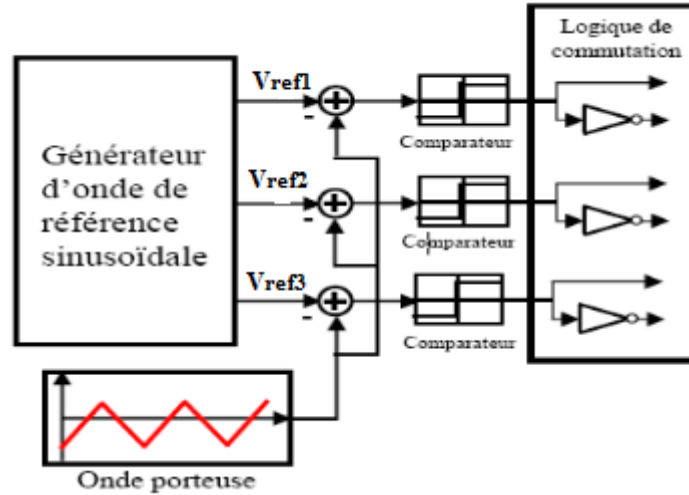


Figure II. 7. schéma de principe de la technique triangulo-sinusoidale.

Cette stratégie est basée, dans son principe sur la modulation sinusoidale naturelle. Pour un onduleur à deux niveaux, elle recommande l'utilisation de un signal triangulaire d'une fréquence f_c et d'amplitude U_{pm} . Ce signal triangulaire est comparé, pour chaque phase avec un signal de référence d'amplitude V_m et de fréquence f_{ref} . C'est la modulation triangulo-sinusoidale bipolaire à une porteuse.

La figure (II.8) représente le principe de la modulation triangulo-sinusoidale bipolaire à une porteuse. Une porteuse est utilisé, avec trois signaux de référence, pour générer la commande de chaque phase. [Ben-10]

II.6.2 Algorithme de la stratégie pour la modulation triangulo-sinusoidale

Les tensions de référence (modulantes) de l'onduleur triphasé, permettant de générer un système de tension triphasé équilibré [Ben-10]

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{ref2} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{ref3} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (II-15)$$

Avec : $\omega = 2\pi f_{ref}$ et $V_m = r \cdot U_{pm}$

$U_{pm} = 1$.

r : taux de modulation ($0 < r < 1$)

Le signal de la porteuse est donné par le système suivant

$$U_{p1}(t) = \begin{cases} 2 \cdot U_{pm} \frac{t}{T_p} & ; 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ 2 \cdot U_{pm} \left(1 - \frac{t}{T_p}\right) & ; \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (II-16)$$

Avec : $T_p=1/f_c$ et $f_c= m*f_{ref}$

m : indice de modulation

L'algorithme de commande de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses pour un bras k de l'onduleur triphasé à trois niveaux est donnée par le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } V_{ref} > U_{p1} \quad V_{kM} = 1 \\ \text{si non} \quad V_{kM} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{II-17})$$

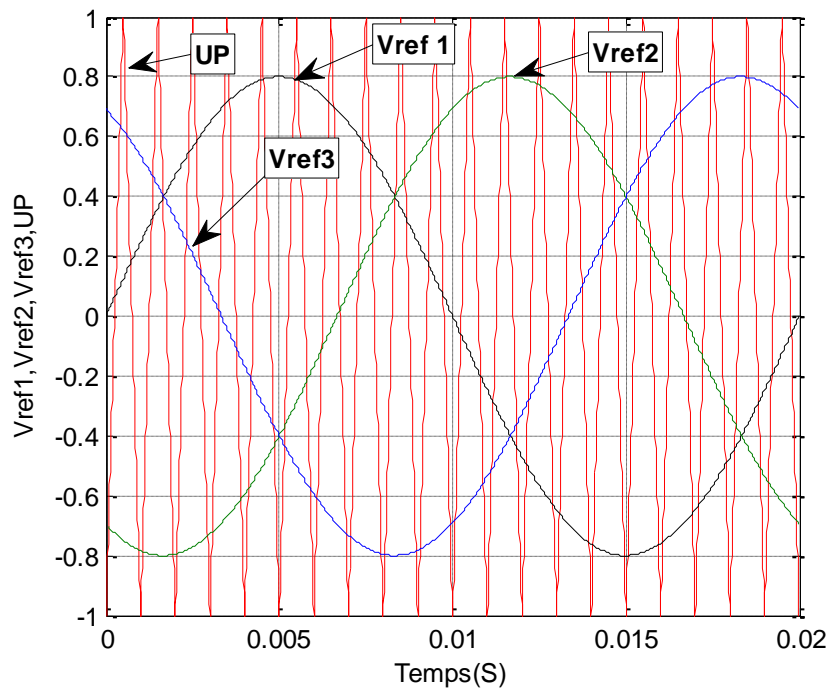


Figure II. 8.: Tensions des références avec la porteuse bipolaire pour $r=0.8$ et $m=10$.

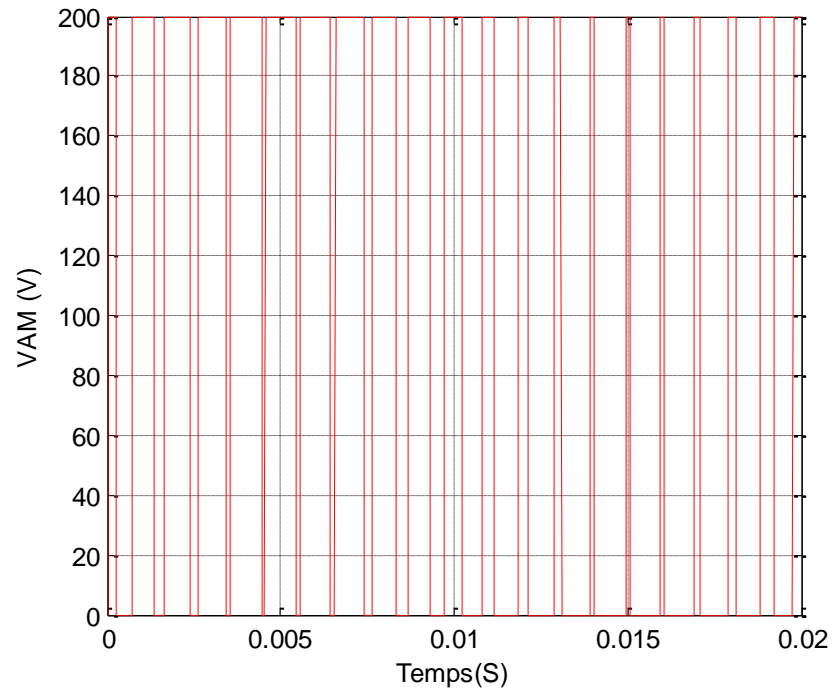
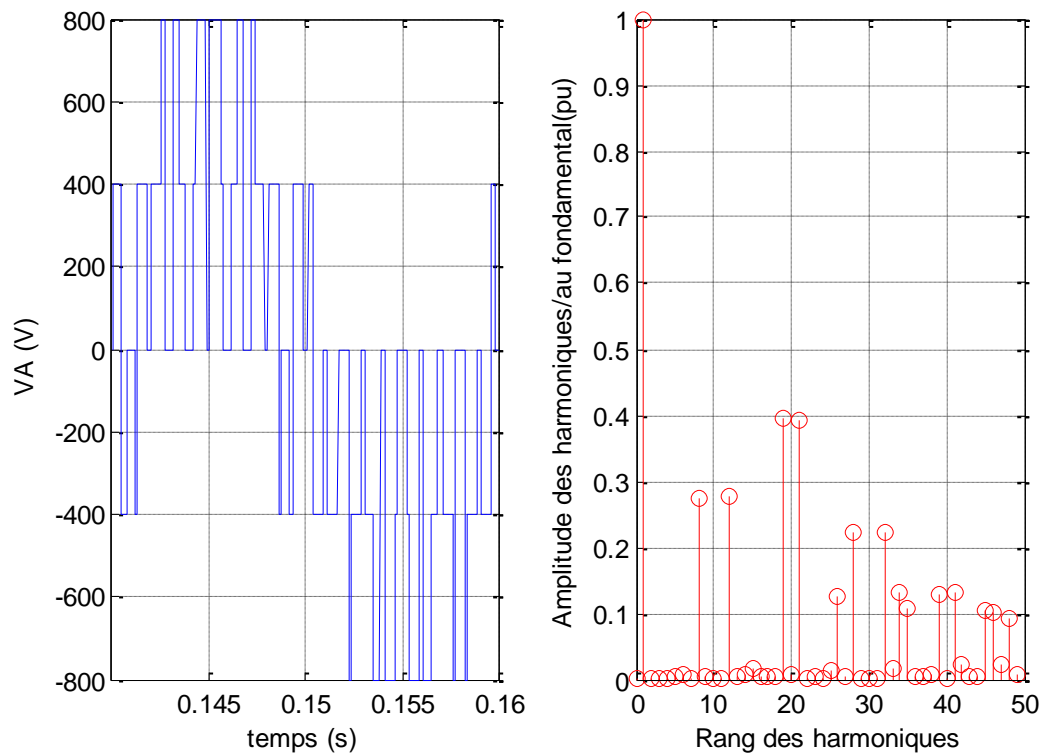
II.6.3 Simulation

Logiciel Matlab « program » a été utilisé pour simulé le système. Avec les paramètres suivant $U_c=200$ V, $R=50\Omega$, $r=0.9$.

La figure (II.9) présenter la tension de premier bras V_{AM} cette tension possède deux niveaux de tension U_c et 0.

La tension de sortie de la première phase de l'onduleur V_A ainsi que le spectre harmonique sous présentés par les figures (II.10) (a) et (b). On remarque que les harmoniques sont concentrés autour de la fréquence 500Hz pour $m=10$.

Les figures (II.11) (a)et (b) présentent la tension de sortis de la première phase de l'onduleur V_A ainsi que son spectre harmonique pour $r=0.8$ et $m=20$. On remarque les harmoniques sont repoussés vers les ronds élevés (1 kHz).

Figure II. 9. Tension de premier bras V_{AM} pour $r=0.8$ et $m=20$.Figure II. 10. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=10$, $THD= 0.82$.

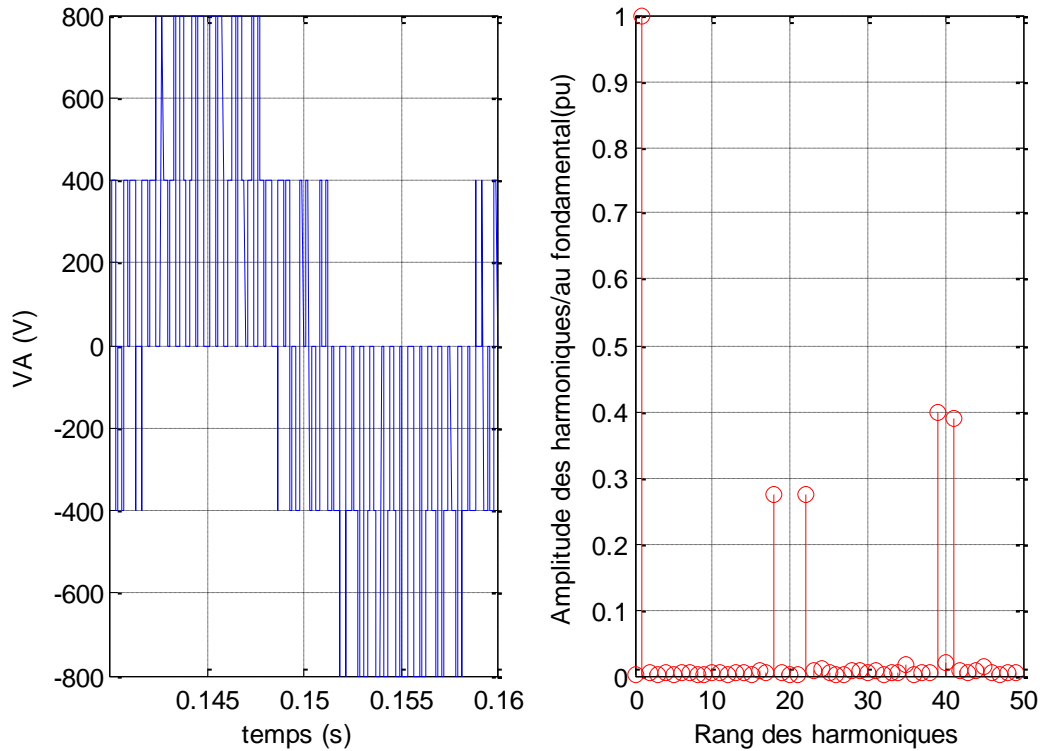


Figure II. 11. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=20$, $THD= 0.68$.

II.7 Stratégie de la modulation triangulo-sinusoïdale bipolaire à deux porteuses

Cette stratégie est basée, dans son principe sur la modulation sinusoïdale naturelle. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires inverser de même fréquence f_c et de même amplitude U_{pm} . Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase avec un signal de référence d'amplitude V_m et de fréquence f_{ref} . C'est la modulation triangulo-sinusoïdale bipolaire à deux porteuses.

La figure (II.12) représente le principe de la modulation triangulo-sinusoïdale bipolaire à deux porteuses. Deux porteuses sont utilisées, avec trois signaux de référence, pour générer la commande de chaque phase.

II.7.1 Algorithme de la stratégie pour la modulation triangulo-sinusoïde

Les tensions de référence (modulantes) de l'onduleur triphasé, permettant de générer un système de tension triphasé équilibré [Ben-10]

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{ref2} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{ref3} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (II-18)$$

Avec : $\omega = 2\pi f_{ref}$ et $V_m = r \cdot U_{pm}$

$U_{pm} = 1$.

r : taux de modulation ($0 < r < 1$)

Le signal de la porteuse est donné par le système suivant

$$U_{p1}(t) = \begin{cases} 2 \cdot U_{pm} \frac{t}{T_p} & ; 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ 2 \cdot U_{pm} \left(1 - \frac{t}{T_p}\right) & ; \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (II-19)$$

$$U_{p2}(t) = -U_{p1}$$

Avec : $T_p = 1/f_c$ et $f_c = m \cdot f_{ref}$

m : indice de modulation

L'algorithme de commande de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses pour un bras k de l'onduleur triphasé à trois niveaux est donnée par le système suivant :

$$\begin{cases} \text{si } V_{ref} > U_{p1} & V_{kM} = 1 ; \text{ si non } V_{kM} = 0 \\ \text{si } V_{ref} > U_{p2} & V_{kM} = 0 ; \text{ si non } V_{kM} = -1 \end{cases} \quad (II-20)$$

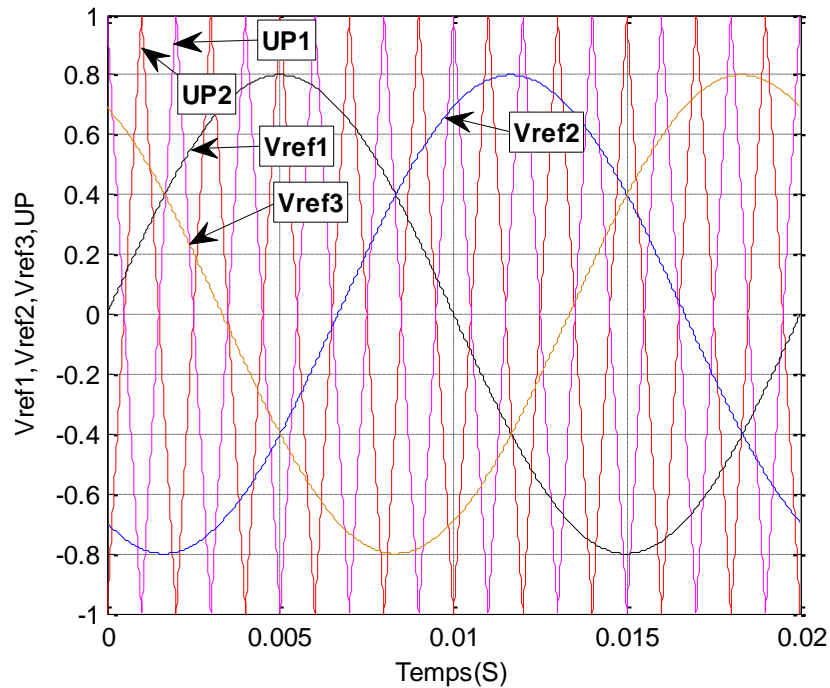


Figure II. 12. Tensions de références avec les porteuses bipolaire pour $r=0.8$ et $m=10$.

II.7.2 Simulation

Logiciel Matlab « program » a été utilisé pour simuler le système. Avec les paramètres suivants $U_{c1}=U_{c2}=200$ V , $R=50\Omega$, $r=0.9$.

La figure (II.13) présenter la tension de premier bras V_{AM} cette tension possède trois niveaux de tension U_{c1} , 0 et $-U_{c2}$.

La tension de sortie de la première phase de l'onduleur V_A ainsi que le spectre harmonique sont présentés par les figures (II.14) (a) et (b). On remarque que les harmoniques sont concentrés autour de la fréquence 500 Hz pour $m=5$.

Les figures (II.15) (a)et (b) présentent la tension de sortie de la première phase de l'onduleur V_A ainsi que son spectre harmonique pour $r=0.8$ et $m=10$. On remarque les harmoniques sont repoussés vers les ronds élevés (1 kHz).

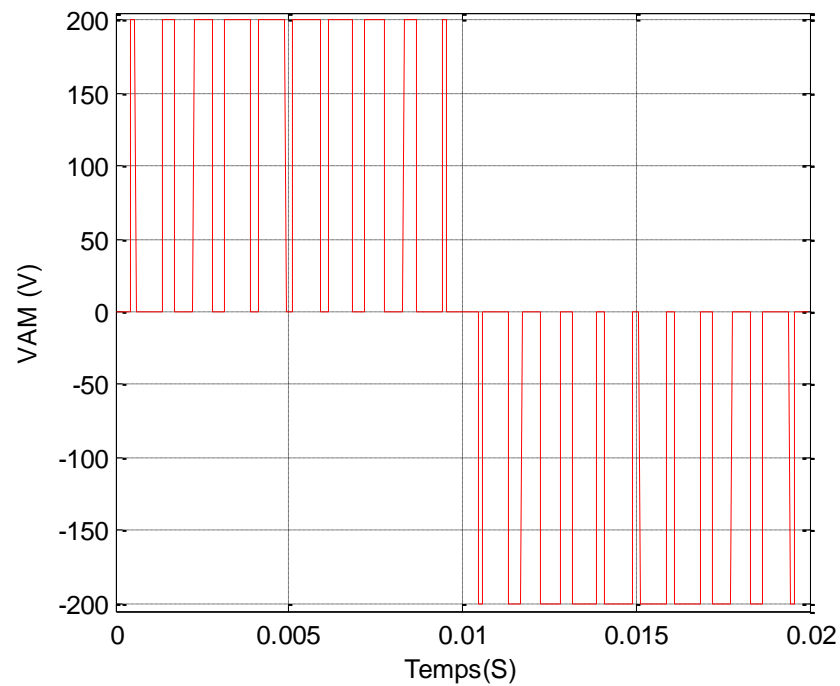


Figure II. 13. Tension de premier bras V_{AM} pour $r=0.8$ et $m=5$.

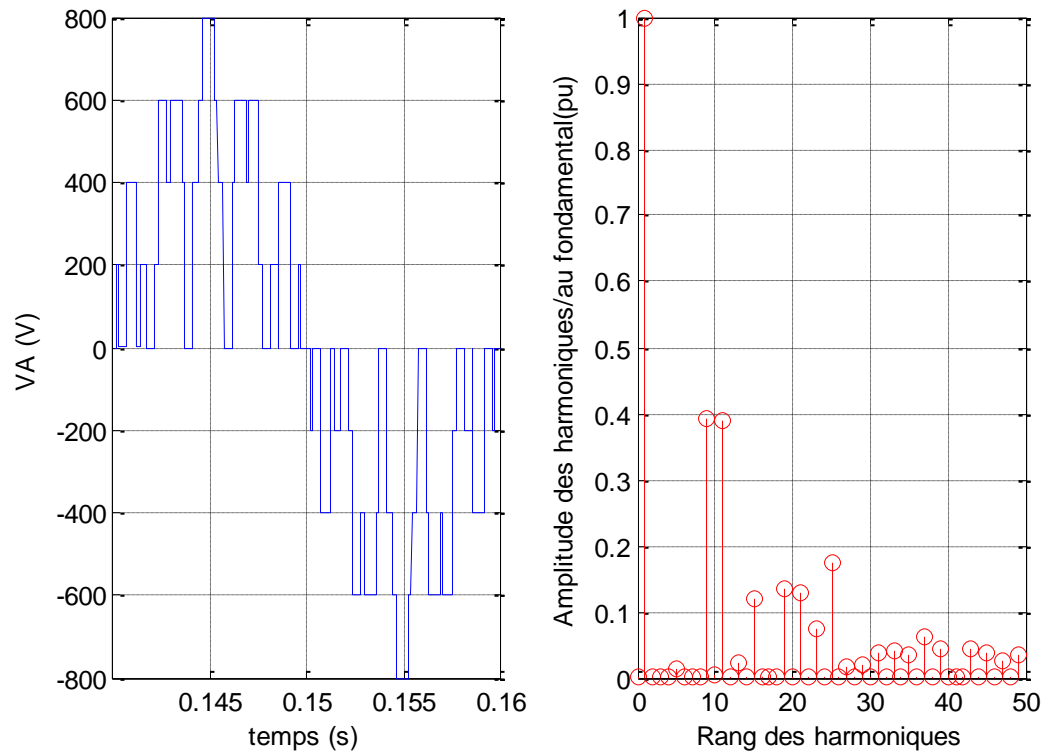


Figure II. 14. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=5$, THD= 0.63.

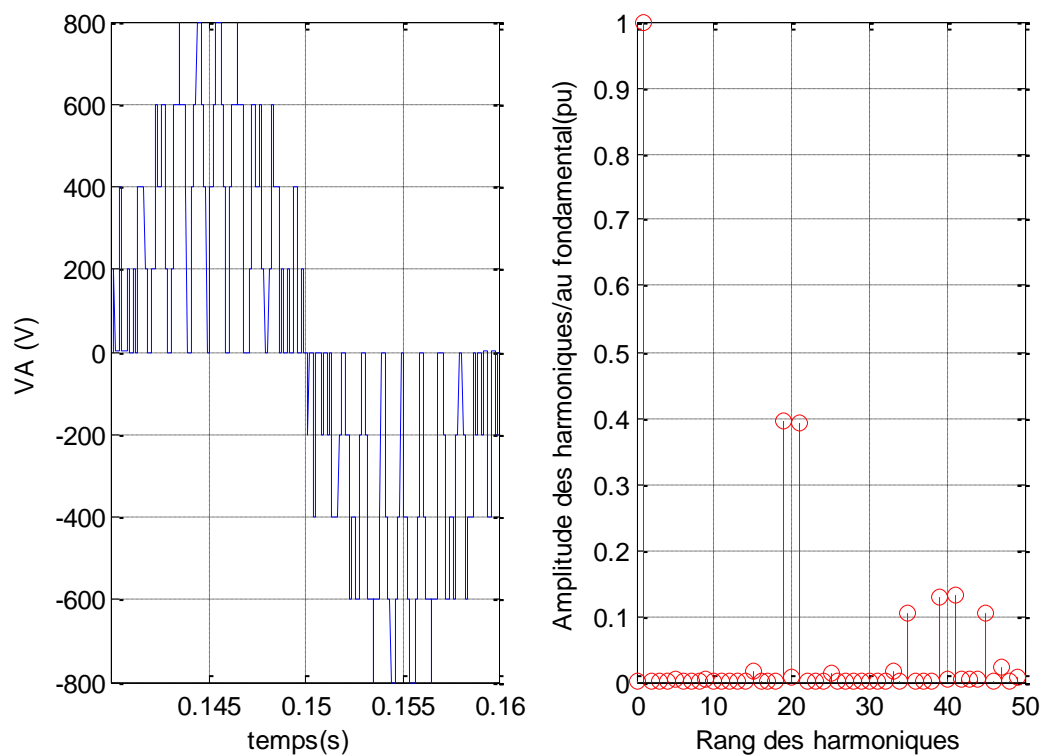


Figure II. 15. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=10$, THD= 0.60.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle de l'onduleur à deux niveaux ainsi que le modèle de l'onduleur à trois niveaux, nous terminons par la stratégie de la modulation triangulo-sinusoidale bipolaire à une porteuse et à deux porteuse. Nous conclure les résultats de simulation par le tableau suivant.

Onduleur	THD	Commande	Stratégie
2 niveaux	Mauvais	Simple	Simple 6 interrupteurs
3 niveaux	Bon	Complexe	Complexe 12 interrupteurs 6 diodes

Tableau II.4. Etude comparative entre deux onduleurs.

II.1 Introduction

Après avoir présentés le modèle de l'onduleur à deux et à trois niveaux ainsi que la stratégie de la modulation triangulo-sinusoïdale bipolaire à une et deux porteuses, nous présentons dans ce chapitre la modulation de de largeur d'impulsion vectorielle de l'onduleur à trois niveaux.

Nous commencerons par présentés le diagramme vectoriel ainsi que le vecteur de référence de ce diagramme, par la suite nous intéressons à l'application de séquence des états de l'onduleur. En fin nous terminons par la simulation de ce programme.

III.2 Diagramme vectoriel

On définit le vecteur de tension de sortie V_s par:

$$V_s = V_{AM}e^{j0} + V_{BM}e^{-j2\pi/3} + V_{CM}e^{j2\pi/3} \quad (\text{III-1})$$

On effectue le passage du plan triphasé au plan biphasé stationnaire d-q :

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{pmatrix} \quad (\text{III-2})$$

Dans le repère stationnaire d-q, le vecteur V_s s'écrit:

$$V_s = V_d + jV_q \quad (\text{III-3})$$

Ce vecteur prend dix-huit positions discrètes ainsi que le vecteur nul dans le plan d-q suivant les états de l'onduleur. Ces positions sont indiquées sur le diagramme vectoriel de l'onduleur Figure (III-1). Ils sont rangées sur deux hexagones: douze positions sur l'hexagone externe (correspondantes aux états PNN, PON, PPN, OPN, NPN, NPO, NPP, NOP, NNP, ONP, PNP et PNO), six positions sur l'hexagone interne (correspondantes aux états (POO-ONN), (PPO-ONN), (OPO-NON), (OPP-NOO), (OOP-NNO) et (POP-ONO)), en plus d'une position à l'origine du diagramme, correspondante aux états PPP, OOO et NNN. Chaque position sur l'hexagone interne est produite par deux états distincts. Ces états sont appelés états redondants, et les vecteurs correspondants sont appelés vecteurs redondants [Cel-01].

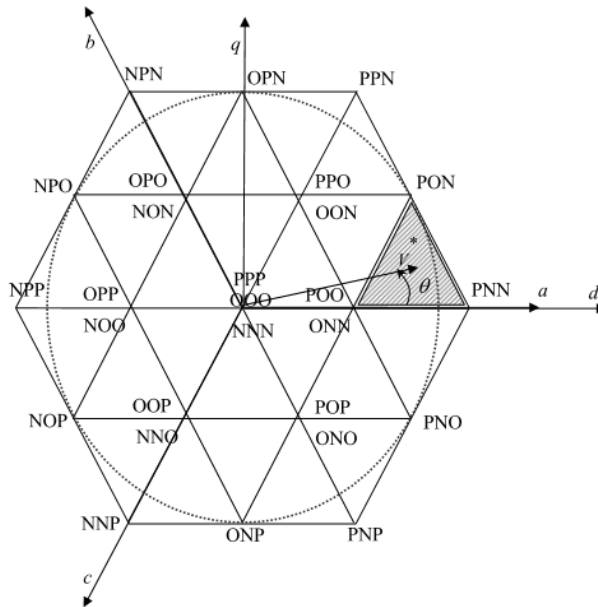


Figure III. 1. Diagramme vectoriel de l'onduleur à trois niveaux.

Le vecteur		Module M	L'angle θ	Le vecteur		Module M	L'angle θ
V ₁	PPP	0	0	V ₁₅	OON	1	60
V ₂	PPO	1	60	V ₁₆	ONP	$\sqrt{3}$	270
V ₃	PPN	2	60	V ₁₇	ONO	1	300
V ₄	POP	1	300	V ₁₈	ONN	1	0
V ₅	POO	1	0	V ₁₉	NPP	2	180
V ₆	PON	$\sqrt{3}$	30	V ₂₀	NPO	$\sqrt{3}$	150
V ₇	PNP	2	300	V ₂₁	NPN	2	120
V ₈	PNO	$\sqrt{3}$	330	V ₂₂	NOP	$\sqrt{3}$	210
V ₉	PNN	2	0	V ₂₃	NOO	1	180
V ₁₀	OPP	1	180	V ₂₄	NON	1	120
V ₁₁	OPO	1	120	V ₂₅	NNP	2	240
V ₁₂	OPN	$\sqrt{3}$	90	V ₂₆	NNO	1	240
V ₁₃	OOP	1	240	V ₂₇	NNN	0	0
V ₁₄	OOO	0	0				

Tableau III.1. Vecteurs des tensions sorties V_s dans le plan a, b, c.

Les positions discrètes du vecteur de tension de sortie V_s divise le diagramme vectoriel en six secteurs triangulaires, les sommets de ces secteurs triangulaires étant l'origine du diagramme

vectoriel et les apex de l'hexagone externe. Chaque secteur est composé de quatre régions triangulaires Figure (III.2) On a ainsi 24 régions dans la totalité du diagramme vectoriel [Cel-02].

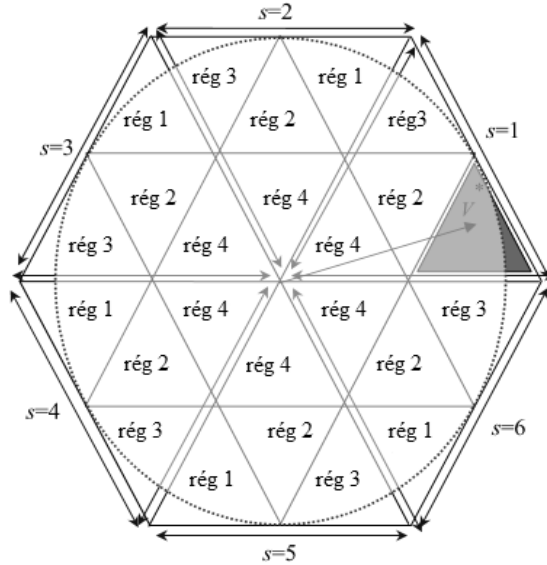


Figure III. 2.Régions du diagramme vectoriel

A partir des tensions de référence triphasées V_{ref1} , V_{ref2} et V_{ref3} équation (II-15) on définit le vecteur de tension de référence:

$$\begin{aligned}
 V_s^* &= V_{ref1}e^{j0} + V_{ref2}e^{-\frac{j2\pi}{3}} + V_{ref3}e^{\frac{j2\pi}{3}} \\
 &= V_d^* + jV_q^* \\
 V_s^* &= V_m e^{\theta}
 \end{aligned} \tag{III-4}$$

V_d^* , V_q^* composantes du vecteur V_s^* dans le plan d-q.

r ($0 \leq r \leq 1$): taux de modulation

$V_m = \sqrt{3} \cdot r$ ($0 \leq V_m \leq \sqrt{3}$) Amplitude maximale du vecteur V_s^*

θ : Position angulaire du vecteur V_s^* dans le plan d-q.

A partir des coordonnées V_d^* , V_q^* et de la position angulaire θ , on déduit dans quel secteur s , et dans quelle région se situe le vecteur V_s^* dans le plan d-q. Figure(III.2). Le secteur s triangulaire se déduit de la manière suivante:

$$s = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \theta \leq \pi/3 \\ 2 & \text{si } \pi/3 \leq \theta \leq 2\pi/3 \\ 3 & \text{si } 2\pi/3 \leq \theta \leq \pi \\ 4 & \text{si } \pi \leq \theta \leq 4\pi/3 \\ 5 & \text{si } 4\pi/3 \leq \theta \leq 5\pi/3 \\ 6 & \text{si } 5\pi/3 \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (\text{III-5})$$

La région triangulaire à l'intérieur de chaque secteur se déduit en utilisant les équations de ses trois côtés, le vecteur de référence normalisé se décompose dans les axes situés à zéro et soixante degrés, l'obtention des projections m_1 et m_2 , respectivement. [Pou-04].

Les longueurs des nouveaux vecteurs sont :

$$\begin{aligned} m_1 &= V_m \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \right) \\ m_2 &= 2V_m \frac{\sin \theta}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (\text{III-6})$$

Les figures (III.3) et (III.14) présentent la projection du vecteur de référence pour les quatre régions constituant le premier secteur. [Pou-04].

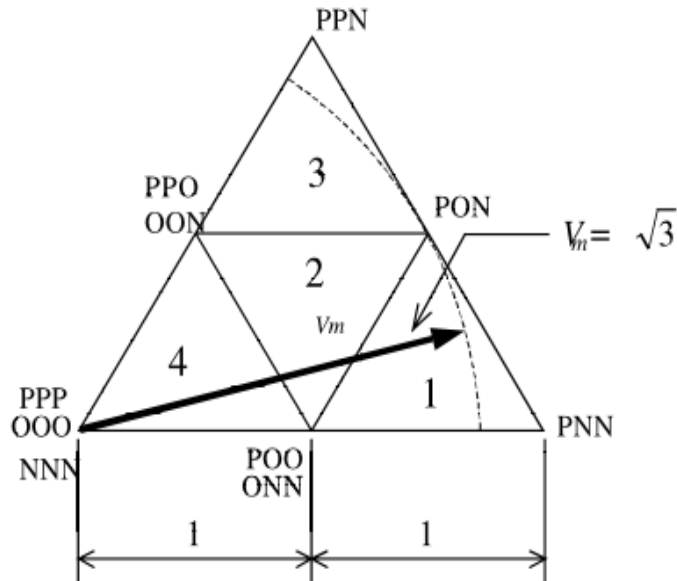


Figure III. 3.projection du vecteur de référence normalisé dans la première région.

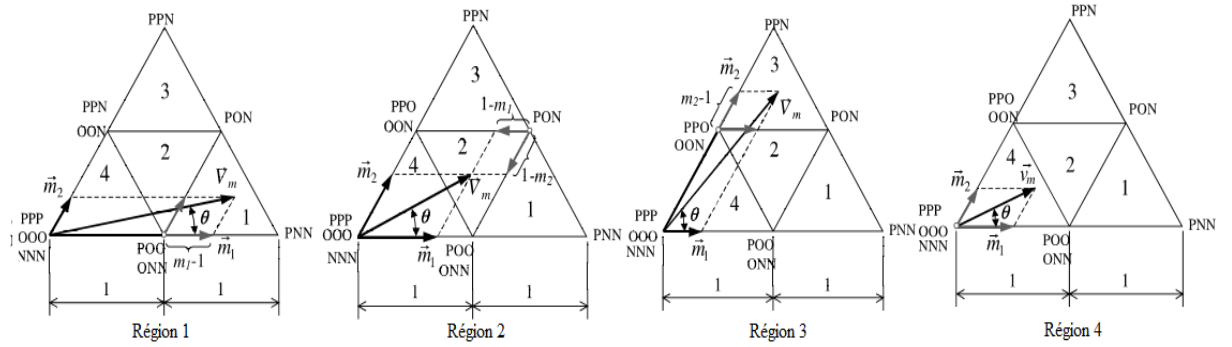


Figure III. 4. Les projections pour les régions 1, 2 et 3,4

On utilisant les valeurs de m_1 et m_2 calculé précédemment, on détermine la région comme indiqué dans le tableau (III.2).

Cas	Région	les cycles
$m_1 > 1$	1	$d_x = m_1 - 1$ $d_y = m_2$ $d_z = 2 - m_1 - m_2$
$m_1 \leq 1$ $m_2 \leq 1$ $m_1 + m_2 > 1$	2	$d_x = 1 - m_2$ $d_y = 1 - m_1$ $d_z = 1 + m_1 + m_2$
$m_2 > 1$	3	$d_x = m_1$ $d_y = m_2 - 1$ $d_z = 2 - m_1 - m_2$
$m_1 \leq 1$ $m_2 \leq 1$ $m_1 + m_2 < 1$	4	$d_x = 1 - m_2$ $d_y = 1 - m_1$ $d_z = 1 + m_1 + m_2$

Tableau III.2. Expressions de d_x , d_y et d_z pour le premier secteur.

III.3 Séquence des états de l'onduleur [Lal-09]

Sur une période d'échantillonnage T_s , le vecteur tension de référence V_s^* doit coïncider avec la moyenne des vecteurs v_x , v_y et v_z représentant les apex du triangle contenant V_s^* :

$$V_s^* = V_m e^{j\alpha} = \frac{T_x v_x + T_y v_y + T_z v_z}{T_s} = d_x v_x + d_y v_y + d_z v_z \quad (\text{III-7})$$

Avec :

α : c'est la position angulaire du vecteur V_s^* à l'intérieur d'un secteur $\alpha = \theta[\pi/3]$

T_x , T_y et T_z sont les durées d'application des vecteurs v_x , v_y et v_z respectivement à la sortie de l'onduleur. Ils sont reliés par l'équation:

$$T_x + T_y + T_z = T_s \text{ et } d_x + d_y + d_z = 1 \quad (\text{III-8})$$

Les vecteurs v_x , v_y et v_z dépendent de la position du vecteur V_s^* dans le plan d-q. Par exemple, le vecteur V_s^* représenté sur le diagramme vectoriel de la Figure (III.3) se situe dans la région 1 du secteur 1. ainsi, le vecteur v_x est celui généré par l'état PNN (appelé alors état x), le vecteur v_y est celui généré par l'état PON (appelé état y) et le vecteur v_z est celui généré par l'état POO (appelé z_1) ou l'état ONN (appelé z_2). La Figure (III.5) indique les états x, y et z pour les différentes régions du diagramme vectoriel [Cel-01].

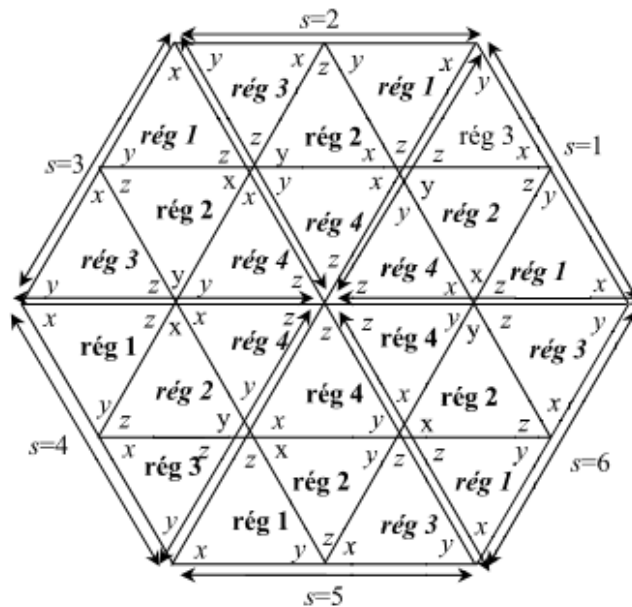


Figure III. 5. Etats x, y et z pour les différentes régions du diagramme vectoriel.

Ainsi, pour avoir des tensions de sortie V_A , V_B et V_C aussi proche que possible aux tensions de références sinusoïdales triphasées V_{ref1} , V_{ref2} et V_{ref3} on applique l'état x pendant une durée $d_x.T_s$, l'état y pendant une durée $d_y.T_s$, et l'état z pendant le reste de la période $d_z.T_s$.

Certains états, x, y et z sont des états redondants. Ils produisent les mêmes tensions de sortie V_A , V_B et V_C . Dans ce cas, on peut choisir l'état redondant à appliquer suivant plusieurs critères

- On résume l'algorithme de la modulation vectorielle de l'onduleur à trois niveaux. Cet algorithme consiste à effectuer les étapes suivantes:

- A partir des tensions de références V_{ref1} , V_{ref2} et V_{ref3} on déduit le vecteur tension de référence V_s^* et ces composantes V_d^* et V_q^* , ainsi que ses coordonnées polaires m et θ (III.4)
- A partir de m et θ on déduit le secteur s équation (III-2) et la région (tableau III.2) du diagramme vectorielle contenant le vecteur V_s^* .
- On déduit les états, x , y et z qu'on doit appliquer pour générer les tensions de sortie
- On déduit la durée d'application de chaque état.
- A partir du tableau (III.2), on déduit la séquence des états durant chaque période d'échantillonnage.
- A partir de cette séquence, on déduit l'état ouvert ou fermé de chaque interrupteur, à tout instant.

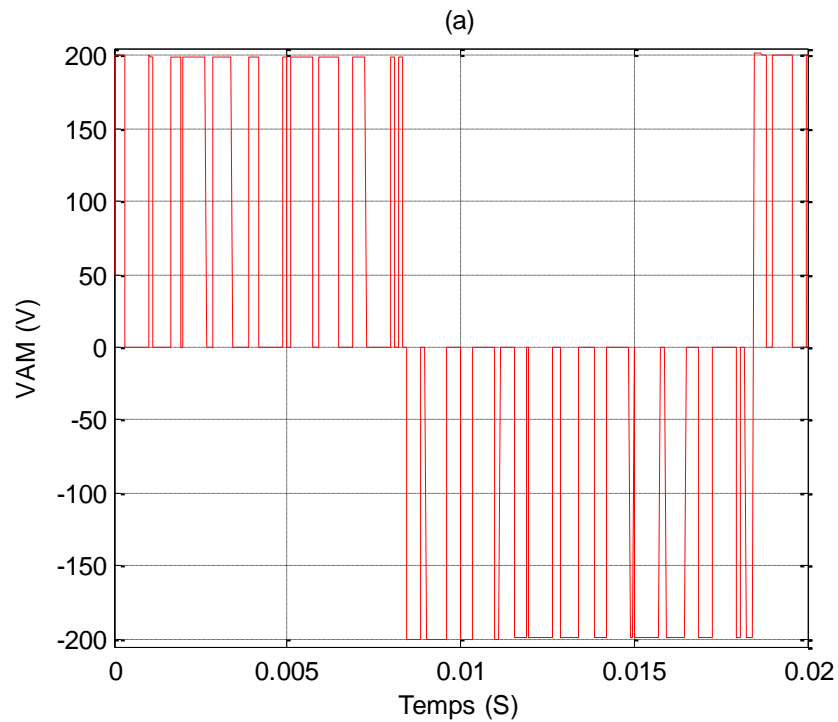
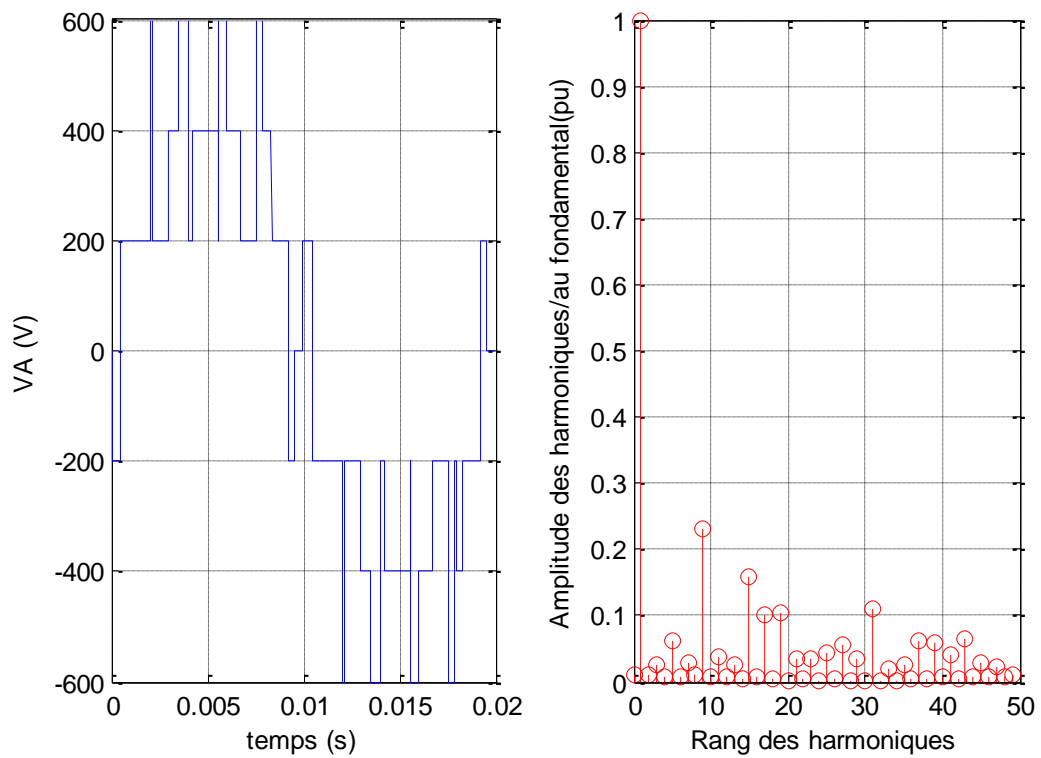
III.4 Simulation

On simule le système L'onduleur triphasé à trois niveaux commandé par modulation vectorielle pour ces paramètres $U_{c1}=U_{c2}=200V$ fixé, $r=0.9$, $R=50\Omega$.

La figure (III.6) présenter la tension du premier bras d'onduleur V_{AM} où les trois niveaux U_c , 0 , $-U_c$ sont clairement distingués.

La tension de sortie de la première phase de l'onduleur V_A ainsi que son spectre harmonique sont présentés par les figures (III.7). (a) et (b). L'analyse harmonique montre que le spectre n'est pas centré autour des multiples de la fréquence de commutation, mais il est distribué sur une large étendue de l'axe horizontal pour $m=10$.

Les figures (III.8). (a) et (b) présentent la tension de sortie de la première phase de l'onduleur V_A ainsi que son spectre harmonique pour $t=0.8$ et $f_c = 2$ kHz.

Figure III. 6. Tension de premier bras V_{AM} pour $r=0.8$ et $f_c=1$ kHz.Figure III. 7. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=10$, $THD=0.38$.

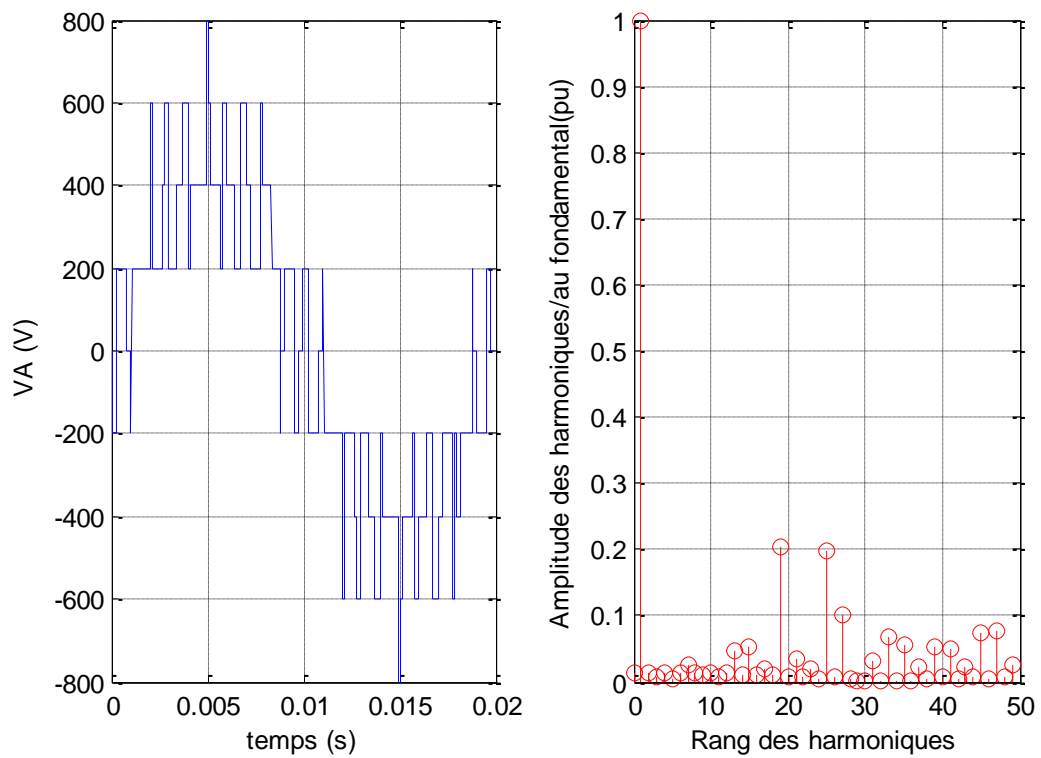


Figure III. 8. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=20$, $THD= 0.35$.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus de l'onduleur à trois niveaux commandé par la MLI vectorielle. Nous avons remarqué que cette dernière présente une meilleure qualité du signal de sortie par rapport à la stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuses. Dans le chapitre suivant, on va étudier le système photovoltaïque « association GPV-Onduleur » et en va appliquer les deux méthodes de la modulation.

IV.1 Introduction

Dans les précédant chapitre nous avons étudié les modèles du générateur PV ainsi que celui de l'onduleur à trois niveaux. Dans ce chapitre nous présentons l'association du GPV- onduleur comme présenté sur la figure (IV.1).

Nous commencerons par modéliser le filtre intermédiaire, par la suite les deux stratégies de commande, élaborer au précédant chapitre seront appliquées pour diffèrent indices de modulation et taux de réglage.

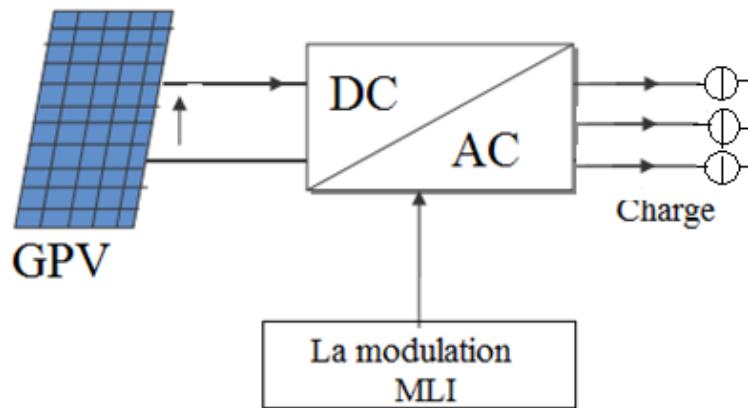


Figure IV. 1GPV-Onduleur-Charge..

IV.2 Modélisation du filtre intermédiaire

Dans cette partie on va déterminer les équations définissons la relation entre les tensions des condensateurs U_{c1} et U_{c2} en fonction de I_{pv} , et le courant I_{pv} en fonction de V_{pv} , i_{d1} , i_{d2} . Figure (IV.2).

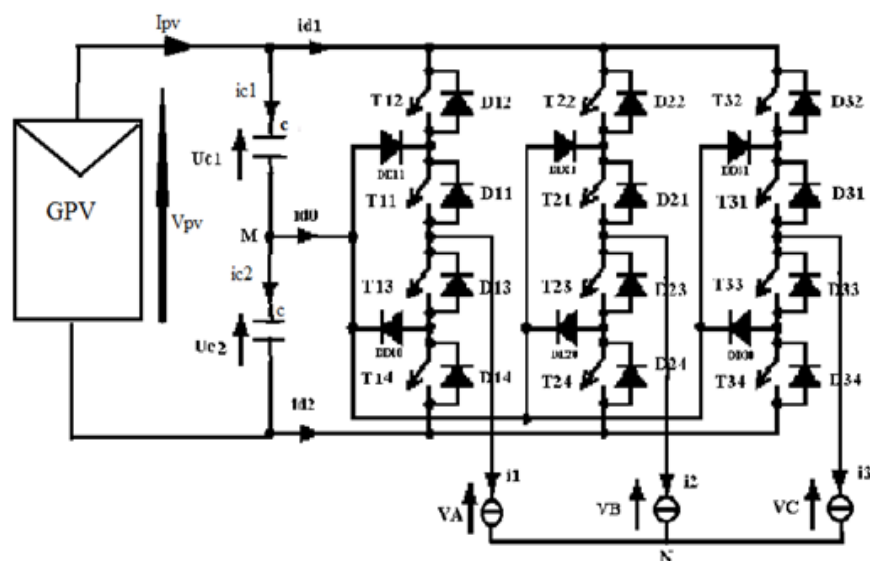


Figure IV. 2. Association GPV-Onduleur triphasé à trois niveaux – Charge.

On applique la loi des nœuds au filtre intermédiaire, on obtient :

$$\begin{aligned} i_{c1} &= I_{pv} - i_{d1} \\ i_{c2} &= I_{pv} + i_{d2} \end{aligned} \quad (IV-1)$$

Avec :

$$\begin{aligned} i_{c1} &= c \frac{dU_{c1}}{dt} \\ i_{c2} &= c \frac{dU_{c2}}{dt} \end{aligned} \quad (IV-2)$$

Sachant que :

$$V_{pv} = U_{c1} + U_{c2} \quad (IV-3)$$

On dérivant l'équation (IV-3) puis on multipliant ' c ', on obtient :

$$\begin{aligned} c \frac{dV_{pv}}{dt} &= c \frac{dU_{c1}}{dt} + c \frac{dU_{c2}}{dt} \\ c \frac{dV_{pv}}{dt} &= i_{c1} + i_{c2} \end{aligned} \quad (IV-4)$$

Donc on remplace le système (IV-1) dans (IV-4) on obtient :

$$c \frac{dV_{pv}}{dt} = 2 * I_{pv} - i_{d1} + i_{d2} \quad (IV-5)$$

On remplaçant I_{pv} par son expression (I-10) :

$$\begin{aligned} c \frac{dV_{pv}}{dt} &= 2 * \left\{ P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref})] \right. \\ &\quad \left. - \frac{V_G}{R_{sh}} - P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k \cdot T_j}\right) \cdot \exp\left(\frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V_G + R_s \cdot I_G)\right) - 1 \right\} - i_{d1} + i_{d2} \end{aligned} \quad (IV-6)$$

On appliquant la méthode de Runge-Kutta, on obtient la tension V_{pv} .

IV.2.1 GPV-Onduleur triphasé à trois niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuses

Le rayonnement solaire ainsi que la température sont fixés à $E_s=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$, $R=50\Omega$.

La figure (IV.3) présente les résultats de la simulation obtenus de l'association du générateur PV –onduleur à trois niveaux–charge R pour un taux de réglage $r=0.8$ et un indice de modulation $m = 10$.

Les figures (IV.3) (a) et (b) présentent le courant I_{pv} ainsi que la tension V_{pv} générés par le générateur photovoltaïque. On remarque une stabilité après un régime transitoire de 0.1S.

Les tensions des condensateurs U_{c1} , U_{c2} sont présentés par la figure (IV.3). (c). On remarque que ces tensions sont valeurs égales.

La figure (IV.3). (d) montre la tension du premier bras d'onduleur V_{AM} où les trois niveaux U_c , 0, $-U_c$ sont clairement distingués.

La tension de sortie de la première phase de l'onduleur V_A ainsi que son spectre harmonique sont présentés par les figures (IV.4). (a) et (b). On remarque que les harmoniques sont concentrés autour de la fréquence de 1kHz.

Les figures (IV.5). (a) et (b) présentent la tension de sortie de la première phase de l'onduleur V_A ainsi que son spectre harmonique pour $r=0.8$ et $m=20$. On remarque que les harmoniques sont repoussés vers les tons élevés (2kHz).

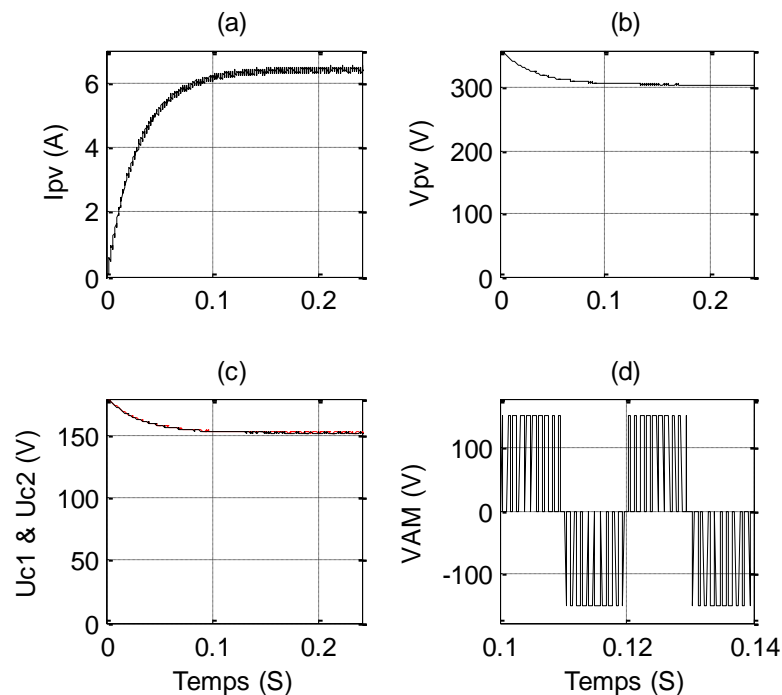
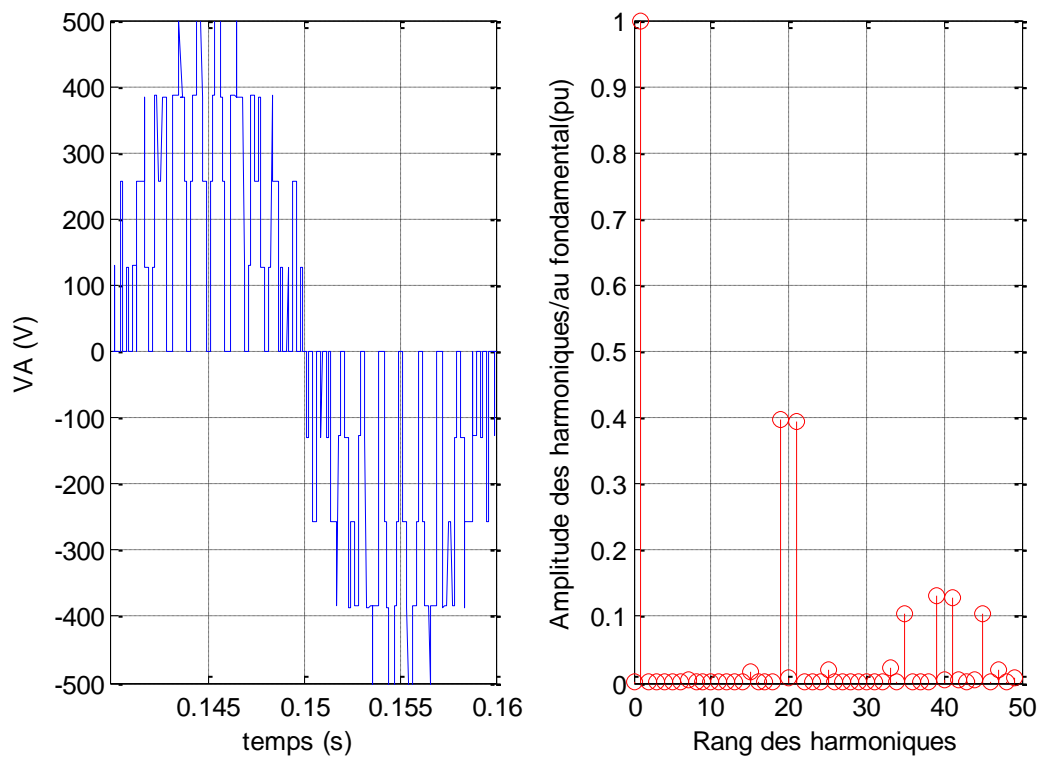
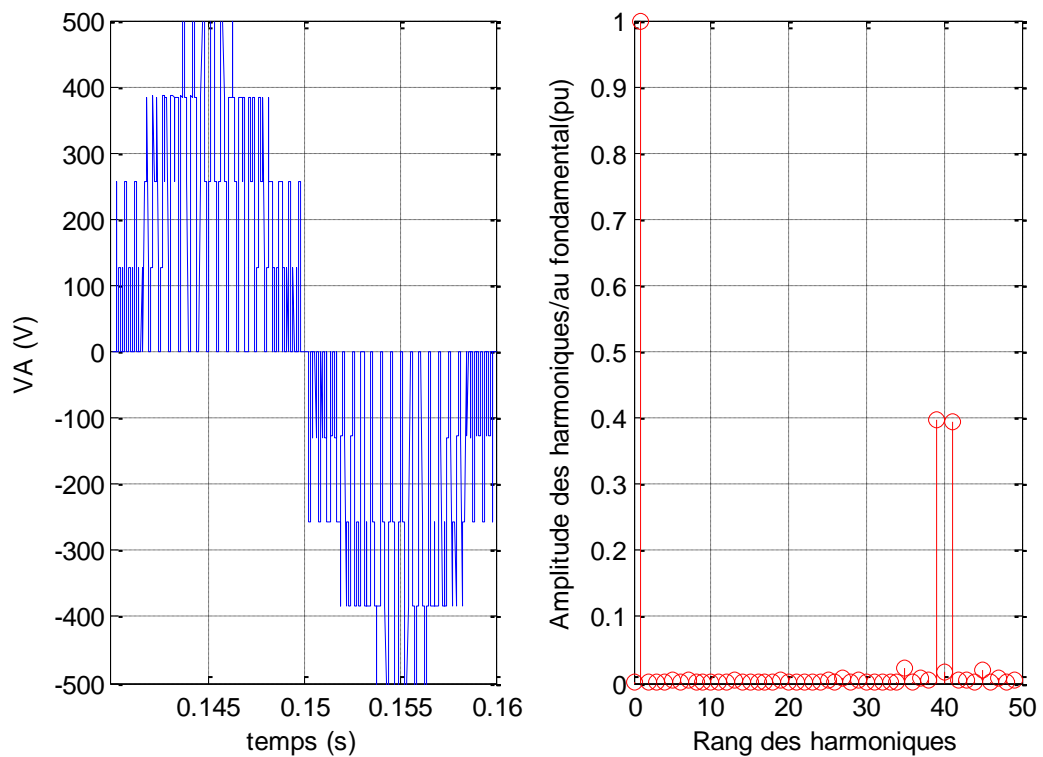


Figure IV. 3. Tensions et courant de système pour $r=0.8$ et $m=10$.

Figure IV. 4. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=10$, THD= 0.61.Figure IV. 5. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=20$, THD=0.56.

IV.2.2 GPV-Onduleur triphasé à trois niveaux commandé par la MLI vectorielle

Avec les paramètres précédents de rayonnement et température on va appliquer la modulation vectorielle.

La figure (IV.6) présente les résultats de la simulation obtenus de l'association du générateur PV –onduleur à trois niveaux–charge R pour un taux de réglage $r=0.8$ et une fréquence de commutation $m=20$.

Les figures (III.6) (a) et (b) présentent le courant I_{pv} ainsi que la tension V_{pv} générés par le générateur photovoltaïque. On remarque que le courant présente moins d'oscillation par rapport à la stratégie précédente.

Les tensions des condensateurs U_{c1} , U_{c2} sont présentés par la figure (III.6). (c). On remarque que ces tensions sont presque de valeurs égales.

La figure (III.6). (d) montre la tension du premier bras d'onduleur V_{AM} où les trois niveaux U_c , 0 , $-U_c$ sont clairement distingués.

La tension de sortie de la première phase de l'onduleur V_A ainsi que son spectre harmonique sont présentés par les figures (III.7). (a) et (b). L'analyse harmonique montre que le spectre n'est pas centré autour des multiples de la fréquence de commutation, mais il est distribué sur une large étendue de l'axe horizontal.

Les figures (III.8). (a) et (b) présentent la tension de sortie de la première phase de l'onduleur V_A ainsi que son spectre harmonique pour $t=0.8$ et $m=40$.

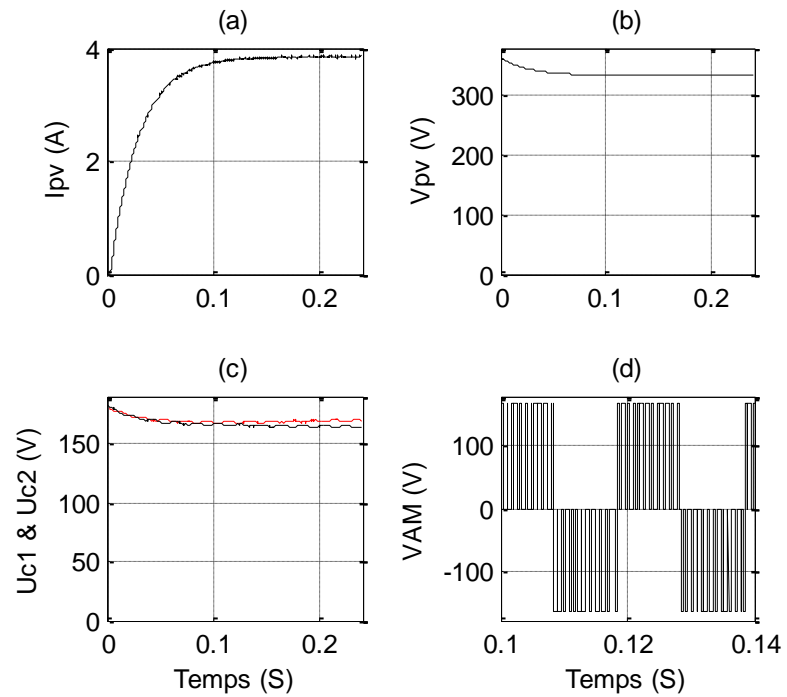


Figure IV. 6. Tensions et courant de système pour $r=0.8$ et $m=20$.

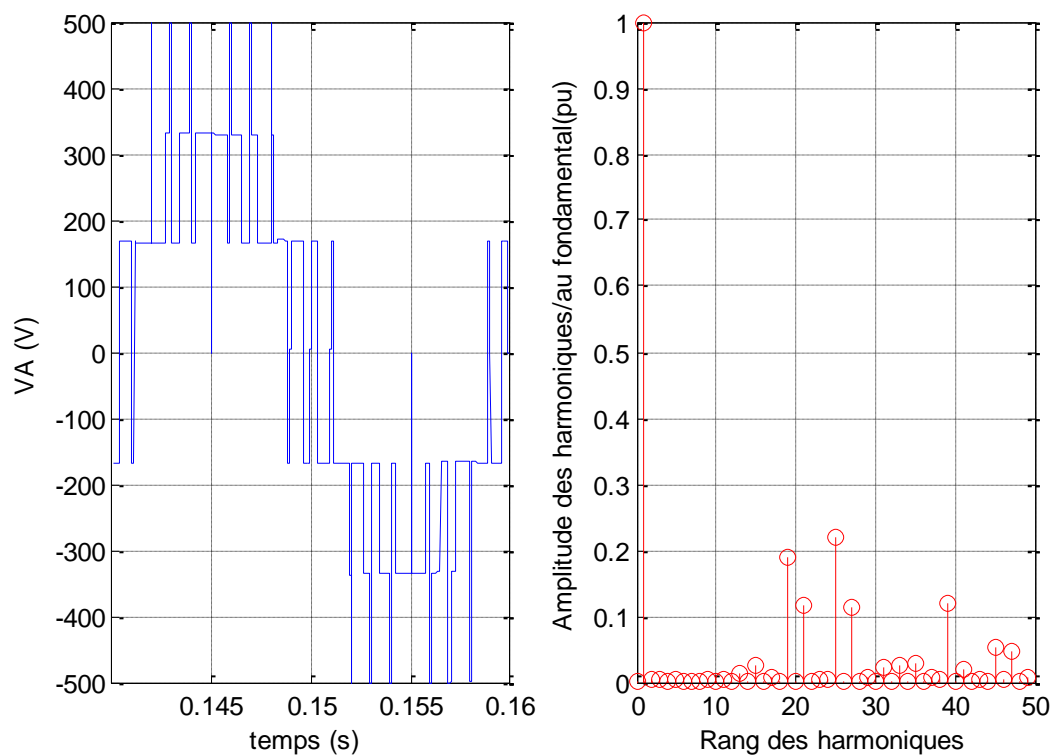


Figure IV. 7. Tension de sortie V_A et leur spectre harmonique pour $m=20$, $THD= 0.36$.

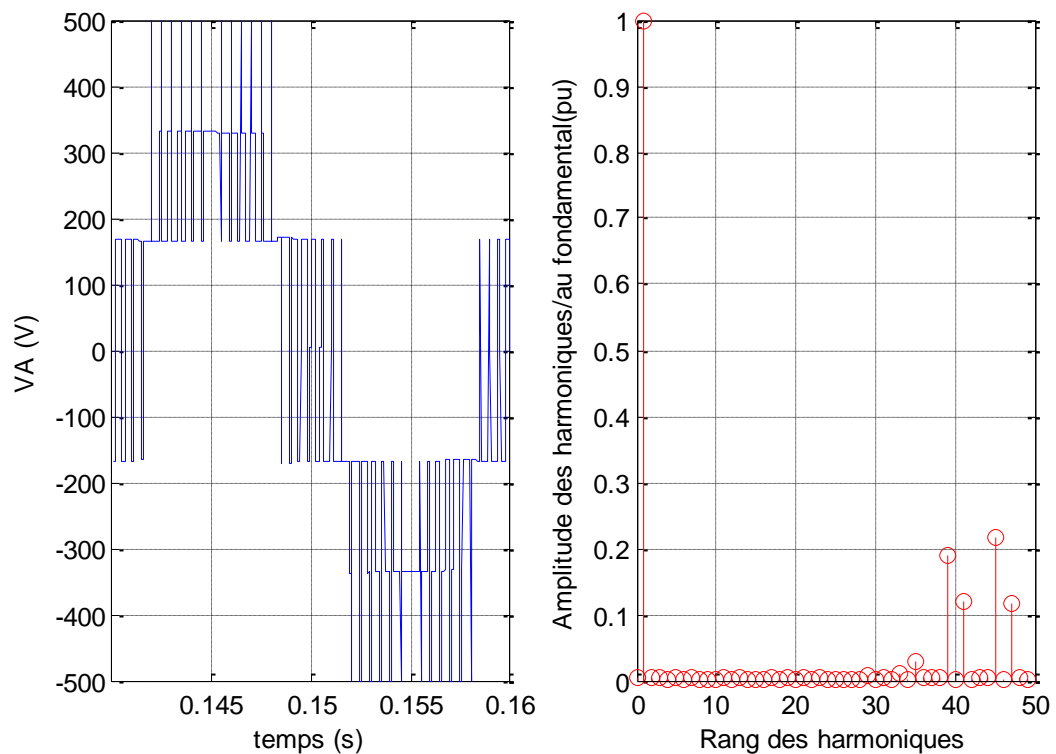


Figure IV. 8. Tension de sortie VA et leur spectre harmonique pour $m=40$, THD= 0.33.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la simulation de l'association GPV-Onduleur trois niveaux –charge. L'onduleur étant commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale puis par la MLI vectorielle.

Les résultats montrent qu'on plus de l'amélioration de la qualité de la tension de sortie de l'onduleur commandé par la MLI vectorielle, les tensions d'entrée U_{c1} et U_{c2} ainsi que le courant de GPV I_{pv} diminues l'oscillation.

Conclusion Générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Ce présent travail est consacré à l'étude d'un onduleur triphasé à trois niveaux commandé par MLI triangulo-sinusoidal et la MLI vectorielle raccordé à un GPV comme une source de tension continu.

En première partie, nous avons étudié le principe des systèmes photovoltaïques où on a présenté le modèle des différents éléments qui le constituent (module, générateur,

Les onduleurs multi niveaux sont l'objectif de la deuxième partie où nous avons représenté le principe de fonctionnement des onduleurs NPC à trois niveaux par la commande triangulo-sinusoidal à deux porteuses bipolaire et la MLI vectorielle.

Dans la troisième partie, nous avons présenté la simulation sous Matlab/program de l'ensemble GPV-Onduleur triphasée à trois niveaux commandé par les deux stratégies MLI triangulo-sinusoidal et MLI vectoriel. L'étude de cette association a montré que le système elle est basée sur la fréquence de commutation et le taux de réglage, notre onduleur peut engendrer des ondes de tension acceptable pour MLI vectorielle.

De ce fait, quelques conclusions ont été déduites:

- GPV source propre.
- Avantage du trois niveaux par rapport au deux niveaux.
- Forme d'onde MLI vectorielle / MLI triangulo-sinusoidal
- Tension $U_{c1} = U_{c2}$ pour les faibles puissances pour éviter l'introduction d'un hacheur entre le GPV et l'onduleur.

Bibliographie

[Abb-11] : Abbassen Lyes

«Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister En Electrotechnique, Option machines électriques Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

[Abd-04] T. ABDELKRIM

« Etude et Implémentation de Différents Algorithmes Numériques de Modulation de Largeur d'Impulsions d'un Onduleur Triphasé à Trois Niveaux » mémoire de Magister, EMP, 2004.

[Aki-07]: Akihiro Oi

« Design and simulation of photovoltaic water pumping system », Master of Science in Electrical Engineering , California Polytechnic State University, San Luis Obispo 2005.

[Ala-06] Alain Bilbao Ibarreta

« Réalisation de commandes MPPT Numériques » Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Universtat Rovira Virgili 2006.

[Arr-07] M. Arrouf

« Optimisation d l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2007.

[Bel-08] Belhadj Mohammed

« Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister en Microélectronique –Photovoltaïque, Centre Universitaire de Bechar, 2008.

[Ben-10] S.Bentouba ; A.Slimani ; M.S.Boucherit

« Stratégies de Commande et Modélisation de l'Onduleur à Cinq Niveaux » Quatrième Conférence Internationale sur le Génie Electrique CIGE'10, 03-04 Novembre 2010, Université de Bechar, Algérie

[Ber-95] E. M. Berkouk.

« Contribution à la Conduite des Machines Asynchrones Monophasées et Triphasées Alimentées par des Convertisseurs Directs et Indirects. Application aux Gradateurs et Onduleurs Multiniveaux ». Thèse de Doctorat, C.N.A.M , Paris 1995.

[Boi-08] : V. Boitier, P. Maussion, C. Cabal

«Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques», revue 3E.I, N°54, septembre 2008, pp. 90-96.

[Bri-82] F. Brichant.

« Les onduleurs autonomes. Conception et applications industrielles. » Dunod 1982

[Car-95] J. P. Caron, J.P. Hautier

« Modélisation Et Commande de La Machine Asynchrone ». Edition TECHNIP, Paris 1995.

[Cha-08]: Maher Chaabene

«Gestion Energétique des Panneaux Photovoltaïques», Mémoire Master de Génie Electrique, Université de Sfax Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2008,

[Chr-05] Christian NGO

«Le Soleil », Editions Le Cavalier Bleu, Idée reçu, Juin 2005

[Cel-01] N. Celanovic, D. Boroyevich

« A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters », IEEE Transactions On industry Applications, Vol. 37, No.2, March/April 2001, pp. 637-641.

[Cel-02] N. Celanovic

«Space vector modulation and control of multilevel converters », PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, 2000.

[Flè-07] B. Flèche, D. Delagnes,

« Energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, consulté janv. 2014.

[Gaa-00] M. Gaad, E.M. Berkouk, K. Aliouane.

« Etude Comparative Entre l'Onduleur Classique et Trois Niveaux ». Symp. Inter. sur les Hydrocarbures et la Chimie, Mai/Juin Boumerdes 2000.

[Gré-10] Luc André grégoire

«Convertisseur à cellule empilée faible à taux de distorsion harmonique: conception et mise en œuvre », Mémoire Magister Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, 2010.

[Has-10]: HASSINI née BELGHITRI HOUDA

«Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride eolien-photovoltaïque», Mémoire de Magister, Spécialité: Physique Energétique et Matériaux Université Aboubakr Belkaid de Tlemcen, 2010.

[Hat-08] : M. Hatti

« Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 16 et17 Décembre, 2008.

[Lab-05] A. Labouret, M. Viloz

« Energie solaire photovoltaïque ». Edition le Moniteur, Dunod, 2ème Edition, 2005.

[Lab-10] A. Labouret

«Cellules solaires : Les bases de l'énergie photovoltaïque », Collection: ETSF, ETSF, 5ème Edition, 2010.

[Lef-05] P, Lefranc

« Étude, conception et réalisation de circuits de commande d'IGBT de forte puissance», Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2005.

[Lai-96] J. S. Lai, & F. Z. Peng

« Multilevel converters- A new breed of power converters », Transactions on Industry Applications, Vol.32, No. 3, May/June 1996, pp.509-517.

[Lal-09] D. Lalili

« MLI Vectorielle et Commande Non Linéaire du Bus Continu des Onduleurs Multi niveaux. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone ». These de doctorat, ENP, Alger, 2009.

[Lel-07] : Jean-François Lelievre

«Elaboration de SiNx:H par PECVD: optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques» Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2007.

[Lor-94] E. Lorenzo,

'Solar Electricity Engineering of Photovoltaic System', Progensa, Sevilla, 1994.

[Mak-13] S. Makhloufi

« Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes». Thèse de doctorat en science université de Batna 2013.

[Mar-05] : Jean-Sébastien Mariéthoz

«Etude formelle pour la synthèse de convertisseurs multiniveaux asymétriques: topologies, modulation et commande», Thèse de doctorat Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.

[Mce-12] A. Mcevoy, L. Castaner and T. Markvart

« Solar cells », Edition Elsevier, 2012.

[Mer-10] : R. Merahi, R. Chenni, M. Houbes

« Modélisation et simulation d'un module PV par Matlab » 10^{ème} Séminaire International sur la Physique Energétique Département Electrotechnique, Université de Badji Mokhtar Annaba, 2010.

[Nab-13] M. Nabil, S. M. Allam, and E. M. Rashad

« Performance Improvement of a Photovoltaic Pumping System Using a Synchronous Reluctance Motor ». Electric Power Components and Systems, 41:447–464, 2013.

[Oli-02] : Olivier Gergaud

« Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.

[Oul-08]A. Ould Mohamed Yahya , A. Ould Mahmoud et I. Youm

« Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque »Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483 473

[Per-09] R. Pernick, C. Wilder

« The Clean Tech Revolution: Winning and Profiting from Clean Energy » Edition HarperCollins e-books, 2009.

[Pet-09] : Petibon Stéphane

« Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.

[Pou 04] J. Pou, R. Pindado, D. Boroyevich, P. Rodriguez, & J. Vicente

« Voltage-balancing strategies for diode-clamped multilevel converters », 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004, pp. 3988-3993.

[Rek-08] D. Rekioua * , Z. Roumila et T. Rekioua

« Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel » Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 623 – 633

[Roy-98] : J. Royer,T. Djiako,E. Schiller,B. Sada Sy

« Le pompage photovoltaïque : Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens», Université d'Ottawa, 1998.

[Sen-10]: David Sanz Morales

«Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications», Faculty of Electronics, Communications and Automation, Master of Science in Technology, Aalto University, Finlande, 2010.

[Tam-11] G. Tamizhmani et al

« Photovoltaic Module Power Rating per IEC 61853-1 Standard » Report of Arizona State University, Photovoltaic Reliability Laboratory (PRL), March 2011.

[Tia-11] : Tiar Mourad

«Commande Optimale d'un Système de Génération Photovoltaïque Hybride », Mémoire de Magister En Electrotechnique Option : Electricité industrielle, Université de Biskra, 2011.

[Vig-10] Stéphane Vighetti

« Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau: choix et dimensionnement des étages de conversion» Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010.

[Wur-09] P. Wurfel

« Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts », Edition Wiley & Sons, February 2009.

[Zem-10] H.B. ZEMAMOUCHE

« Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multiniveaux à base de GTO et d'IGBT » Mémoire magister, université de Annaba 2010.