REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie électrique
Spécialité : Automatique et Systèmes

Chaine de conversion photovoltaïque à base des convertisseurs z source et onduleur multiniveaux

---

Présenté par :

RAIS Takieddine

BOUAISSA Sofiane

Proposé et Dirigé par :

KADDOUR Benyoucef

Promotion 2020

Remerciement

Nous tenons tout d’abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d’accomplir ce Modeste travail.

Nous tenons à remercier mon encadreur : Mr. KADDOUR Benyoucef pour nous avoir accueilli au sein de son équipe et pour toute sa confiance. Aussi nous tenons à le remercier pour la grande liberté qu’il nous a accordée durant ce travail, ainsi que de ses qualités pédagogiques et humaines envers tous ses étudiants.

Nos remerciements vont aussi aux membres de jury qu’ils ont accepté de juger notre travail.

Nous avons sincèrement apprécié durant ces années la bonne et chaleureuse ambiance. Nous tenons à saisir cette occasion pour remercier tout le corps des étudiants en Master II et nous leurs souhaitons du succès dans tout ce qu’ils entreprendront.

Que ceux qui se sentent oubliés, trouvent dans cette phrase notre profonde gratitude et nous remerciements pour l’aide et le soutien apporté durant ces années. Nous souhaitons aussi remercier toutes les personnes qui nous ont nourris durant notre vie par leur savoir leur gentillesse et leur dévouement. Nous ne saurons décrire en quelques mots ma gratitude.

Nous sommes immensément reconnaissants à nos parents qui nous ont soutenus tout au long de notre vie. Nous leur devons beaucoup. Qu’ils trouvent dans ce manuscrit toute notre reconnaissance et le signe que nous sommes enfin arrivés au bout.

Dédicaces

Je rends grâce, à mon Dieu de m'avoir donnée la force, la volonté, L'intelligence et la sagesse d'être patiente dans mes études.

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents qui m'ont beaucoup aidé et qui se sont sacrifiés pour mon bien et qui m'ont encouragé et soutenu le long de ma vie et durant mon cursus.

A mes chers frères et sœur.

A mes chers amis ainsi que tous ceux qui ont Contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

A tous ceux qui nous sont chères.

RAIS Takieddine

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes parents qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui, ceux qui ont toujours sacrifié pour me voir réussir

À mon frère et mes sœurs pour leur soutient et encouragements durant ces années d'étude. Particulièrement

À mon oncle paternel, celui qui a participé de près et de loin dans l'élaboration de ce mémoire

Bouaissa.S

الملخص

الطلب المتزايد للطاقة الكهربائية و ندرة المصادر الطاقوية التقليدية مستقبلا يفرض علينا البحث عن مصادر بديلة مثل الطاقات المتجددة من بينها الطاقة الشمسية وهي الطاقة الأكثر استعمالا لما لها من مميزات كثيرة و لأن الجزائر تتربع على مساحة جد واسعة فهي تمثل منبع ضخم للإشعاعات الشمسية و بالتالي مصدر هام للطاقة الشمسية.

الهدف من هذا البحث هو دراسة مولد كهروضوئي مرتبط مع مطبر مصعد للجهد مهيأ بنظام تحكم في الطاقات القصوى باعتماد الطريقة التقليدية (P&O) حيث يضمن أن يشتغل هذا المولد بطاقته القصوى مهما تكن التغيرات الجوية بالإضافة الى أنه الشهيرة يمكننا من رفع مستوى التوتر عند هذا المولد الكهروضوئي.

المموج الذي يضمن تزويد الشبكة الكهربائية ذات التوتر العالي بهذه الطاقة الكهربائية لابد أن يحقق كل متطلبات الربط بهذه الشبكة و المتمثلة في التواتر و القيمة الأعظمية للجهد و فرق الصفحة من جهة و من جهة أخرى لابد أن يحترم مجالات الجهد التي القاطعات الموجودة في المموج. بالفعل المموج ذو خمس NPC مرتبط مع z source و بالاعتماد على طريقة تتحملها التحكم التقليدية MLIمستويات من فئة الجيبية المتعددة يمكننا من احترام مجلات الجهد المسموح بها للقاطعات والاستجابة لكل و المتمثلة في الطريقة المتطلبات النوعية للشبكة الكهربائية و هذا باستعمال نظام تحطم فعال بالإضافة الى أنه يسمح بإلغاء بعض الاشارات الغر مرغوب فيها و بالتالي يحسن نوعية المحتوى الطيفي للإشارات الكهربائية للمخرج من تيار و جهد.

الكلمات المفتاحية: مولد الطاقة الشمسية ، مموج ذو خمس مستويات **NPC** ، تحكم الطاقة القصوى ، z source **.**

Résumé

La demande croissante de l’énergie électrique et l’épuisement futur inévitable des sources classiques exigent des recherches sur des sources alternatives, comme les énergies renouvelables parmi lesquels, l’énergie solaire est l’énergie la plus utilisée à cause de ses nombreuses applications. Et comme l’Algérie comporte un gisement solaire exceptionnel grâce à sa grande superficie donc elle représente une source importante de l’énergie photovoltaïque.

L’objectif de ce mémoire est consacré à l’étude d’un générateur photovoltaïque connecté à un hacheur survolteur adapté par une commande MPPT par la méthode classique de Perturbation et Observation (P&O) pour assurer le fonctionnement à leurs puissances maximales quel que soit les conditions climatiques, et permet également d’élever la tension de sortie de ces générateurs photovoltaïques.

L’onduleur qui peut assurer l’injection de cette énergie photovoltaïque au réseau électrique doit répondre aux exigences de l’interconnexion au réseau électrique : d’une part la fréquence, la valeur maximale de la tension et le déphasage. D’autre part, il faut respecter les gammes des tensions que doivent supporter les interrupteurs de puissances des onduleurs. En effet l’onduleur cinq niveaux à structure NPC à commande MLI triangulosinusoïdale multiple relié avec z source permet de respecter ces gammes de tension et de répondre aux exigences de l’interconnexion grâce à une commande efficace et judicieuse permettant de supprimer certaines familles de raies harmoniques et par conséquent, d’améliorer le contenu spectral des signaux de sortie (tension et courant).

Les mots clés : GPV**,** MPPT, Z source , Onduleur cinq nivaux NPC, MLI

Abstract

The increasing demand for electric power and the inevitable of conventional sources requires us to research on alternative sources, such as renewable energies, from permitting, solar energy is the energy which the most widely used because of its many advantages and as Algeria has an exceptional thanks to its large area solar radiation thus represents an important source of photovoltaic.

The objective of this thesis is devoted to the study of a photovoltaic generator connected to a chopper booster adapted by MPPT control by the conventional method Disruption and Observation (P & O) which ensures their maximum powers when the climatic conditions changes , and also capable of raising the output voltage of the photovoltaic generator .

The inverter which can ensure the injection of this photovoltaic power to the grid and must meet the requirements for interconnection to the electricity grid. On one hand, frequency, the maximum value of the voltage and phase angle; on the other hand, it must be observed that the ranges of voltages must support switches power inverters. The five levels inverter structure NPC connected with z-source and controlled by PWM sinusoidal triangular multiple permit these voltage ranges and meet the requirements of interconnection through effective and efficient command to remove certain kinds of harmonics and therefore, to improve the spectral content of output signals (voltage and current).

The key words : photovoltaic generator, MPPT, PWM, Z-Source, five levels inverter structure NPC

Sommaire

Introduction générale…….....1

Chapitre I

Système photovoltaïque et principe de MPPT

I.1. Introduction : …….….3

I.2. L'énergie solaire : …….…..3

I.3. Les énergies renouvelables en Algérie : …….....4

I.4. Système photovoltaïque : …….…..5

I.4.1. Définition : ……..…5

I.4.2. Le rôle principal du convertisseur statique : ……..…5

I.4.3. Types d'un système solaire photovoltaïque : ……..…...5

I.4.3.1. Système autonome : ……..……..5

I.4.3.1.1. Système autonome sans batterie : ……...…….6

I.4.3.1.2. Système autonome avec batterie : ……...…...…….6

I.4.3.2. Système hybride : …….…….……6

I.4.3.3. Système raccordé au réseau électrique : ……..……..7

I.5. La cellule photovoltaïque :…….……8

I.5.1. Définition : …….…....8

I.5.2. L'effet photovoltaïque : …….....8

I.5.3. Association des modules photovoltaïques : …….……..9

I.5.3.1. Association en série : …….……..9

I.5.3.2. Association en parallèle : …….…...9

I.5.3.3. Association série-parallèle :……..….10

I.5.4. Principe de fonctionnement :……...….10

I.5.5. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) : ……12

I.5.6. Comparatif des déférentes technologies : ……12

I.5.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque : ……14

I.5.7.1 Modèle idéal : ……..……..14

I.5.7.2. Modèle réel à une diode : ……15

I.6. Étages d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et une charge :……...…16

I.6.1. Les convertisseurs électriques (DC-DC) : ……17

I.6.1.1. Hacheur dévolteur (buck) : ……17

I.6.1.2. Hacheur survolteur (boost) : ……...19

I.6.1.3. Hacheur dévolteur-survolteur (buck-boost) : ……21

I.6.2. Poursuite du point de puissance maximale (MPPT) : ……...22

I.6.2.1. Définition : ……....22

I.6.2.2. Méthode de poursuite du point de puissance maximale : ……..…..23

I.6.2.3. La technique Perturbation & Observation (PO) : ……..…..23

I.6.2.4. Résultats de simulation de la méthode (P&O) : ……....26

I.6.2.5. Interprétations des résultats : ……..….30

I.7. Conclusion :……..…...30

Chapitre II

L'étude de convertisseur à Z source

II.1. Introduction : ……..……...…31

II.2.Présentation de z source : ……...…….31

II.3. Principe de fonctionnement de l'onduleur z-source : ……..……32

II.4. Etude de l'amplification maximale : ……..…….37

II.4.1 Interprétation de graphe : ……..…...37

II.4.2 Le coefficient d'amplification : ……..….38

II.4.3 Dimensionnements des inductances et les condensateurs : ……..……38

II.5.Simulation : ……..…..40

II.5.1. Les résultats de la simulation : ……..…..…..40

II.5.1.1 la simulation pour m=30 : ……41

II.5.1.2 la simulation pour m=40 : ……43

II.5.1.3 la simulation pour m=60 : ……44

II.5.2. Interprétation des résultats : ……..…..44

II.6. Conclusion : ……..……..……45

Chapitre III

Convertisseur multiniveaux niveaux à z source

Partie A : L'onduleur multiniveaux et la commande MLI……46

III.1.Introduction : ……...……...46

III.2. Définition des onduleurs multi-niveaux : ……46

III.3. Intérêt des onduleurs multi-niveaux : ……..47

III.4.Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux : ……...48

III.4.1 Onduleur multi niveaux à diode de bouclage : …….…….48

III.4.2 Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants : …….…….50

III.4.3 Onduleurs multi niveaux en cascade : …….…..52

III.5.Techniques de commandes MLI : …….……54

III.5.1. Principe de la modulation de largeur d'impulsion : …….....54

III .5.2. Commande en pleine onde de type 180 ^{o} : 55

III .5.3. Modulation sinusoïdale (ou sinus-triangle) : ……..…….55

a) Modulation sinusoïdale naturelle : …….…….56
b) Modulation sinusoïdale à double triangles : ……..……..57

III .5.4 La Modulation vectorielle : …….…….……59

III 5.4.1 Principe de la MLI Vectorielle : …….……59

III.5.4.2 La transformation de Clarke : …….…….....59

III.6. Onduleur à cinq niveaux de type NPC : ……..60

III.6.1 Structure de l'onduleur à cinq niveaux : ……60

III.6.2 Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux : ……....61

Partie B : Simulation d'onduleur cinq niveaux de type NPC à z source……65

III.7. Principe de la commande d'élévation simple (Simple Boost Control SBC) : ……...65

III.8. la simulation : ……...…..66

III.8.1.Les résultats de simulation : ……..66

III.8.2.Interprétation des résultats : ……..……..71

III.9.Conclusion : ……71

Conclusion générale……..72

Liste des figures

Chapitre I

Figure.I.1 schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage...……..**6**

Figure. I.2 Exemple d'un système PV hybride……...……**7**

Figure.I.3 Exemple Système raccordé au réseau électrique…...…….**8**

Figure.I.4 Association de N modules solaires en série…….…….…**9**

Figure.I.5 Association des modules solaires en parallèle……...…**10**

Figure.I.6 Association mixte des modules solaires…….…..**10**

Figure. I.7 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire……...**11**

Figure.I.8 Photos d'une cellul monocristalline……**12**

Figure.I.9 Photo de cellule poly cristallin……..**12**

Figure.I.10 Photo d'une cellule amorphe……..**12**

Figure.I.11 Modèle simplifié d'une cellule PV……**14**

Figure.I.12 Modèle réel à une diode d'une cellule PV……**15**

Figure.I.13 système photovoltaïque avec un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT……**16**

Figure.I.14 Symbole d'un convertisseur DC-DC…….……**17**

Figure.I.15 schéma d'un convertisseur dévolteur…….……**17**

Figure.I.16 schéma simplifié de hacheur buck en deux phases……**18**

Figure.I.17 schéma d'un convertisseur survolteur……**19**

Figure.I.18 schéma simplifié de hacheur boost en deux phases…….....**20**

Figure.I.19 schéma d'un convertisseur dévolteur-survolteur…….....**21**

Figure.I.20 schéma simplifié de hacheur buck-boost en deux phases……..21

Figure.I.21 Courbe caractéristique de puissance d'un GPV…….23

Figure.I.22 Recherche et recouvrement du point de puissance maximale……24

Figure.I.23 Organigramme de la méthode PO…….…….25

Figure.I.24 schéma blocs de la commande MPPT avec la méthode (P&O) ……..……..26

Figure.I.25 Evolution de rapport cyclique d(t)……..……....27

Figure.I.26 La puissance à la sortie de PV P (W) en fonction de t (s)……..……...27

Figure.I.27 Le courant à la sortie de PV I(A) en fonction de t(s)…….……28

Figure.I.28 Le courant à la sortie de l'hacheur Ib(t)……...……...28

Figure.I.29 La tension à la sortie de l'hacheur par rapport à l'entrée Vs(V) en fonction de t(s)..….29

Figure.I.30 MPPT pour un éclairement de 1000W P(V)……..…....29

Chapitre II

Figure.II.1 modèle d'impédance Z-source lié avec un onduleur…….……32

Figure.II.2 Schéma équivalent du mode 1……34

Figure.II.3 Schéma équivalent du mode 2……35

Figure. II.4 Schéma équivalent du mode 3……...35

Figure II.5 Variation du facteur de modulation en fonction du rapport cyclique……..…...37

Figure II.6 la tension des condensateurs et du courant dans la bobine pendant la période T ….….38

Figure II.7 architecture de l'onduleur Z-source en MATLAB…….....40

Figure II.8 la tension du sortie de z-source Vs=f(t) (30%)……..…...41

Figure II.9 la tension au borne du condensateur Vc_1=f(t)……...……....41

Figure II.10 zoom de la tension au borne du condensateur Vc_1=f(t)……..……..42

Figure II.11 le courant passant par l'inductance I_{L1}…...……...……...……..42

Figure.II.12 modulation de largeur d'impulsion (30%)……43

Figure.II.13 la tension du sortie de z-source Vs=f(t) (40%)……...43

Figure.II.14 la tension du sortie de z-source Vs=f(t) (60%)……..……...**44**

Chapitre III

Figure.III.1 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux……..….**48**

Figure.III.2 Topologies d'onduleurs NPC……..……..**49**

Figure.III.3 Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant…….……..…...**51**

Figure.III.4 Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade..……...……**53**

Figure.III.5 Différentes techniques de commande MLI……...……**54**

Figure.III.6 Principe de la modulation…….....**55**

Figure.III.7 Schéma de principe de la technique sinus-triangle……**56**

Figure.III.8 Principe de la modulation MLI sinusoïdale classique……...**57**

Figure.III.9 Principe de la MLI à doubles triangles……**58**

Figure.III.10 Représentation dans le plan (α, β) des vecteurs de tension de l'onduleur à trois niveaux de tension……..**60**

Figure.III.11 Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux……**60**

Figure.III.12 1ère configuration du 1er bras……..**61**

Figure.III.13 2ème configuration du 1er bras……**62**

Figure.III.14 3ème configuration du 1er bras…….……**63**

Figure.III.15 4ème configuration du 1er bras……...…**63**

Figure.III.16 5ème configuration du 1er bras……...…..**64**

Figure.III.17 les signaux de commande de chaque interrupteur Et la forme d'onde de la tension de sortie Vao……..….**65**

Figure.III.18 le schéma blocs d'un onduleur cinq niveaux de type NPC à z source……**66**

Figure.III.19 la tension de sortie de z source……...**66**

Figure.III.20 Tensions de références et porteuses pour m=6……67

Figure.III.21 Tension simple de la phase 1 pour m=6……..67

Figure.III.22 l'analyse harmonique par FFT pour m=6……..……..68

Figure.III.23 Tensions de références et porteuses pour m=15……..68

Figure.III.24 Tension simple de la phase 1 pour m=15……69

Figure.III.25 l'analyse harmonique par FFT pour m=15……..……69

Figure.III.26 Tension simple de la phase 1 pour r =0.95……..70

Figure.III.27 l'analyse harmonique par FFT pour r=0.95……..……..70

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau.I.1 Potentiel solaire en Algérie**……..…..4**

Tableau.I.2 Tableau Comparatif des déférentes technologies d'une cellule photovoltaïque**……...13**

Chapitre II

Tableau.II.1 Les états utilisés avec la commande Z-source**…….….33**

Chapitre III

Tableau.III.1 Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux**.....64**

Liste des abréviations et des symboles

AC : Alternative **C**urrent

ASA : Agence **S**patiale **A**llemande

CA : Courant **A**lternative

CC : Courant **C**ontinue

CS : un **C**onvertisseur **S**tatique

CSI : Current **S**ource **I**nverters

DC : Direct **C**urrent

ENR : Energie **R**enouvelables

GaAs : l'**A**rséniure de **G**allium

GPV : un **G**énérateur **P**hotovoltaïque

GTO : Gate **T**urn-**O**ff

IGBT : Insulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor

MLI : Modulation de **L**argeur d'**I**mpulsion

MPPT : Maximum **P**ower **P**oint **T**racking

N : Niveaux

NPC : Neutral **P**oint **C**lamped

P et **N : P**rotone et **N**eutron

PMAX : le transfert du **M**aximum de **P**uissance

PO : Méthode de **P**erturbation et **O**bservation

PPM : Point de **P**uissance **M**aximum

PV : Photo-**V**oltaique

SHSER : Un **S**ystème **H**ybride à **S**ources d'**é**nergie **R**enouvelables

SVM : Structure de la **M**odélisation **V**ectorielle

THD : Total **H**armonic **D**istortion

VSI : Voltage **S**ource **I**nverters

ZS : Z-Source

Eph : photons d'énergie

h : constante de Planck

v : fréquence

I_D : courant dans la diode

I_{ph} : courant de photovoltaique

I_s : courant de sortie

V_D : tension dans la diode

I_0 : courant de saturation inverse de la diode

n : coefficients d'idéalité de la jonction PN

V_T : potentiel thermique

k : constante de Boltzmann

T : température effective de la cellule en Kelvin

q : charge d'électron

R_S : résistance en série

R_p : résistance en parallèle

V_s : tension de sortie

K (chapitre I) : interrupteur

dT_s : période quand K est fermé

L : capacité de l'inductance

C : capacité du condensateur

I_C : courant dans le condensateur

I_l : courant dans l'inductance

V_L : tension de l'nductance

I_i : courant d'entré

V_i : tension d'entré

I_0 : courant du sortie

V_0 : tension du sortie

V_{ref} : tension de référence

I_{ref} : courant de référence

P : puissace

m (chapitre II): profondeur de modulation de l'onduleur

$V_{M\ max}$: valeur crête du fondamental de la tension simple de sortie de l'onduleur

$V_{i\,max}$: la valeur crête de la tension d'entrée de l'onduleur

b : amplification de l'étage continu de Z source

B : amplification globale du système

V_{dc} : tension d'entré (source)

Ds : diode

T : demi-période de la commande de la structure

T_0 : durée des courts-circuits de l'onduleur Z-source

T_1 : durée des états actifs de l'onduleur

D_0 : rapport cyclique

V_m : Le coefficient d'amplification

K (chapitre II) : Le coefficient d'ondulation

Ec : tension continue

Ap : amplitude de signale de référence

Fr : fréquence de signale de référence

Ar : amplitude de signale de porteuse

Fp : fréquence de signale de porteuse

m (chapitre III) : l'indice de modulation

r : Le coefficient de réglage

V_h : par le rapport de la valeur efficace des harmoniques de tension

V_1 : la valeur efficace du fondamental de tension

V_a ,V_b , V_c : tensions

$V_{ref\,a}$,$V_{ref\,b}$, $V_{ref\,c}$: tension de référence

f : fréquence

t : la période

Tm : période de modulation

U'_a,U'_b , U'_c : tensions des 3 phases

Ka : thyristors (interrupteurs)

Vao : tension simple

Vka : tension inverse appliqué aux bornes des interrupteurs

Introduction générale

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 18ième siècle. Ces sources d'énergie beaucoup plus concentrées et plus efficaces, 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 sources d'énergie illimitées, telles que la production d'électricité par le vent et la transformation d'énergie solaire.

L'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.

Dans le domaine de l'électricité, l'électronique de puissance est un domaine vital touche plusieurs activités tel que le réseau électrique, le transport (urbain, ferroviaires, maritime……), l'énergie renouvelable et l'industrie. Dans cette époque l'énergie est devenue l'une des choses importantes dans la vie quotidienne de l'homme. Alors c'est devenu nécessaire d'améliorer les performances des dispositifs de l'électronique de puissance, cette dernière peut être contribue pour la bonification de signal électrique.

Les convertisseurs de puissance jouent un rôle très important dans les systèmes photovoltaïques

Les convertisseurs électriques sont des dispositifs basés en principe sur les composants semi-conducteurs, ainsi que des éléments passifs comme les résistances et les condensateurs et les inductances, il existe plusieurs types des convertisseurs : continu-continu (DC /DC) , Alternative-Continu (AC /DC) , Alternative -alternative (AC /AC), Continu Alternative(DC/AC).

Des recherches ont été faites dans le but d'améliorer les convertisseurs de puissance en vue techno-économique.

Les travaux mènes se concentrent justement sur les convertisseurs de puissance au sein des systèmes embarques. Elle évalue la possibilité de remplacer une structure associant un convertisseur DC/DC et un onduleur DC/AC par une topologie d'onduleur DC/AC qui est apparue il y a une dizaine d'année. Cette structure, nommée par son inventeur onduleur à source impédante, est de type DC/AC. Elle permet non seulement de convertir un signal continu en un signal alternatif mais

possède également la fonction élévatrice lui permettant d'élever la tension de la source à un niveau supérieur.

L'objectif de projet consiste à étudier l'onduleur z-source et l'onduleur multi-niveaux afin de les intégrés dans un système photovoltaïque dans le but d'améliorer le rendement énergétique du GPV.

L'étude présentée dans ce mémoire est organisée en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente les différents systèmes photovoltaïques et l'étude de MPPT d'un système photovoltaïque.

- Le second chapitre est consacré à une modélisation de l'onduleur Z-source et une analyse de principe de fonctionnement de ce convertisseur.

.- Le troisième chapitre présente les différents types de commande de convertisseur multi-niveaux avec la technique MLI, et les simulations (sous Matlab) pour la commande de l'onduleur multiniveaux avec z source.

Enfin, nous clôturons notre mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et de simulation suivie par quelques perspectives envisagées dans nos travaux futurs.

Chapitre I :

Système photovoltaïque et principe de MPPT

I.1. Introduction :

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol.

C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, et parmi les moyens qu'ils ont le laissé à réaliser ce but la cellule photovoltaïque.

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et l'optimisation de son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi que le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances, et nous étudions quelques types de convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques après nous décrivons la commande MPPT des convertisseurs DC-DC

I.2. L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ [8400] fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce À des panneaux sombres. Nous pouvons aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [1].

I.3. Les énergies renouvelables en Algérie :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde et en particulier de la région La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays. **Le tableau (I.1)** résume le potentiel solaire en Algérie [2].

Régions	Région côtier	Hauts plateaux	Sahara
Superficie(%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m2 /an)	1700	1900	2650

Tableau.I.1 Potentiel solaire en Algérie [2]

L'Algérie en particulier et les pays du Maghreb ont un potentiel solaire élevé. Les taux d'irradiation solaire effectués par satellites par l'Agence Spatiale Allemande (DLR), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m2 /an dans le Nord du Grand Sahara. Par contre, les meilleurs taux d'irradiation solaire en Europe sont de l'ordre de 800 kWh/m2 /an limités à la partie sud de l'Europe. Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit: 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 TWh/an pour l'éolien. Cette énergie renouvelable présente à l'heure actuelle une réponse aux problèmes environnementaux et aux émissions de gaz à effet de serre qui menace la planète entière et une solution durable à la crise actuelle de l'énergie, avec la hausse du prix du baril de pétrole, ce qui place les énergies renouvelables, ENR, (hydraulique, éolien, photovoltaïque, solaire thermique, géothermie, biomasse, biogaz et pile à combustible), au centre des débats portant sur l'environnement, et plus généralement le développement durable. Dans ce contexte vient le projet allemand DESERTEC «clean frome désert» dans cette article, nous décrivons le potentiel algérien en matière d'énergie renouvelable surtout solaire et éolien et leurs intégration dans une vision de développement à travers plusieurs scénarios énergétiques mettant l'Algérie comme un noyau de

production d'énergie renouvelable et son environnement surtout européen dont les études de la banque mondiale indique qu'il sera obligé dans les années à venir d'importer son énergie du grand Sahara d'où vient l'initiative allemande pour exporter l'énergie solaire du grand Sahara à l'Europe.

L'Algérie a adopté en 2011 une stratégie ayant pour objectif de produire d'ici 2030, 40% d'électricité à partir de ressources renouvelables. Cette stratégie vise en outre à développer une véritable industrie du solaire, associée à un programme de formation et de capitalisation qui permettra, à terme, d'asseoir un savoir-faire efficient, notamment en matière d'engineering et de management de projets. [3]

I.4. Système photovoltaïque :

I.4.1. Définition :

Le système photovoltaïque est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque), une interface de puissance (les convertisseurs statique DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge.

I.4.2. Le rôle principal du convertisseur statique :

Le convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie.[4]

I.4.3. Types d'un système solaire photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en trois catégories : Autonome, hybride et raccordé au réseau électrique.

I.4.3.1. Système autonome :

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont actuellement divisés en deux types : [5]

I.4.3.1.1. Système autonome sans batterie :

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (exemple: calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompage photovoltaïque: le Réservoir d'eau sert de stockage).

I.4.3.1.2. Système autonome avec batterie :

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. (ex: l'éclairage d'une maison dans la nuit).

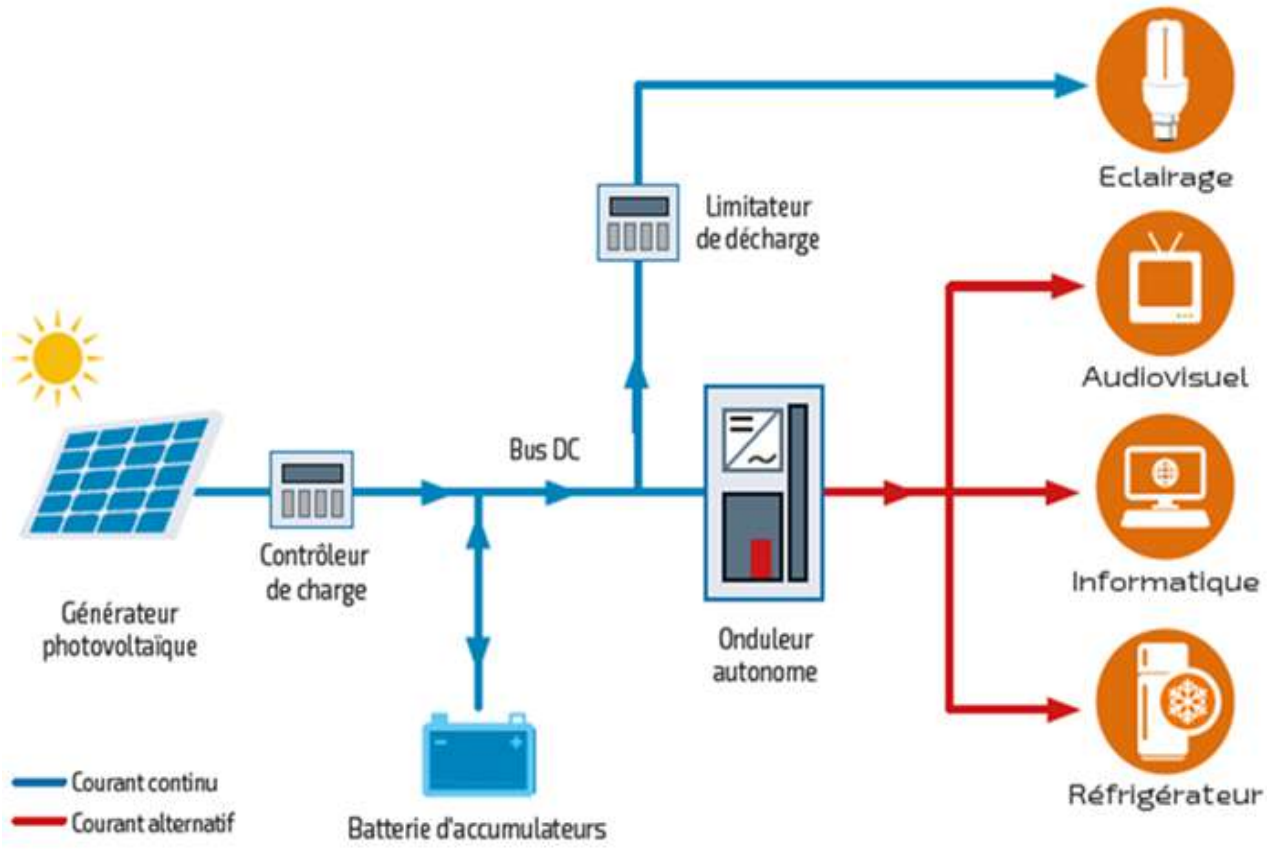


Figure.I.1 schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage

I.4.3.2. Système hybride :

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité

à tout moment, où les coûts de transport décarburant sont élevées où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries.

Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle [6, 7].

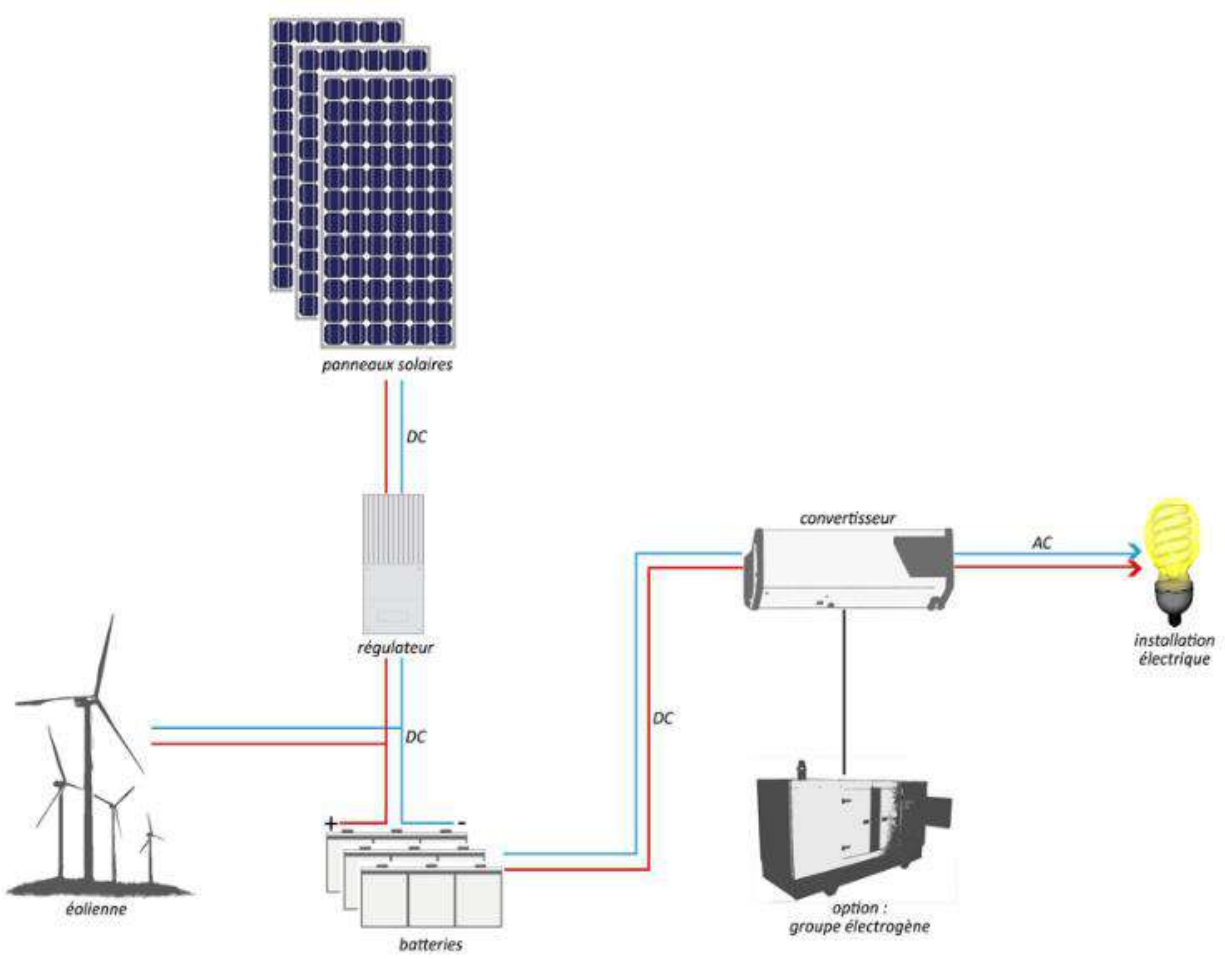


Figure. I.2 Exemple d'un système PV hybride

I.4.3.3. Système raccordé au réseau électrique :

Le système photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (DC-AC). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même.



Figure.I.3 Exemple Système raccordé au réseau électrique

I.5. La cellule photovoltaïque :

I.5.1. Définition :

Les cellules photovoltaïques 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 [8]. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi- conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. 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 (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

I.5.2. L'effet photovoltaïque :

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

- « Photos », qui signifient lumière.
- « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827, inventeur de la pile électrique).

Appelé aussi « module photovoltaïque » ou PV, c'est un panneau solaire qui est destiné à récupérer les rayonnements du soleil pour les transformer en électricité (Courant continu DC).

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en

énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium.

Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [9].

L'ensemble de panneaux photovoltaïques interconnectés forme le générateur. Celui-ci est caractérisé par sa puissance crête exprimée en kilowatt crête (KWc) [10].

I.5.3. Association des modules photovoltaïques :

I.5.3.1. Association en série :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [11].

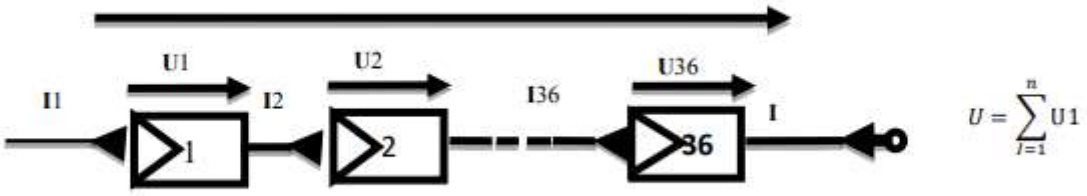


Figure.I.4 Association de N modules solaires en série

I.5.3.2. Association en parallèle :

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [12].

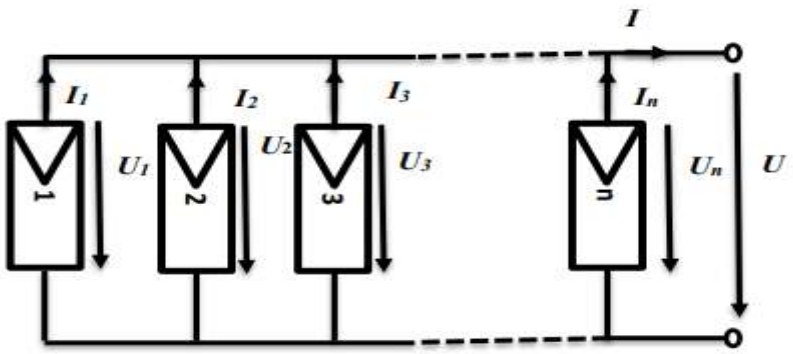


Figure.I.5 Association des modules solaires en parallèle.

I.5.3.3. Association série-parallèle :

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, nous somme obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [13]

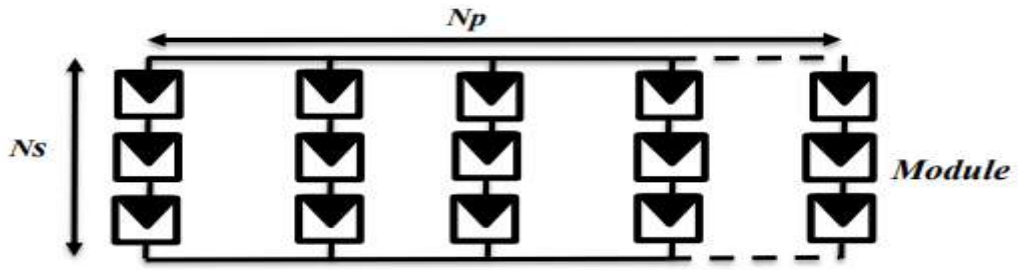


Figure.I.6 Association mixte des modules solaires

I.5.4. Principe de fonctionnement :

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semiconducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semiconducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellurure de cadmium (CdTe).

Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales.

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit :

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie (Eph = hv) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires « électron- trou ».

Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule. **Figure (I.7)** [10].

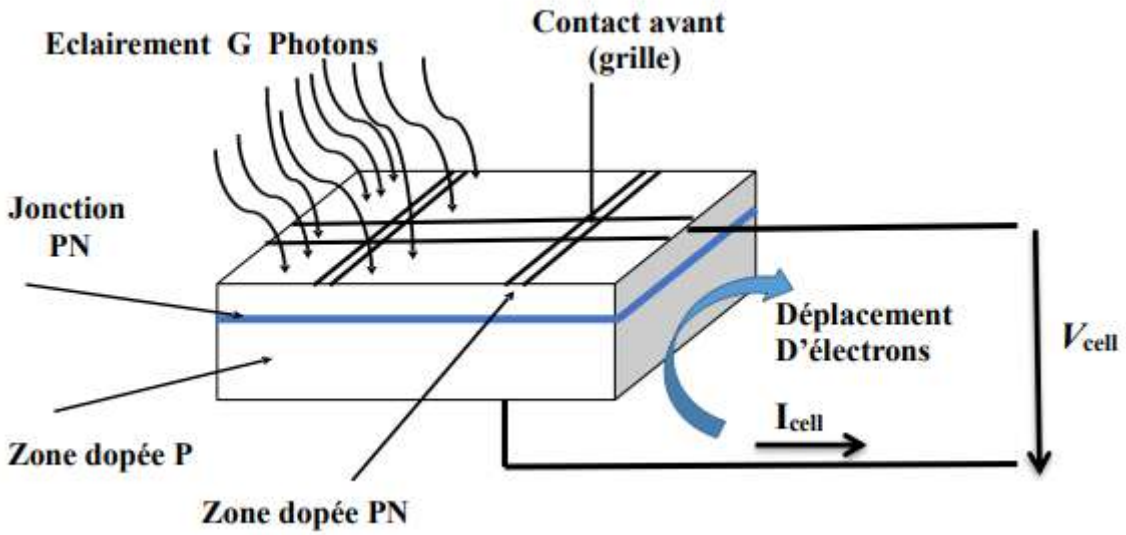


Figure. I.7 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

I.5.5. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) :

Silicium monocristallin



Figure.I.8 Photos d'une cellule monocristalline.

Silicium poly cristallin



Figure.I.9 Photo de cellule poly cristallin.

Silicium amorphe (a-si)

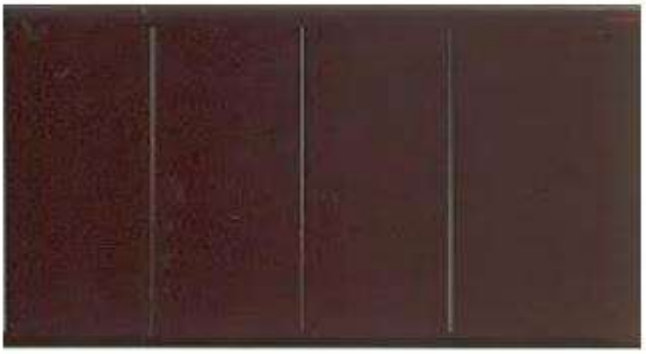


Figure.I.10 Photo d'une cellule amorphe

.

I.5.6. Comparatif des déférentes technologies :

Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisées d'une cellule photovoltaïque:

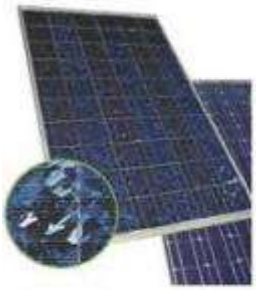
Technologies	Monocristallin	Poly cristallin	Amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	❖ Très bon rendement: 14 à 20%. ❖ Durée de vie : importante (30ans) ❖ Coût de fabrication: élevé. ❖ Puissance : 100 à 150 Wc/m2 .7 m2 /kWc ❖ Rendement faible sous un faible éclairement. ❖ perte de rendement avec l'élévation de la température ❖ Fabrication: élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal ❖ Couleur bleue uniforme.	❖ Bon rendement : 11 à 15 %. ❖ Durée de vie : importante (30 ans) ❖ Coût de fabrication: meilleur marché que les panneaux monocristallins ❖ Puissance:100Wc/m2.8 m2 /kWc. ❖ Rendement faible sous un faible éclairement. ❖ perte de rendement avec l'élévation de la température. ❖ Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. ❖ Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux	❖ Rendement faible : 5 à 9 %. ❖ Durée de vie : assez importante (20ans) ❖ Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies ❖ Puissance : 50 WC/m2 . 16 m2 /kWc. ❖ Fonctionnement correct avec un éclairement faible. ❖ Peu sensible aux températures élevées. ❖ Utilisables en panneaux souples. ❖ Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium.
Part de Marche	43%	43%	10%

Tableau.I.2 Tableau Comparatif des déférentes technologies d'une cellule photovoltaïque

I.5.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

I.5.7.1 Modèle idéal :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant photonique IPh proportionnel à la puissance lumineuse Incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition **P-N** de la cellule **PV figure (I.11)**. Si l'on connecte une charge résistive aux bornes de la cellule photovoltaïque, cette dernière y débite une part de courant $\mathbf{I_D}$ et le reste, le courant, dans la diode. Nous avons alors la relation:

$$I_s = I_{ph} - I_D \qquad \textbf{(I.1)}$$

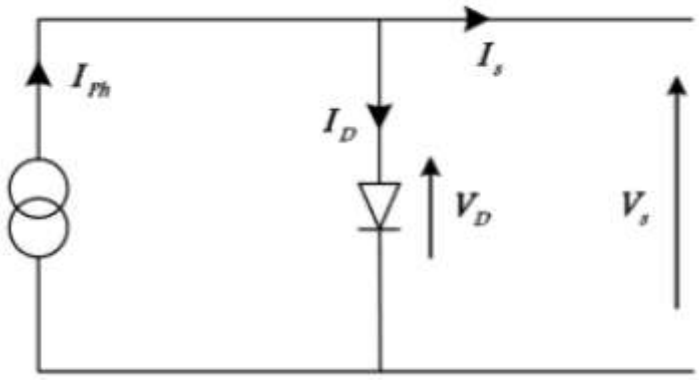


Figure.I.11 Modèle simplifié d'une cellule PV.

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I_D-V_D est donnée par la relation :

$$I_D = I_0(e^{(Vd/nVt)} - 1) \qquad \textbf{(I.2)}$$

Où :

I_0 : courant de saturation inverse de la diode ;

n : coefficients d'idéalité de la jonction PN ;

$V_T = kT/q$: potentiel thermique ;

k : constante de Boltzmann (k=1.381×1023 J/K) ;

T : température effective de la cellule en Kelvin ;

q : charge d'électron (q=1.6×10-19 C).

Le courant débité est équivaut à :

$$I_s = I_{ph} - I_d = I_d - I_0\left(e^{\left(\frac{Vd}{nkT/q}\right)} - 1\right) \quad \textbf{(I.3)}$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles.

Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte de perte de tension, courant de fuite, …). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque [14].

I.5.7.2. Modèle réel à une diode :

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, nous observons une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. Nous modélisons donc cette perte de tension par une résistance en série **Rs** et les courants de fuite par une résistance en parallèle **Rp** (voir figure (I.12)). C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheets) [14].

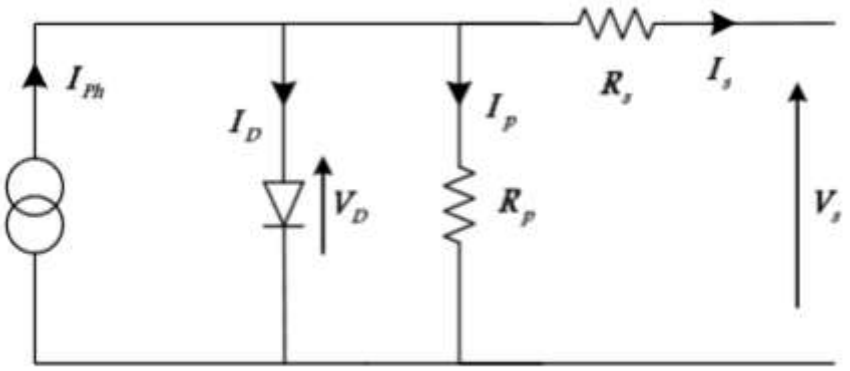


Figure.I.12 Modèle réel à une diode d'une cellule PV

Dans ce cas nous avons : $$I_s = I_{ph} - I_d - I_p = I_{ph} - I_0\left(e^{\left(\frac{Vd}{nkT/q}\right)} - 1\right) - \frac{Vd}{Rp} \quad \textbf{(I.4)}$$

Et comme: $$V_D = V_s + R_s\, Is \quad \textbf{(I.5)}$$

La relation devient: $$I_s = I_{ph} - I_0\left(e^{\left(\frac{Vd}{nkT/q}\right)} - 1\right) - \frac{Vs + Rs\, Is}{Rp} \quad \textbf{(I.6)}$$

I.6. Étages d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et une charge :

Un GPV présente des caractéristiques I(V) non linéaires avec des points de puissance maximaux (PPM). Ces caractéristiques dépendent au niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans **la figure(I.13)** Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de PMAX disponible. [15]

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT). [16]

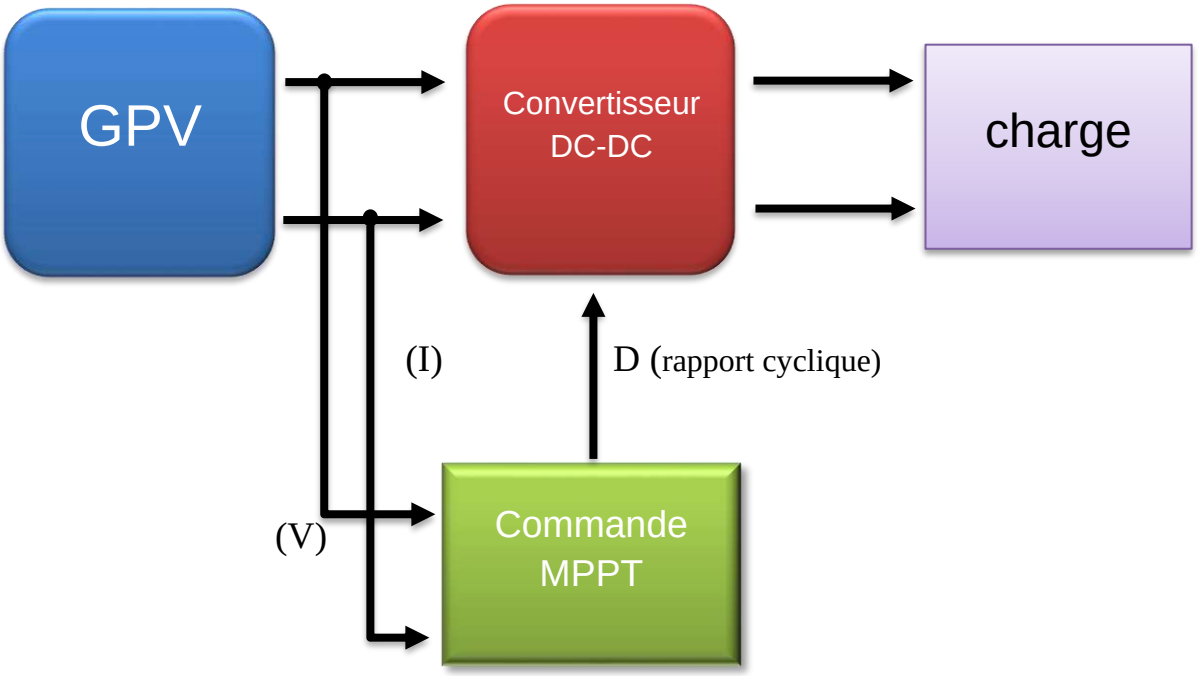


Figure.I.13 système photovoltaïque avec un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT

I.6.1. Les convertisseurs électriques (DC-DC) :

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. [11]

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, nous présentons le principe des trios types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les déférentes charges. [8]

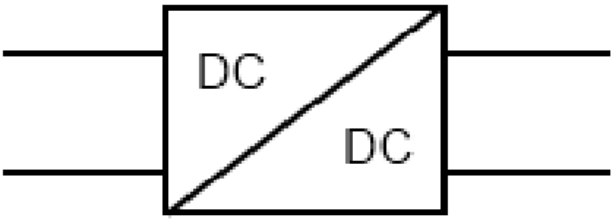


Figure.I.14 Symbole d'un convertisseur DC-DC

I.6.1.1. Hacheur dévolteur (buck) :

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom d'hacheur buck ou hacheur série. **La Figure(I.15)** présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. [17] Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

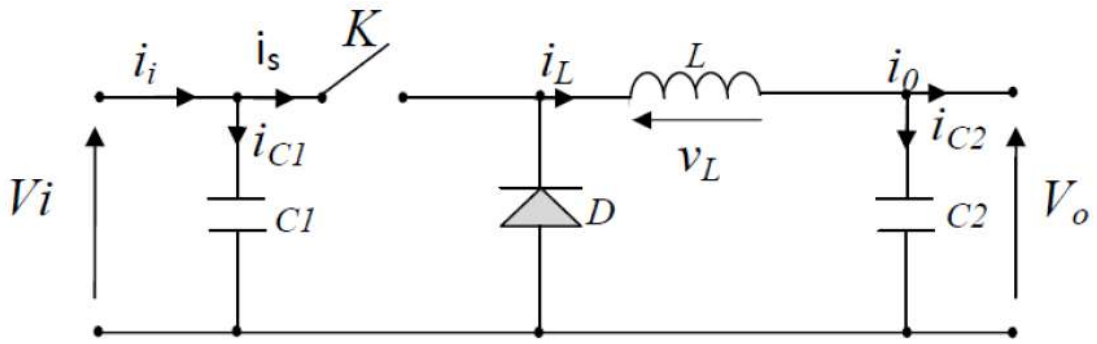
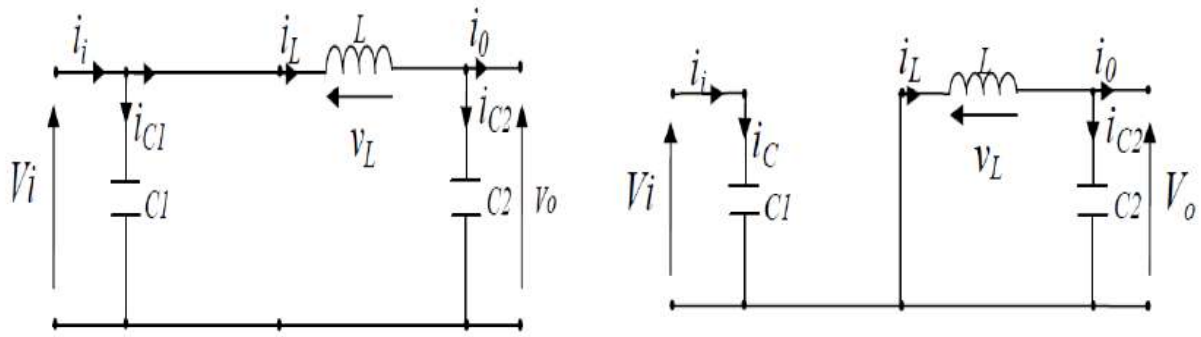


Figure.I.15 schéma d'un convertisseur dévolteur.

Pour obtenir les équations différentielles qui représentent le convertisseur buck, les équations différentielles du convertisseur sont obtenues en appliquant les lois de Kirchhoff à chacune des topologies possibles qui résultent d'une position donnée de l'interrupteur. [18]



(a) **(b)**

Figure.I.16 schéma simplifié de hacheur buck en deux phases

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits, on déduit les équations suivantes :

1) Pour le premier cas (a) K est fermé pendant **dTs** :

$$\mathbf{I_{C1} = C1\frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t)}$$

$$\mathbf{I_{C2} = C2\frac{dV0(t)}{dt} = I_l(t) - I_0(t)}$$

$$\mathbf{V_L = L\frac{dVL(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t)} \qquad \textbf{(I.7)}$$

2) Pour le deuxième cas (b) K est fermé pendant **(1-d)Ts** :

$$\mathbf{I_{C1} = C1\frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t)}$$

$$\mathbf{I_{C2} = C2\frac{dV0(t)}{dt} = I_l(t) - I_0(t)}$$

$$\mathbf{V_L = L\frac{dVL(t)}{dt} = -V_0(t)} \qquad \textbf{(I.8)}$$

I.6.1.2. Hacheur survolteur (boost) :

Lorsque nous souhaitons augmenter la tension d'une source continue, nous pouvons utiliser l'hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur. Ce dispositif de l'électronique de puissance est un convertisseur continu-continu mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne. [19]

La figure ci-dessous donne la forme la plus simple de l'hacheur survolteur :

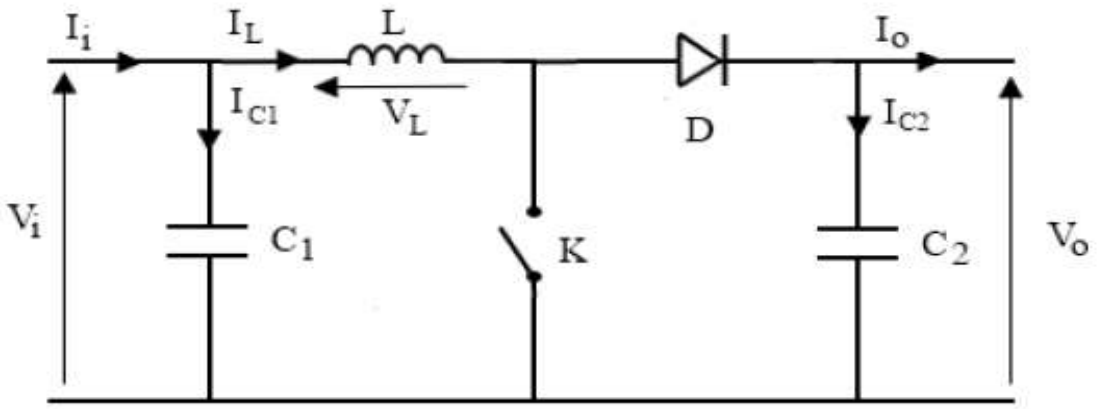


Figure.I.17 schéma d'un convertisseur survolteur

En appliquant les lois de Kirchhoff à chacune des topologies possibles Pour obtenir les équations différentielles qui représentent le convertisseur boost

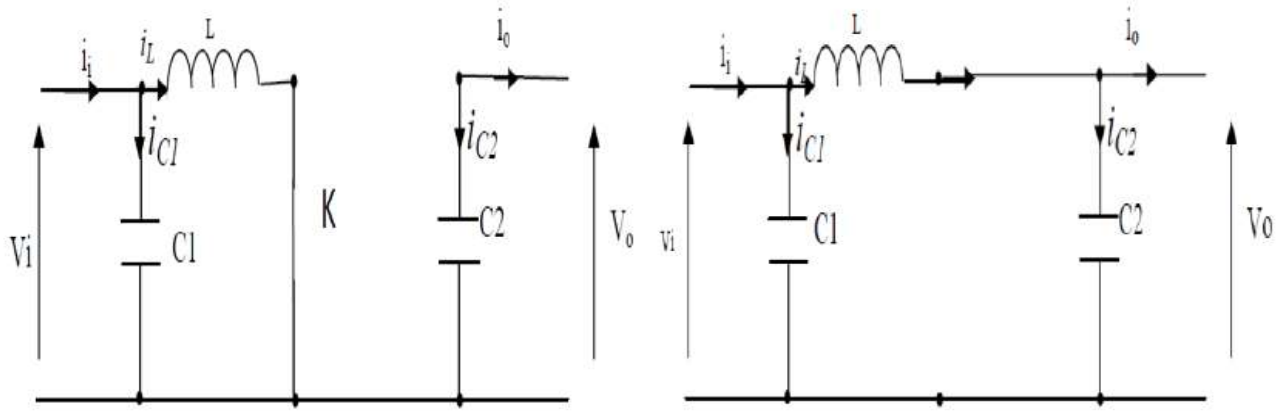


Figure.I.18 schéma simplifié de hacheur boost en deux phases

1) Pour la première période **dts** (a), k est fermé:

$$\mathbf{I_{C1} = C1\frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t)}$$

$$\mathbf{I_{C2} = C2\frac{dV0(t)}{dt} = -I_0(t)}$$

$$\mathbf{V_L = L\frac{dVL(t)}{dt} = V_i(t)} \qquad \textbf{(I.9)}$$

2) Pour la deuxième période **(1-d)T$_s$** (b), k est ouvert :

$$\mathbf{I_{C1} = C1\frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t)}$$

$$\mathbf{I_{C2} = C2\frac{dV0(t)}{dt} = I_l(t) - I_0(t)}$$

$$\mathbf{V_L = L\frac{dVL(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t)} \qquad \textbf{(I.10)}$$

I.6.1.3. Hacheur dévolteur-survolteur (buck-boost) :

Le convertisseur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée [17]. La figure ci-dessous donne la forme de l'hacheur dévolteur-survolteur :

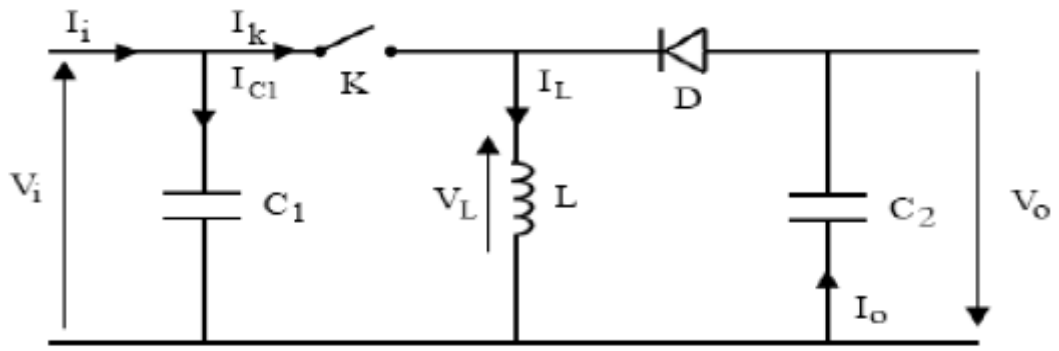
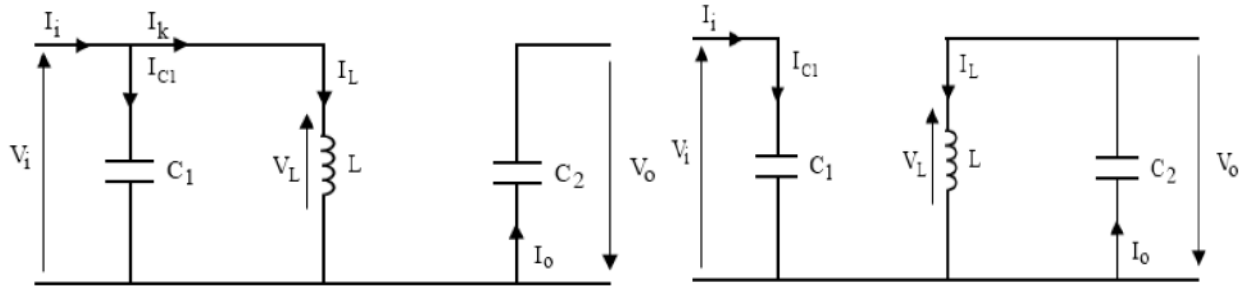


Figure.I.19 schéma d'un convertisseur dévolteur-survolteur

La figure ci-dessus montre les deux phases d'un convertisseur dévolteur-survolteur :



(a) (b)

Figure.I.20 schéma simplifié de hacheur buck-boost en deux phases

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

1) Pour la première période **dts** (a), k est fermé :

$$\mathbf{I_{C1} = C1\frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t)}$$

$$\mathbf{I_{C2} = C2\frac{dV0(t)}{dt} = -I_0(t)}$$

$$\mathbf{V_L = L\frac{dVL(t)}{dt} = V_i(t)} \qquad \textbf{(I.11)}$$

2) Pour la deuxième période **(1-d)T_s** (b), k est ouvert :

$$\mathbf{I_{C1} = C1\frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t)}$$

$$\mathbf{I_{C2} = C2\frac{dV0(t)}{dt} = I_l(t) - I_0(t)}$$

$$\mathbf{V_L = L\frac{dVL(t)}{dt} = V_0(t)} \qquad \textbf{(I.12)}$$

I.6.2. Poursuite du point de puissance maximale (MPPT) :

I.6.2.1. Définition :

Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. [20]

Les premières utilisations du MPPT remontent à 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux photovoltaïques. Le développement du MPPT a constitué un thème techniquement attrayant, si bien que finalement, un grand nombre de procédures et techniques ont été développés. Elles varient en complexité, capteurs nécessaires, vitesse de convergence, coût, efficacité, matériel pour la réalisation, etc. [21]

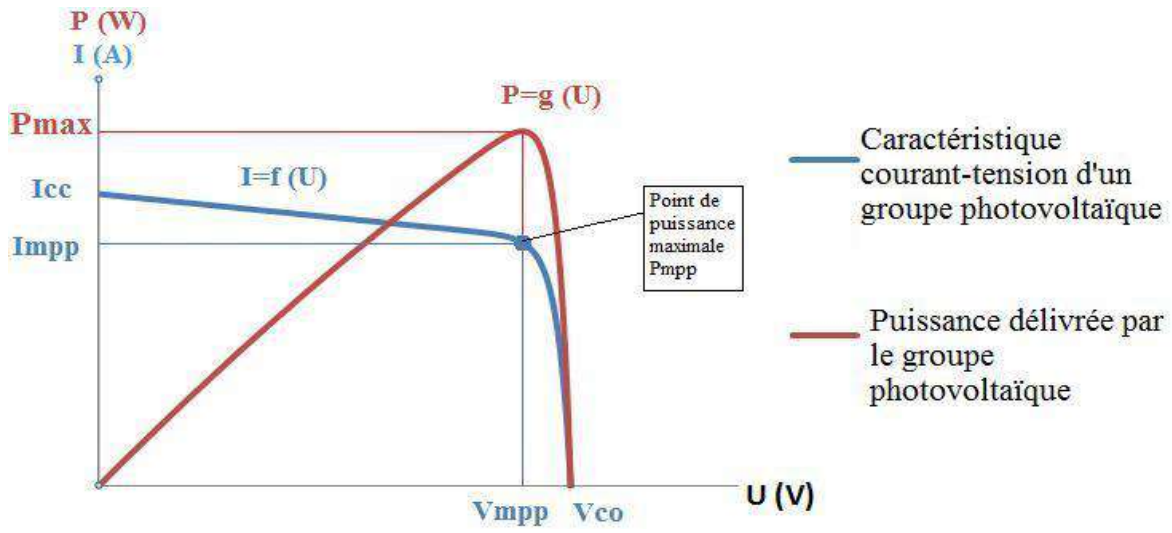


Figure.I.21 Courbe caractéristique de puissance d'un GPV

I.6.2.2. Méthode de poursuite du point de puissance maximale :

Il ya plusieurs méthodes de MPPT (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque, parmi eux :

- Méthode de perturbation et observation (PO).
- Méthode de conductance Incrémentale (IC).
- Méthode de logique floue (FL).
- Méthode de la logique floue optimisée par le PSO (PSO-FL).

Dans ce chapitre en parlerons de méthode de perturbation et observation (PO).

I.6.2.3. La technique Perturbation & Observation (PO) :

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension Vref, ou du courant Iref, et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée (P=VI) . Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV. [22]

La Figure(I.22) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de

fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Pour une variation de charge (cas b), nous pouvons également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lier aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). [23]

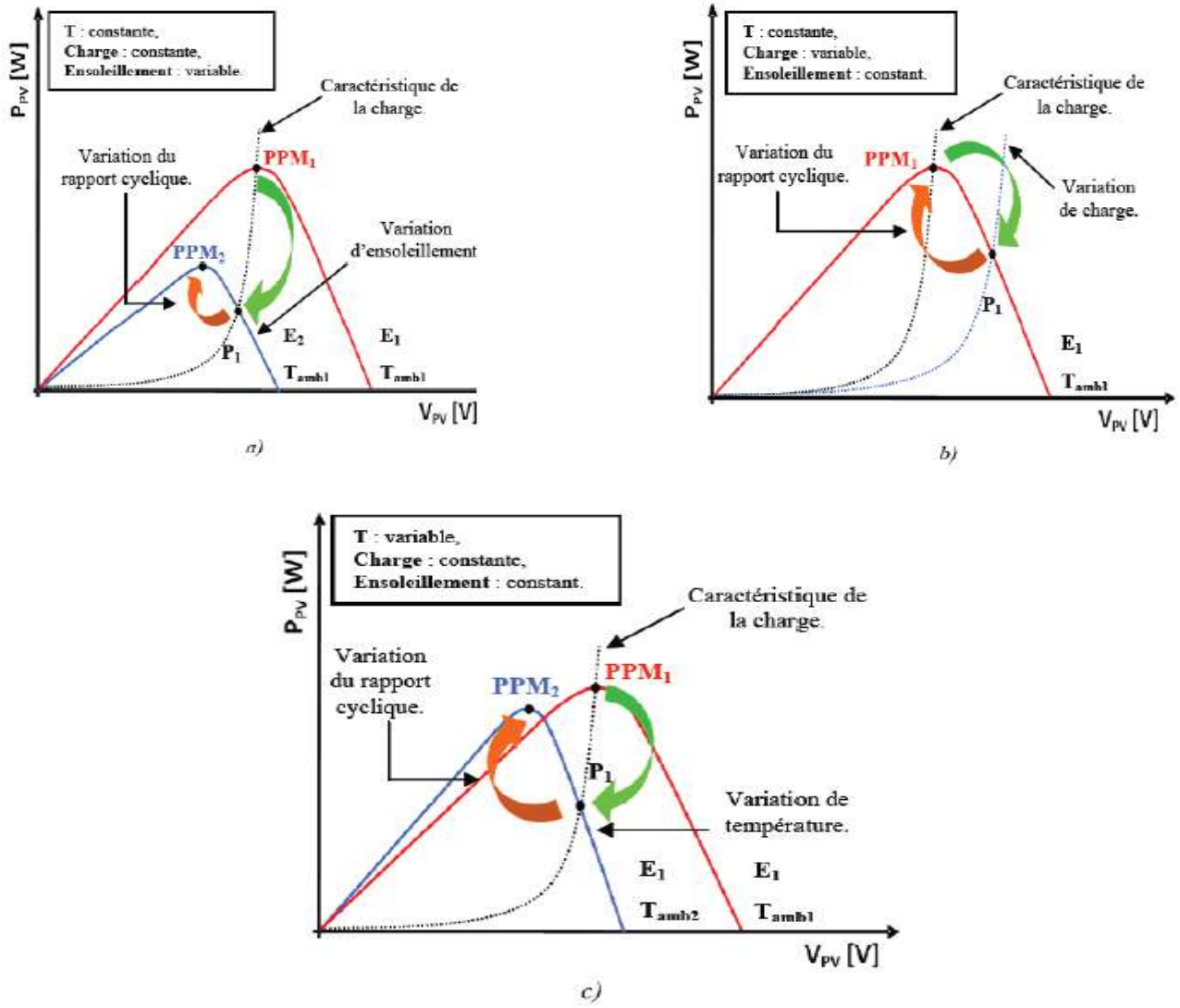


Figure.I.22 Recherche et recouvrement du point de puissance maximale

1) Cas a : variation d'ensoleillement
2) Cas b : variation de charge
3) Cas c : variations de température de fonctionnement du GPV

L'organigramme mis en œuvre pour le contrôleur PO est présenté par la Figure suivante : [19]

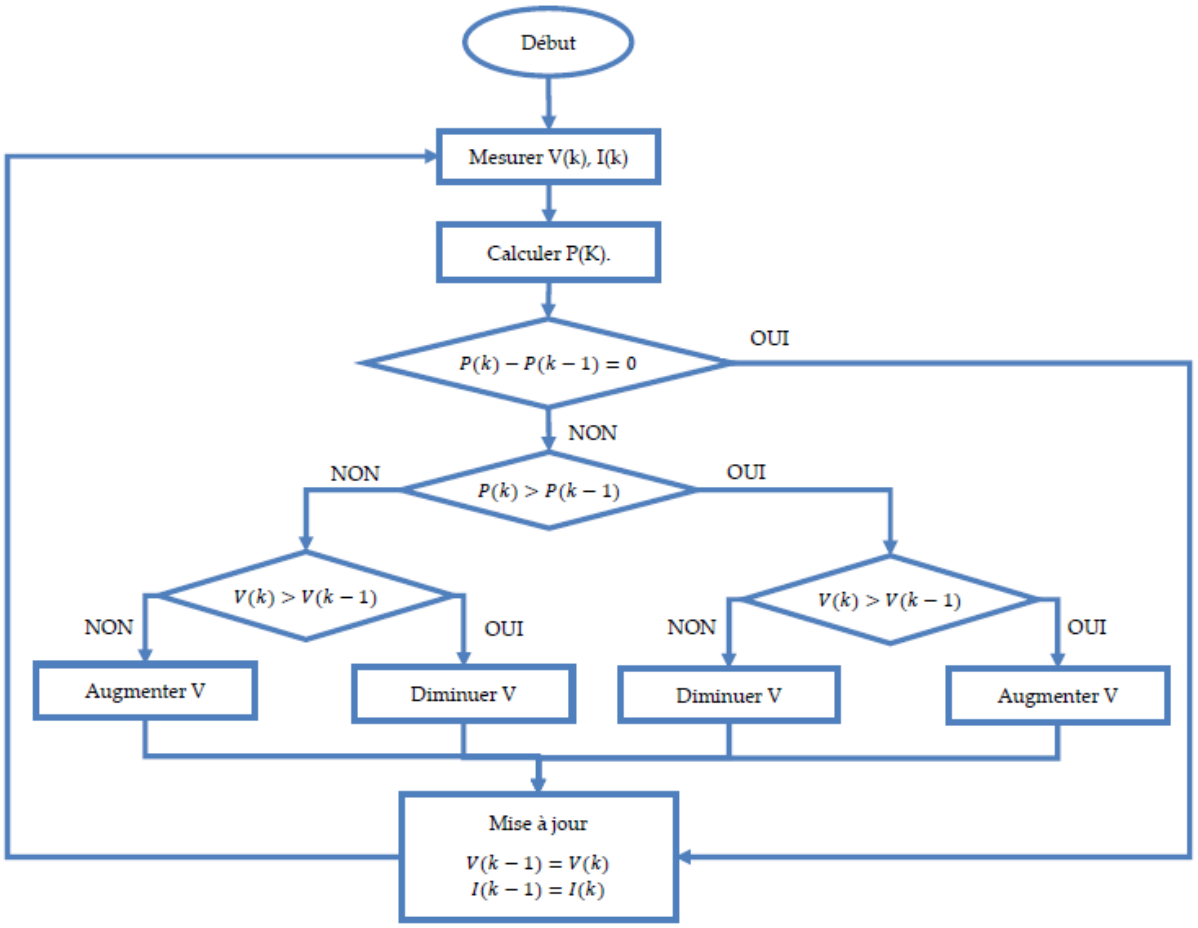


Figure.I.23 Organigramme de la méthode PO.

Dans ce chapitre, nous présenterons une étude de modélisation et de simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Ce système est comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge résistive «batterie».

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

I.6.2.4. Résultats de simulation de la méthode (P&O) :

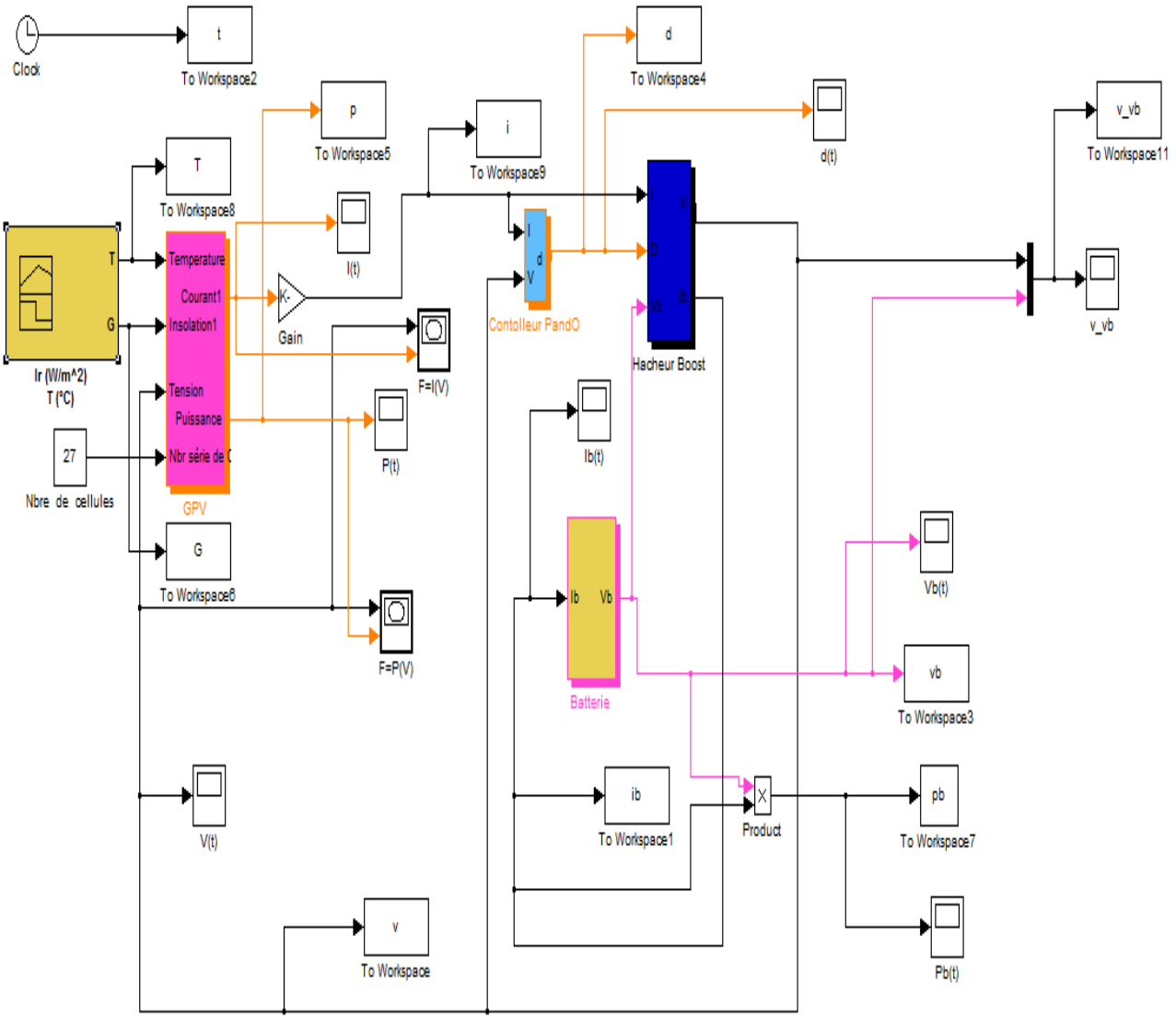


Figure.I.24 schéma blocs de la commande MPPT avec la méthode (P&O)

Les résultats de simulation de la commande par la méthode P&O sont représentés aux figures (I.25) à (I.30)

Avec irradiation de 1000w/m^2

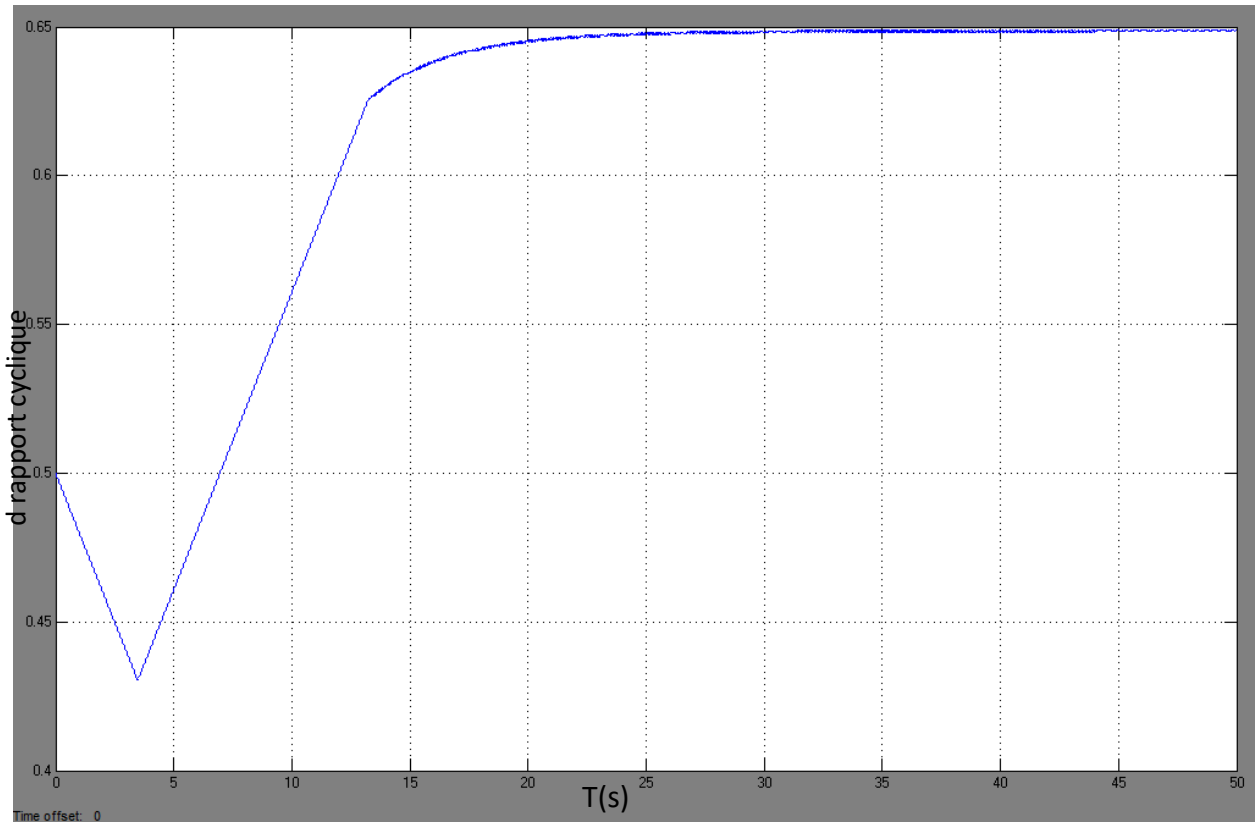


Figure.I.25 Evolution de rapport cyclique d(t)

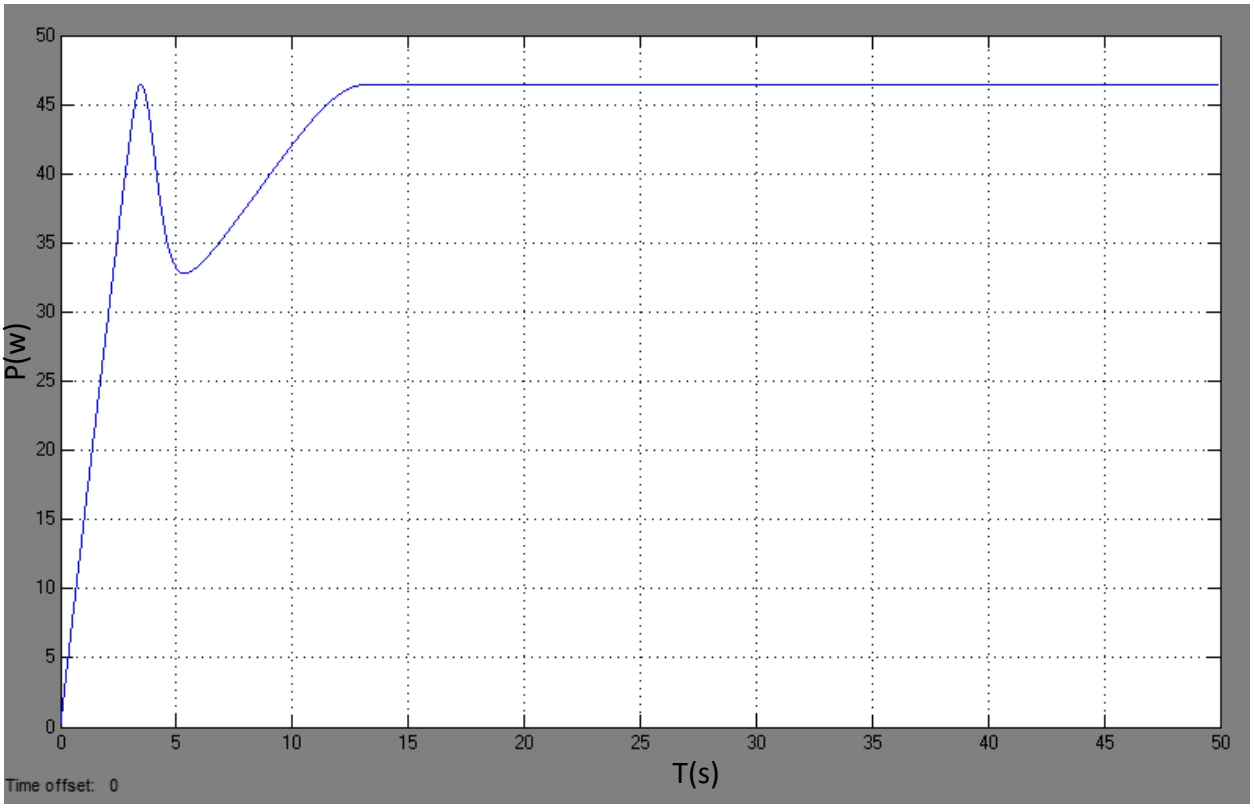


Figure.I.26 La puissance à la sortie de PV P (W) en fonction de t (s)

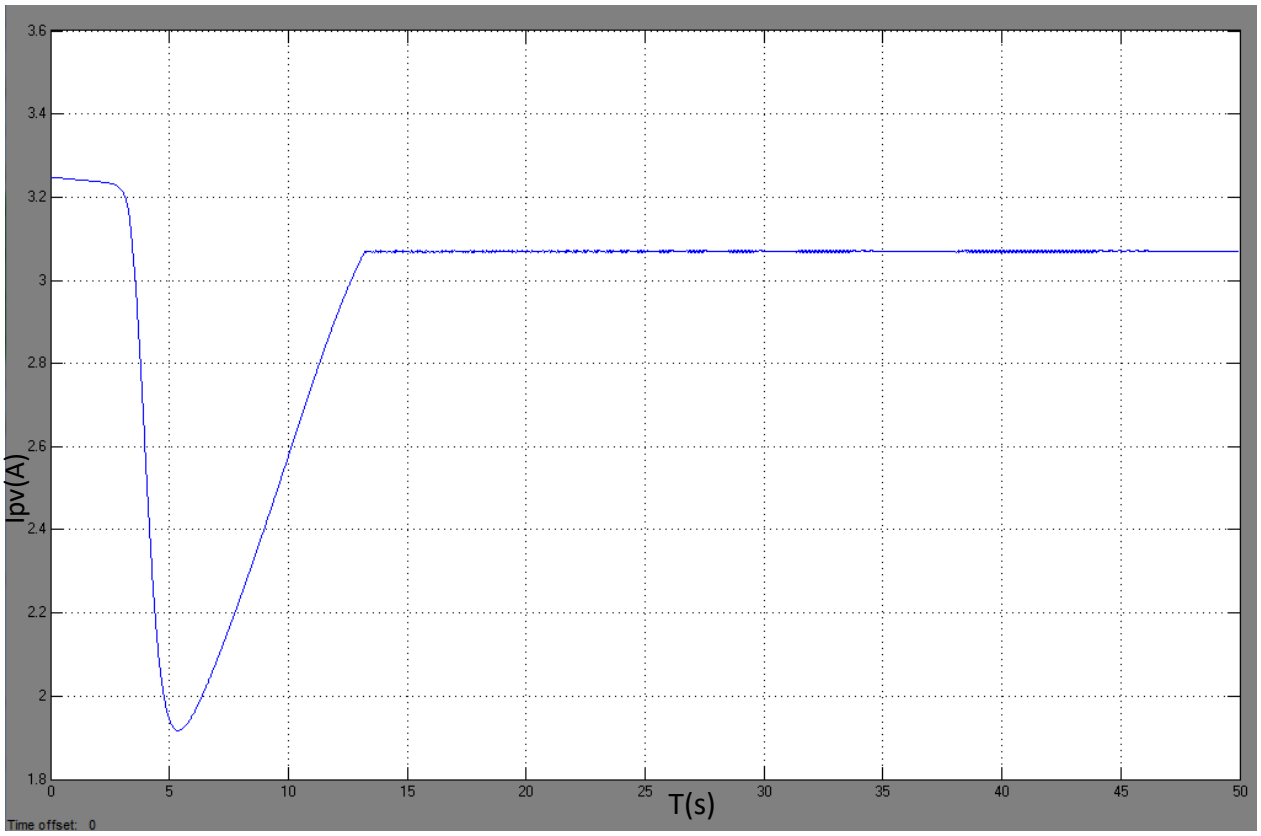


Figure.I.27 Le courant à la sortie de PV I(A) en fonction de t(s)

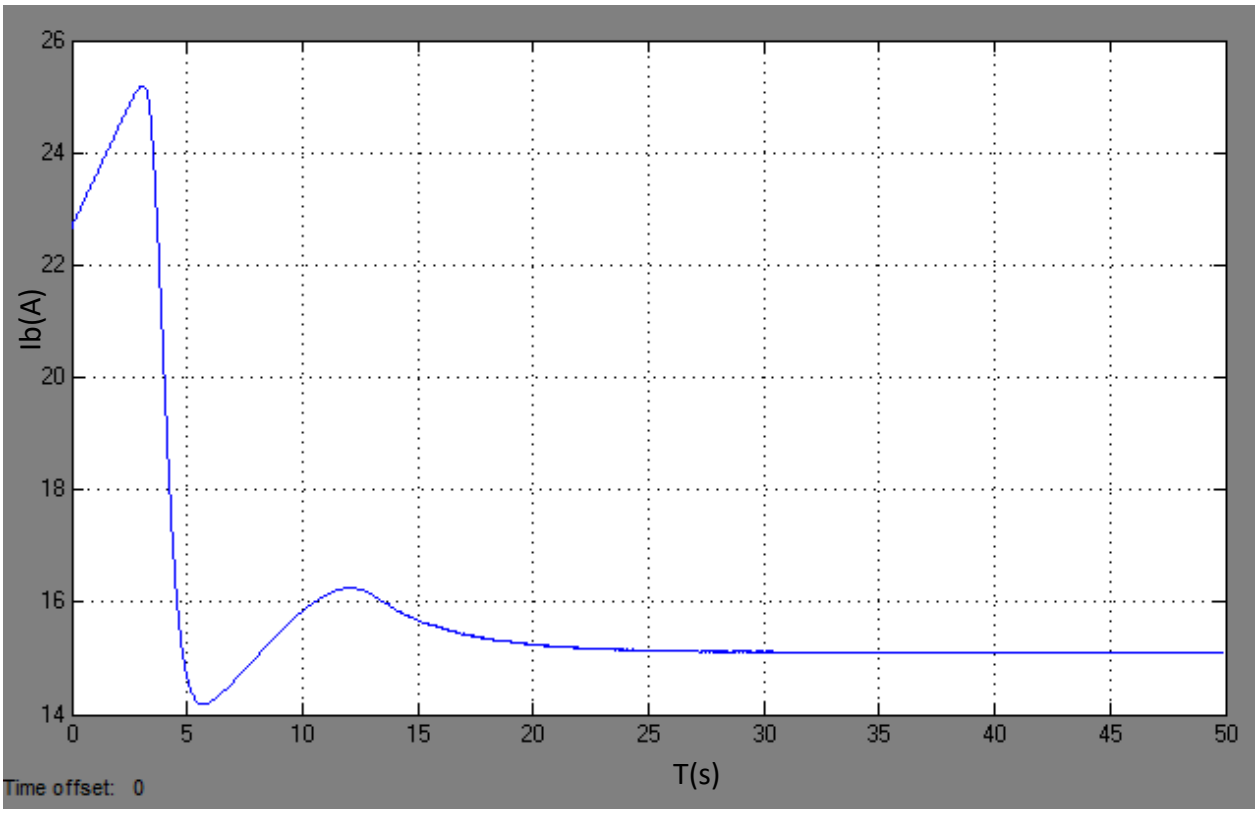


Figure.I.28 Le courant à la sortie de l'hacheur Ib(t)

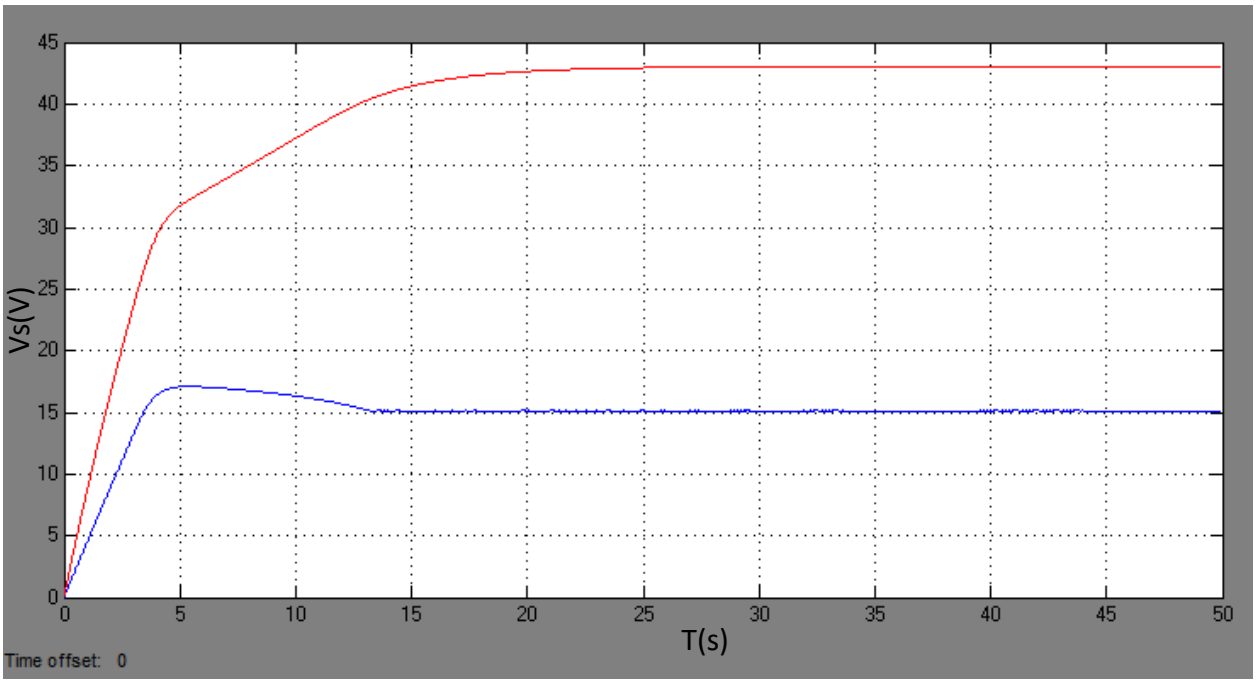


Figure.I.29 La tension à la sortie de l'hacheur par rapport à l'entrée Vs(V) en fonction de t(s)

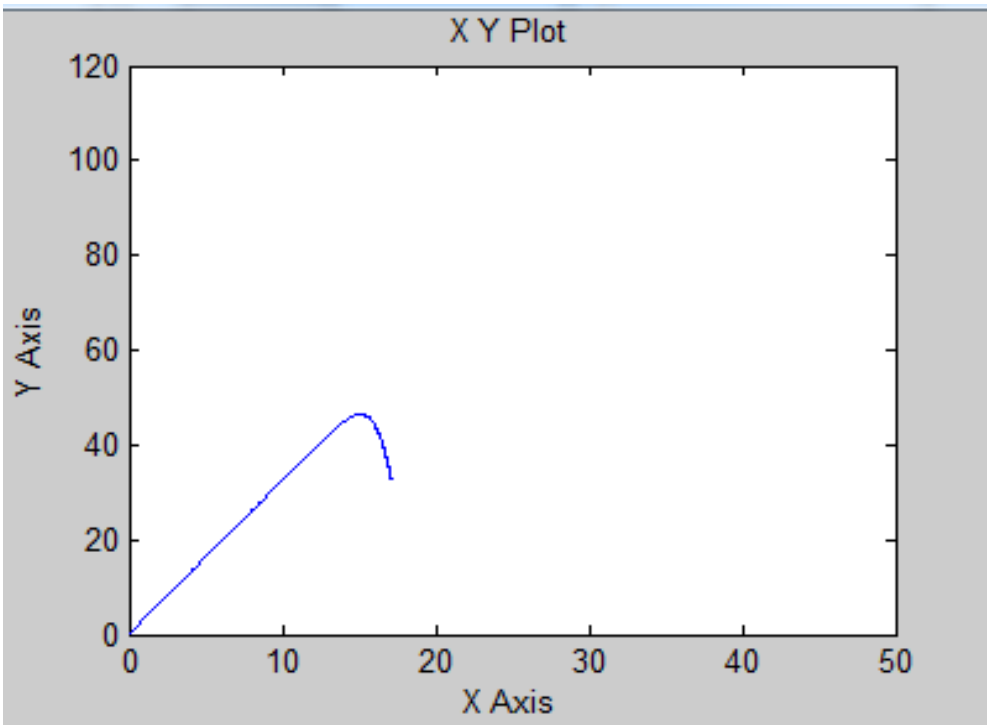


Figure.I.30 MPPT pour un éclairement de 1000W P(V)

I.6.2.5. Interprétations des résultats :

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures (2.25) à (2.30). Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que le hacheur boost et la commanda MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles. L'hacheur boost fournie un courant à sa sortie supérieure au courant débitée par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Nous pouvons conclure que la commande MPPT avec la méthode (P&O) permet d'utiliser la puissance maximale du générateur PV. L'irradiation solaire influe beaucoup plus sur le courant photovoltaïque que la tension, cette dernière change avec la variation de la température.

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons défini l'énergie photovoltaïque et modélisé la cellule photovoltaïque, les performances de module photovoltaïque

Ainsi, nous avons cité le convertisseur Boost, le convertisseur Buck et convertisseur buckboost. Nous avons présenté aussi la commande MPPT des convertisseurs DC/DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale par la méthode (P&O).

Chapitre II :
L’étude de convertisseur à Z source

II.1. Introduction :

Les onduleurs de source de tension et de courant (VSI et CSI) ont une large gamme d'applications telles que leur utilisation dans les alimentations spéciales, les véhicules électriques hybrides, systèmes d'alimentation distribués et beaucoup plus. Ils ont encore de nombreuses limitations en raison de l'augmentation rapide des inventions comme les problèmes de fiabilité et gamme de tension. En outre, ils peuvent se comporter comme convertisseurs dévolteur ou survolteur à la fois.

Les ressources énergétiques renouvelables comme les parcs éoliens offshores ou la production de cellules photovoltaïques nécessitent un système de convertisseur pour convertir la tension CC en tension CA.

Dans les systèmes de conversion traditionnels, des transformateurs sont utilisés pour augmenter la tension de sortie. Un coût élevé est nécessaire pour mettre en œuvre le transformateur de ligne. En outre, il provoque la pollution sonore et a une taille énorme. Les transformateurs peuvent être remplacés par la des onduleurs de source de courant ou de tension. Pour surmonter les problèmes susmentionnés une nouvelle topologie nommé onduler Z-source a été proposé en 2002 par F. Z. Peng.

II.2. Présentation de z source :

Un Onduleur à Z-source avec réseau d'impédance unique, condensateurs C_1 et C_2 et les inducteurs L_1 et L_2 sont connectés en forme de X pour coupler la puissance source avec circuit principal de l'onduleur comme indiqué dans la **figure II.1**. L'impédance de base réseau source est la combinaison de deux éléments linéaires de stockage d'énergie, c. à-d. *L* et *C*. Cependant, pour améliorer les performances du circuit, différentes configurations réseau sont possibles avec l'ajout d'éléments non linéaires tels que diodes ou commutateurs dans le réseau d'impédance.[24]

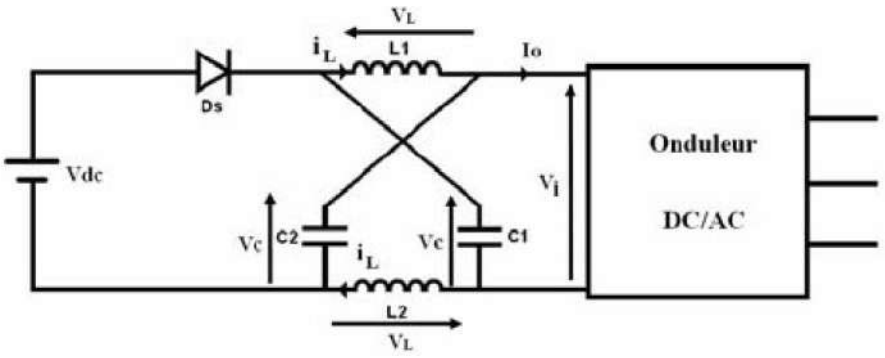


Figure.II.1 modèle d'impédance Z-source lié avec un onduleur

II.3. Principe de fonctionnement de l'onduleur z-source :

Nous définissons V_i la tension d'entrée de l'onduleur **figure II.1**, $V_{M\ max\ la}$ valeur crête du fondamental de la tension simple de sortie de l'onduleur, $V_{i\ max}$ la valeur crête de la tension d'entrée de l'onduleur

m, profondeur de modulation de l'onduleur est définie par :

$$m = \frac{2V_{m\,max}}{V_{i\,max}} \qquad \textbf{(II.1)}$$

b, amplification de l'étage continu de Z source est définie par :

$$b = \frac{V_{i\,max}}{V_{DC}} \qquad \textbf{(II.2)}$$

B, amplification globale du système est définie par :

$$B = mb = \frac{2V_{m\,max}}{V_{DC}} \qquad \textbf{(II.3)}$$

Les tensions aux bornes de capacités C1 et C2 sont identiques (notées V_c) ainsi que les courants dans les bobines L1 et L2 (notés I_L).

$L1=L2=L$

$C1=C2=C$

Le fonctionnement du dispositif est lié aux comportements des éléments non linéaires entourant l'étage continu Z-source :

- l'état de la diode Ds : passante ou bloquée

- l'état de l'onduleur : roue libre, état actif (échange de puissance entre l'étage continu et la charge), court-circuit des bras de l'onduleur

Le **tableau (II.1)** montre les différentes configurations réellement présentes avec les commandes classiques.

Etat de la diode Ds	Onduleur en roue libre	Onduleur actif	Z-source court-circuité
Passante	OUI	OUI	NON
Bloquée	NON	NON	OUI

Tableau.II.1 Les états utilisés avec la commande Z-source

En effet, le fonctionnement normal du montage ne permet pas la présence des 6 combinaisons au niveau du Z-source [25]:

- Si les bras de l'onduleur sont court-circuités, la diode est nécessairement bloquée (lié au mode élévateur du montage).
- Si l'onduleur est actif (échange de puissance entre l'étage continu et la charge), alors la diode Ds est passante.
- Si l'onduleur est en roue libre, Ds est normalement passante, ceci étant lié au choix de la fréquence de découpage de l'onduleur et aux valeurs usuelles de L et C.

- **Mode 1 - Ds passante et onduleur actif**

Durant cet état l'onduleur peut être représenté comme une source de courant vu de l'étage continu Z-source **(figure II.2)**

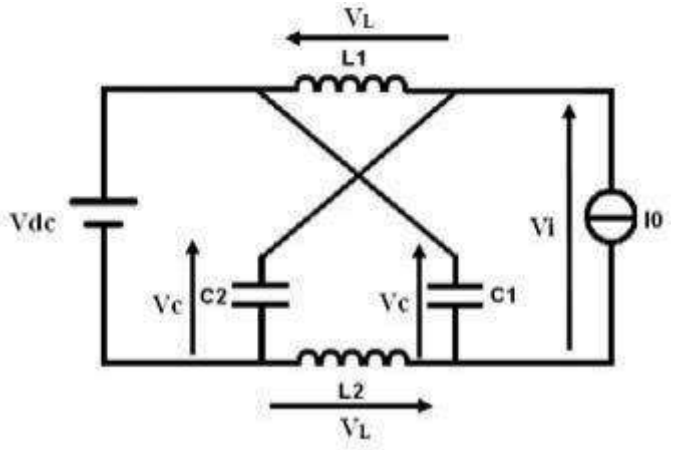


Figure.II.2 Schéma équivalent du mode 1

Les valeurs des tensions (II.1) et (II.2) peuvent être déterminées

$V_L = V_{dc} - V_c$ **(II.4)**

$V_i = V_c - V_L = 2V_c - V_{dc}$ **(II.5)**

- **Mode 2 - Ds passante et onduleur en roue libre (sans court - circuit)**

Durant cet état, l'onduleur peut être représenté comme un circuit ouvert **(figure II.3)** et les tensions Vc et vi restent identiques aux équations (II.4) et (II.5). C'est un cas particulier pour lequel i_0 est nul.

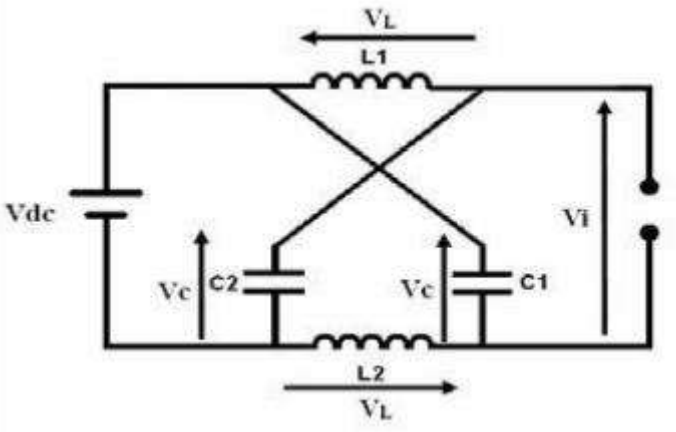


Figure.II.3 Schéma équivalent du mode 2

- **Mode 3 – Ds bloquée et Z-source court-circuité**

Durant cet état, au moins un bras de l'onduleur est court-circuité, ce qui impose une tension nulle en sortie de l'étage continu Z-source (figure II.4).

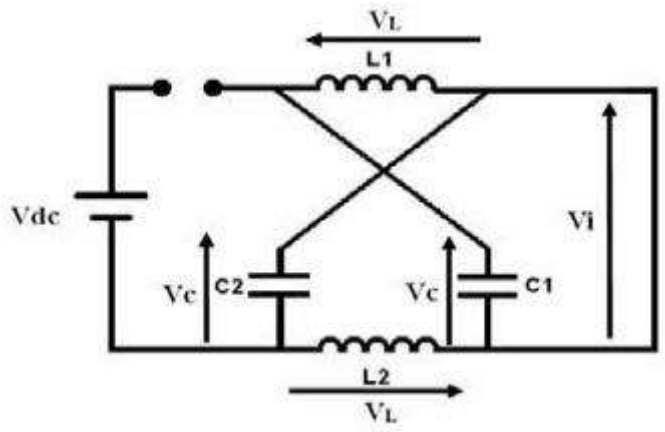


Figure.II.4 Schéma équivalent du mode 3

Donc la tension de la charge est nulle (Vi=0) : il n'y a pas de transfert d'énergie.

La durée de l'état court-circuit est égale à T_0, et la période de commutation est égale à T

A partir de la figure (II.4) nous pouvons déterminer les équations des tensions (II.6) et (II.7)

$$V_L = V_c \quad \textbf{(II.6)}$$

$$V_i = 0 \quad \textbf{(II.7)}$$

De ces équations électriques, il est possible de déduire la valeur des tensions du montage durant une période de modulation et de déterminer les valeurs des amplifications.

T désigne la demi-période de la commande de la structure

Z-source, la commande étant élaborée à partir de porteuses triangulaires :

$$T=T_0+T_1 \quad \textbf{(II.8)}$$

Avec T_0 durée des courts-circuits de l'onduleur Z-source (V_i=0) et T_1 la durée des états actifs de l'onduleur durant T.
Le rapport cyclique de court-circuit T_0/Test noté D_0.

Nous pouvons déduire la valeur moyenne de l'inductance L, tension aux bornes de capacité et valeur moyenne du V_i :

$$\begin{cases} < V_L > = \frac{T0 \times Vc + T1 \times (Vdc - Vc)}{T} = 0 \\ V_{c1} = V_{c2} = V_c = \frac{T1}{T1 - T0} V_{dc} \\ < V_i > = \frac{T1\ x\ (2Vc - Vdc)}{T} = \frac{T1}{T1 - T0} V_{dc} = Vc \end{cases} \quad \textbf{(II.9)}$$

Pour calculer la tension maximale de l'onduleur $V_{i\,max}$. Nous utilisons les coefficients d'amplification de la structure :

$$V_{i\,max} = \frac{T1}{T1 - T0} V_{dc} = 2V_c - V_{dc} = \frac{1}{1 - 2\frac{T0}{T}} V_{dc} \quad \textbf{(II.10)}$$

Nous remplaçons l'équation (II.10) dans le rapport d'amplification de l'étage continu(b) :

$$b = \frac{V_{i\,max}}{V_{dc}} = \frac{1}{1 - 2\frac{T0}{T}} = \frac{1}{1 - 2D0} \geq 1 \quad \textbf{(II.11)}$$

Avec : $D_0 = \frac{T_0}{T}$ **(II.12)**

D_0 : le rapport cyclique de court-circuit

II.4. Etude de l'amplification maximale :

L'amplification maximale est obtenue lorsqu'on court circuite au maximum l'onduleur, avec un rapport cyclique de court-circuit maximal noté D_0. Cette durée est limitée à celle des états nuls afin de ne pas modifier la modulation appliquée à la charge, donc cette valeur maximale dépend de l'indice de modulation [26]

$$< D_0 >= \frac{2\pi - 3\sqrt{3m}}{2\pi} \quad \textbf{(II.13)}$$

La contrainte sur le rapport cyclique de court-circuit maximal ($D_0 < 0.5$) implique une profondeur de modulation m> $\frac{\pi}{3\sqrt{3}} (\approx 0.6)$

La **figure II.5** montre la variation du facteur de modulation (voltage gain) en fonction du rapport cyclique (duty cycle)

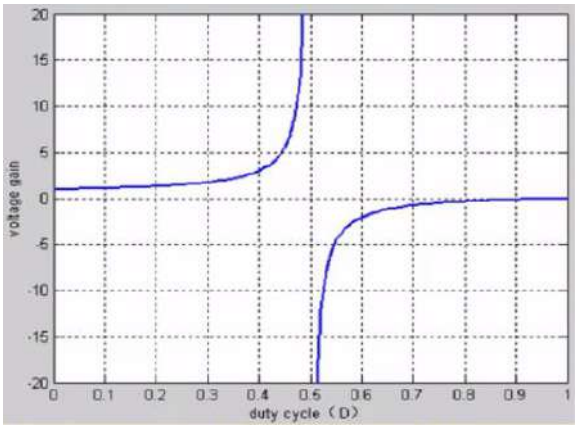


Figure.II.5 Variation du facteur de modulation en fonction du rapport cyclique

II.4.1 Interprétation de graphe :

Nous remarquons que la tension de sortie prend des valeurs entre 0 et l'infini lorsque le rapport cyclique D est entre 0 et 0.5, donc nous disons que la z-source à booster la tension d'entrée. Afin de garder une tension positive Vi aux bornes de l'onduleur, le rapport cyclique de court-circuit D0 doit être inférieur à 0.5.

C'est l'avantage du Z-source parce que si on ajoute réseau d'impédance ZS à un onduleur conventionnel nous pouvons booster la tension continue d'entrée sans utiliser un hacheur Boost, ce qui permet de réduire le nombre d'interrupteurs.

II.4.2 Le coefficient d'amplification :

Le coefficient d'amplification ou de réduction du dispositif complet (B) répond à l'équation :

$$V_m = m\frac{V_{i\,max}}{2} = m \times b \times \frac{V_{dc}}{2} = B \times \frac{V_{dc}}{2} \qquad \textbf{(II.14)}$$

II.4.3 Dimensionnements des inductances et les condensateurs :

L'évolution simplifiée des grandeurs de l'étage Z-source est représentée dans **Figure II.6** Si l'ondulation est suffisamment petite, cette courbe est supposée linéaire. Ce n'est pas l'évolution réelle car des hypothèses simplificatrices ont été effectuées comme :

- utiliser une seule phase active de durée T1 alors que l'onduleur a classiquement quatre phases de fonctionnement

- introduire le temps de court-circuit T0 en une seule partie au lieu de trois parties séparées.

Ces hypothèses surévaluent la valeur de l'ondulation de V_c et i_L.

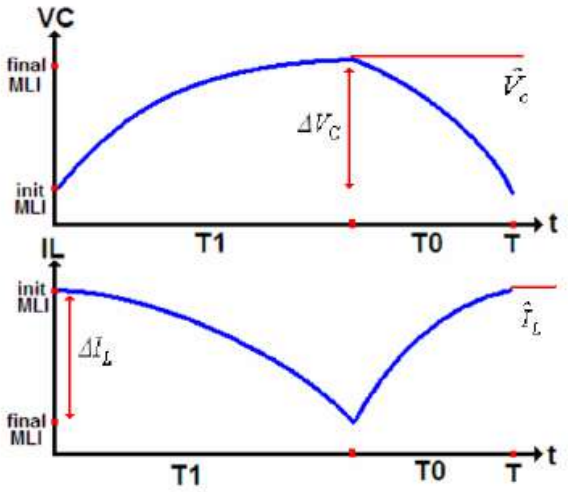


Figure.II.6 la tension des condensateurs et du courant dans la bobine pendant la période T

Alors :

$$\Delta V_c = \frac{<i_c>}{C}\Delta t \text{ et } \Delta I_L = \frac{<V_L>}{L}\Delta t \quad \textbf{(II.15)}$$

Nous déduisons :

$$C = \frac{<i_L>}{2\Delta V_C}T_0 \text{ et } L = \frac{<V_C>}{2\Delta i_L}T_0 \quad \textbf{(II.16)}$$

Le coefficient d'ondulation K est défini par rapport à la valeur moyenne des grandeurs d'état **(II.17)** et est choisi ici identique pour les deux grandeurs

.

$$K = \frac{Ondulation\ Vc}{<Vc>} = \frac{Ondulation\ i_L}{<i_L>} \quad \textbf{(II.17)}$$

Cette valeur est définie par l'utilisateur et est valable pour une période de MLI et permet de dimensionner L et C :

$$\begin{cases} C = \frac{I_0}{2KV_{DC}}T_0 \text{ et } L = \frac{V_{DC}}{2KI_0}T_0 \\ C = \frac{I_0 \times T}{2KV_{DC}}D_0 \text{ et } L = \frac{V_{DC}\times T}{2KI_0}D_0 \end{cases} \quad \textbf{(II.18)}$$

II.5.Simulation :

Réalisation de l'onduleur Z-source par MATLAB Simulink en schéma blocks avec une commande MLI.

- pour les paramètres utilisés dans la simulations :

  Ve= 100V

  F=50Hz

  C1 =C2 = 150 µF

  L1=L2 = 50mH

  Diode=0.001 Ohm

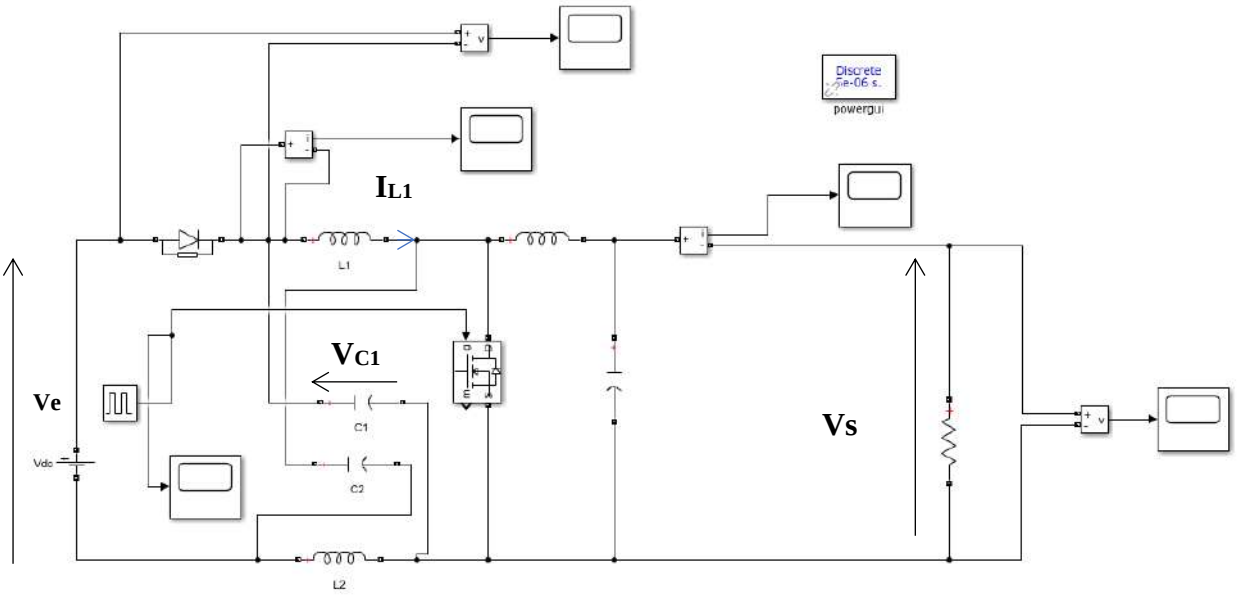


Figure.II.7 architecture de l'onduleur Z-source en MATLAB

II.5.1. Les résultats de la simulation :

Les figures suivantes représente les résultats la tension au borne de bras z-source, l'inductance et la condensateur avec la variation de largeur d'impulsion (%)

II.5.1.1 la simulation pour m=30 :

- largeur d'impulsion=30%

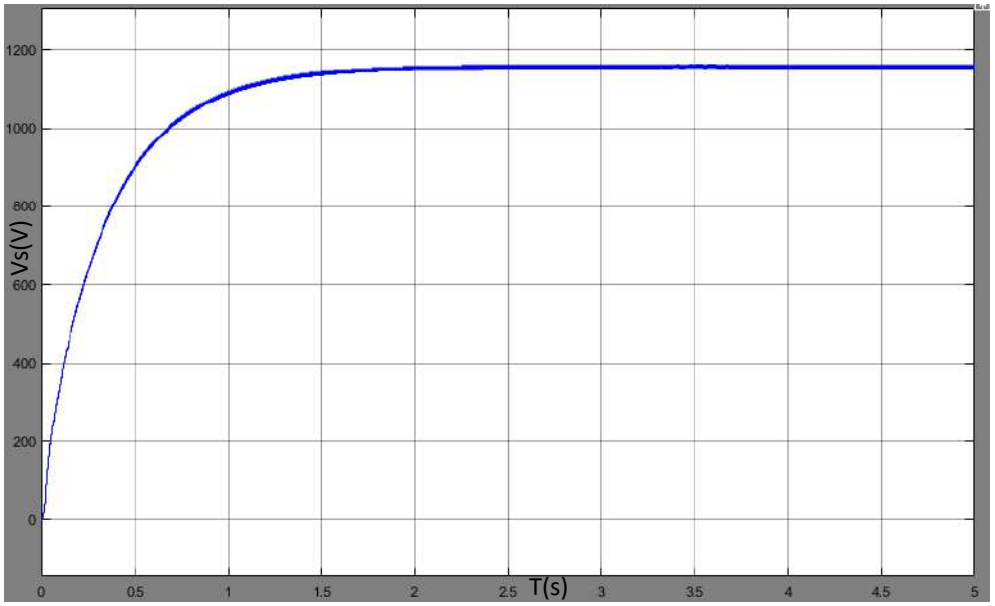


Figure.II.8 la tension du sortie de z-source Vs=f(t) (30%)

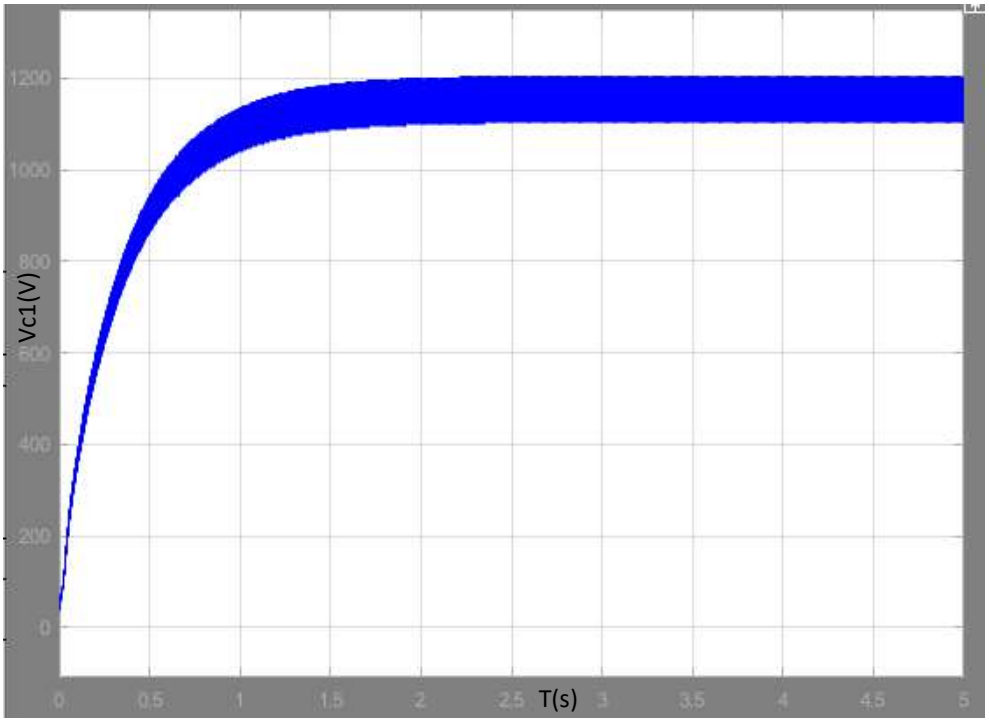


Figure.II.9 la tension au borne du condensateur V_{C1}=f(t)

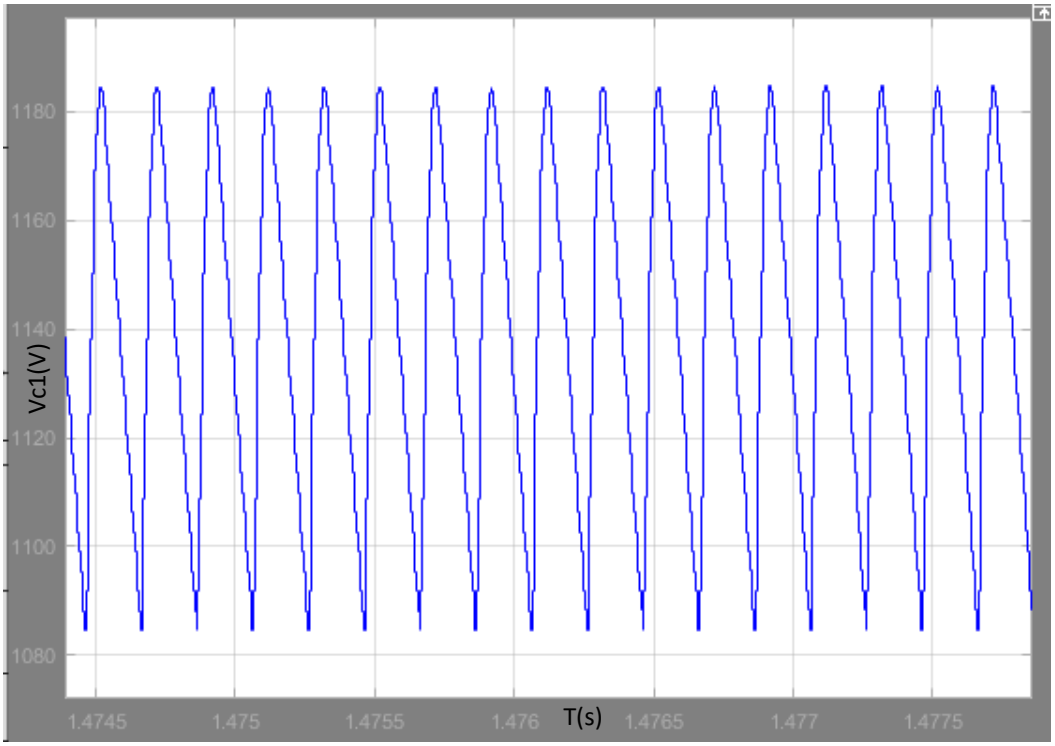


Figure.II.10 zoom de la tension au borne du condensateur $Vc_1=f(t)$

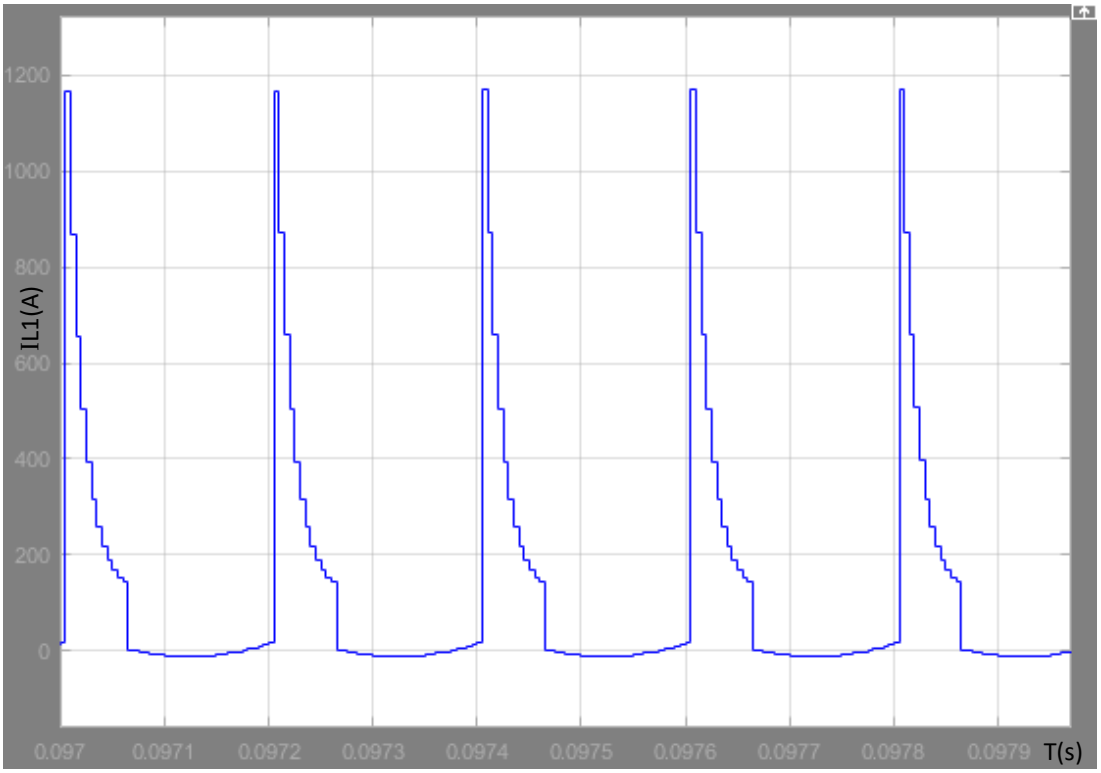


Figure.II.11 le courant passant par l'inductance I_{L1}

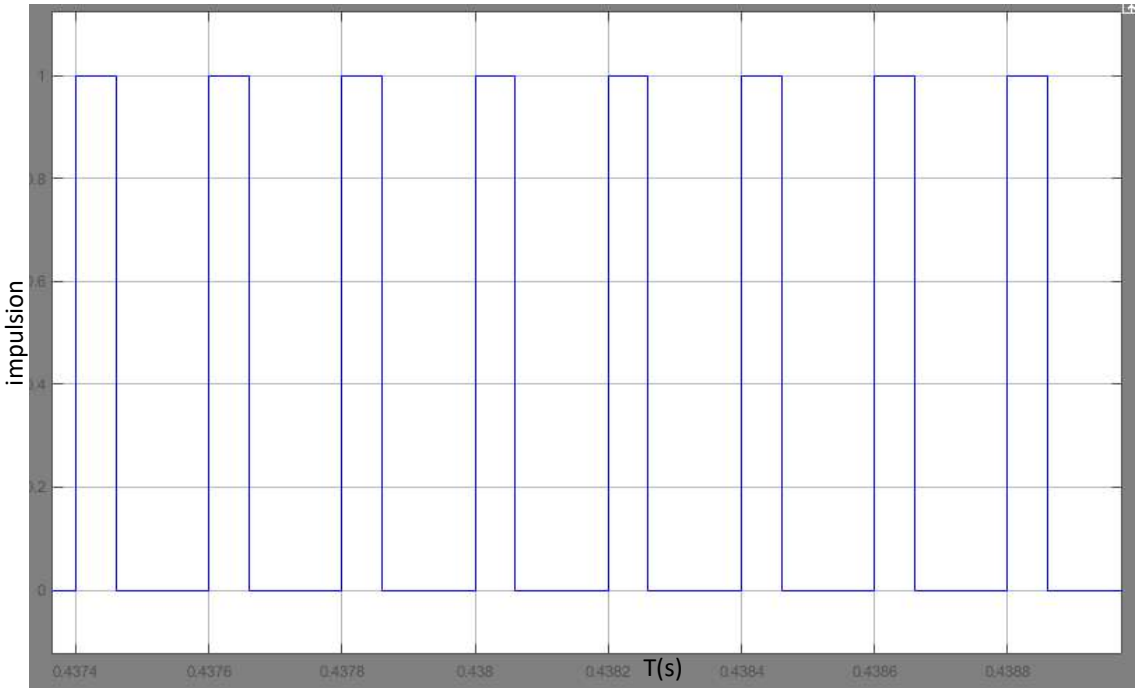


Figure.II.12 modulation de largeur d'impulsion (30%)

II.5.1.2 la simulation pour m=40 :

- Largeur d'impulsion=40%

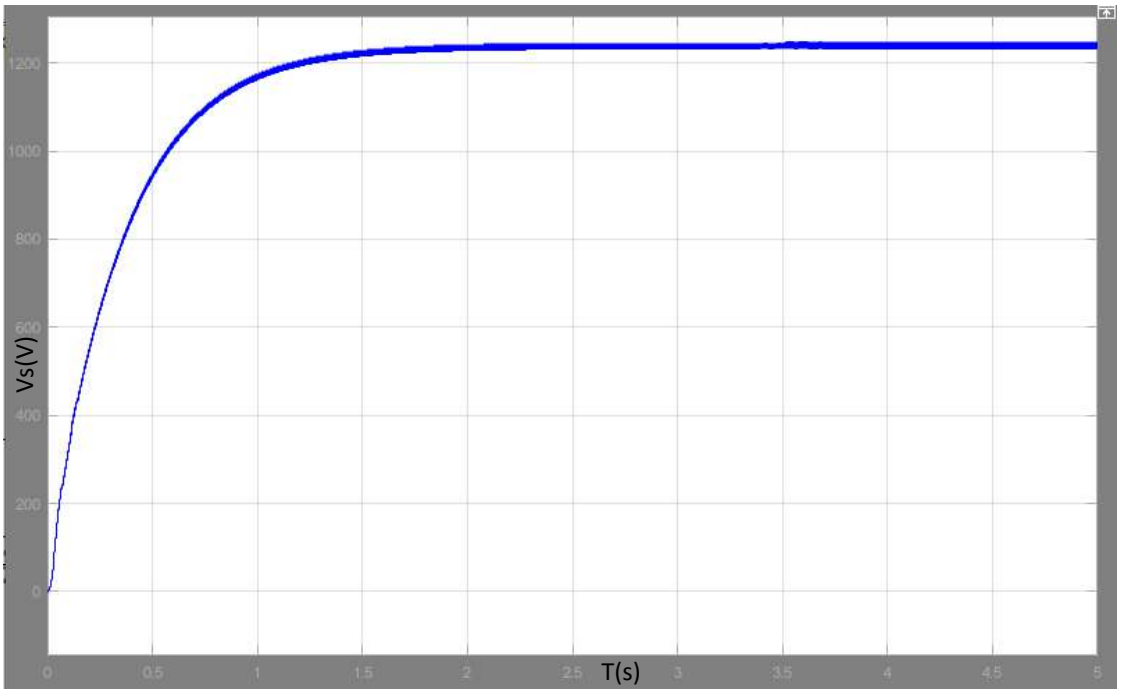


Figure.II.13 la tension du sortie de z-source Vs=f(t) (40%)

II.5.1.3 la simulation pour m=60 :

- Largeur d'impulsion=60%

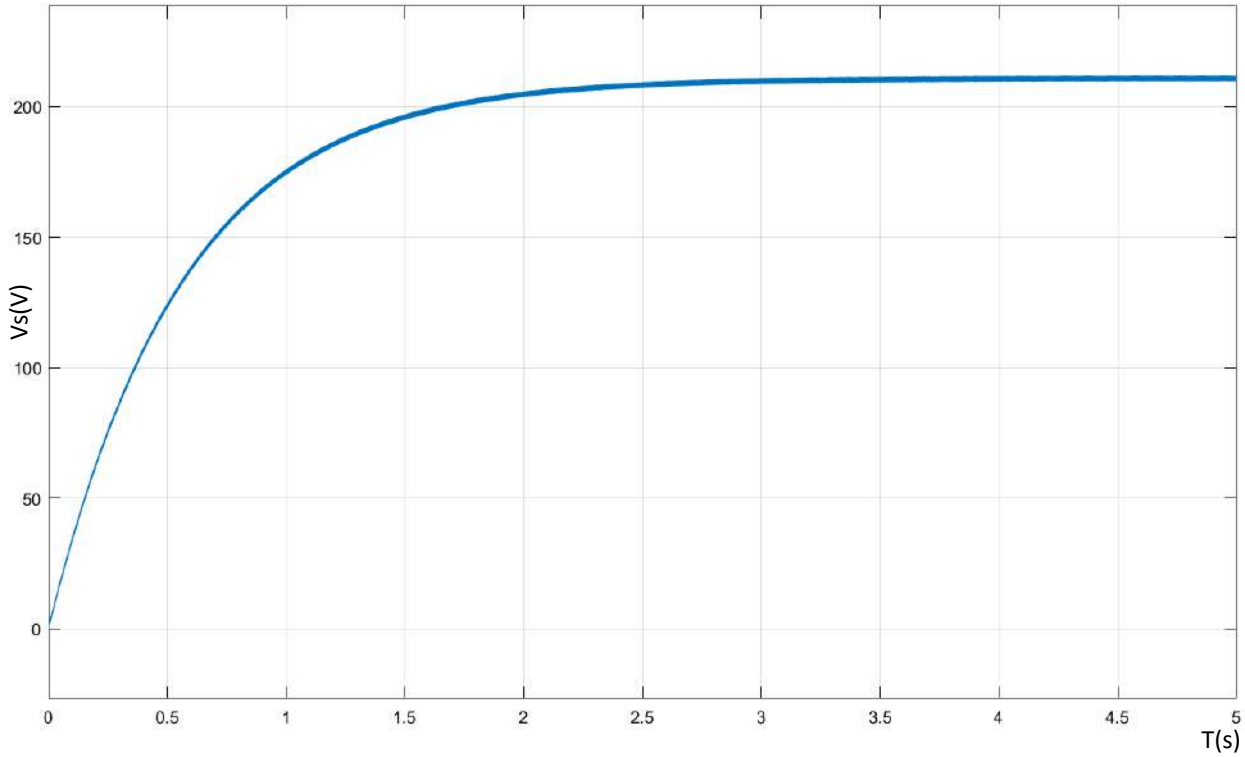


Figure.II.14 la tension du sortie de z-source Vs=f(t) (60%)

II.5.2. Interprétation des résultats :

Le but des inductances est de limiter l'ondulation du courant à travers les dispositifs pendant le mode Boost avec l'état de court-circuit. Pendant le mode de court-circuit. De même, le courant de l'inductance augmente linéairement et la tension à travers l'inductance est égale à la tension à travers la condensateur. Pendant les autres modes, le courant de l'inductance diminue linéairement et la tension à travers l'inductance est la différence entre la tensiond 'entrée et la tension du condensateur, mais la tension du condensateur est toujours égale à la tension d'entrée. Par conséquent, il y a seul un courant continu pur passe par les inducteurs.

Le but du condensateur est d'absorber l'ondulation du courant et de maintenir une tension assez constante afin de garder la tension de sortie sinusoïdale. Pendant le court-circuit, la condensateur charge les inducteurs, et le courant à travers la condensateur est égal à courant à travers l'inducteur.

Quand nous varions la largeur d'impulsion entre 0% et 50% la tension de la sortie de z source augmente alors nous somme à la zone boost comme nous avons vu dans la figure (II.5) et si nous varions la largeur d'impulsion plus de 50% (entre 50% et 100%) la tension de sortie z source déminue alors nous somme à la zone buck comme nous avons vu aussi dans la figure (II.5).

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons pu analyser théoriquement le fonctionnement de l'onduleur à structure Z-source qui nous a permis d'établir les équations de sortie du convertisseur.

Le rendement de l'onduleur Z-source sera limité par les pertes introduites par la modulation et la création des courts-circuits.

La zone d'utilisation du Z-source est intéressante pour un *B* faible associé à un *b* le plus petit possible, en ayant conscience de l'augmentation des pertes introduites par les courts-circuits.

Chapitre III :

Convertisseur multiniveaux à z source

Partie A : L'onduleur multiniveaux et la commande MLI

III.1.Introduction :

Avec le développement de l'électronique de puissance et des composants à semi-conducteurs, la technique des onduleurs multi niveaux représente un domaine de recherche important, ce dernier liée également à des tensions plus élevées. D'autre part, nous cherchons à obtenir des grandeurs de sortie ayant une meilleure définition, c'est-à-dire présentent un contenu harmonique réduit. Il existe plusieurs topologies de la conversion multi niveaux. La première topologie a été initialement proposée par A.Nabac en 1981 pour la génération de plusieurs niveaux de tension.

Dans ce chapitre, Nous allons étudier l'onduleur de tension Multi-niveaux (structure et principe de fonctionnement), et nous allons voir les stratégies de commande par la technique MLI, ainsi la simulation d'onduleur cinq niveaux à z source avec ses résultats et son interprétation.

III.2. Définition des onduleurs multi-niveaux :

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. 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 davantage de signaux, mais le convertisseur résultant présenté de meilleures performances. En plus de permettre d'obtenir une tension de service plus élevée [27].

III.3. Intérêt des onduleurs multi-niveaux :

Ce type de convertisseurs présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. L'amplitude des raies harmoniques est par conséquent d'autant moins élevée. Dans le cas plus précis d'un fonctionnement en modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multi-niveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques [28].

Leur principal avantage est le haut niveau d'efficacité qui est atteint par la réduction des harmoniques crées lors de la conversion de tension. Pour un convertisseur DC/AC par exemple la modulation par largeur d'impulsion se fait habituellement entre deux niveaux, lorsqu'un plus grande nombre de niveaux est utilisé, les résultats obtenus se rapprochent plus de la modulante, généralement sinusoïdale, en conséquence les harmoniques sont réduits. Ainsi, il est possible de réduire la dimension des filtres ou même de les éliminer complètement un autre avantage est la réduction de la fréquence de commutation réduisant ainsi les pertes par commutation, dans certains cas selon le choix de la topologie la tension que doivent supporter les différents interrupteurs est réduite [29].

Parmi les performances les plus intéressantes sont le rendement du convertisseur et la qualité de sa tension de sortie, celle-ci étant essentiellement exprimée en termes de résolution obtenue. Pour cela, nous nous intéresserons aux convertisseurs multi-niveaux symétriques qui semblent adaptés aux systèmes PV. Ces convertisseurs sont constitués de cellules onduleurs connectées en série. Les différentes tâches sont réparties entre différentes cellules, alors que les cellules des convertisseurs multi-niveaux symétriques partagent les mêmes fonctions. Les cellules haute tension des convertisseurs multi-niveaux symétriques sont chargées de convertir le gros de la puissance, tandis que leurs cellules basse tension ont pour mission d'améliorer la résolution et d'effectuer la modulation. La combinaison d'interrupteurs de propriétés différentes permet d'améliorer la résolution et (idéalement) le rendement du convertisseur [27].

III.4.Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

L'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Le but de cette Partie est de donner une vue générale des trois topologies de base des onduleurs multiniveaux, La figure(III.1) représente les trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.

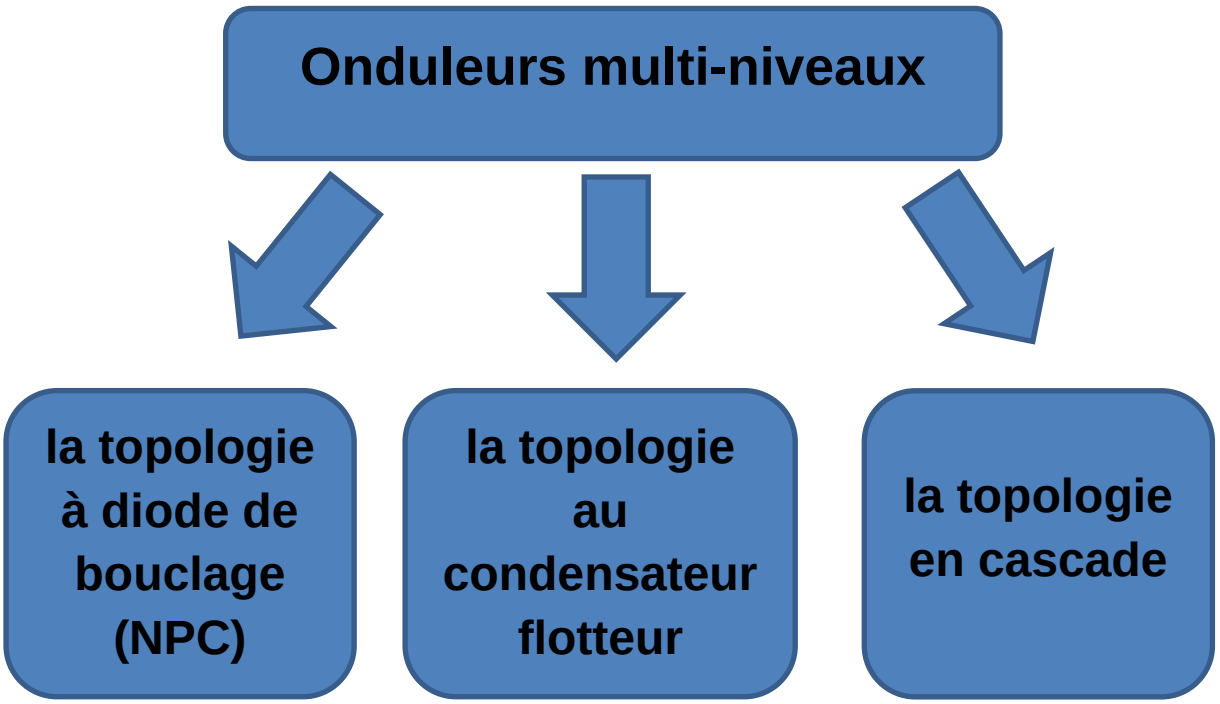
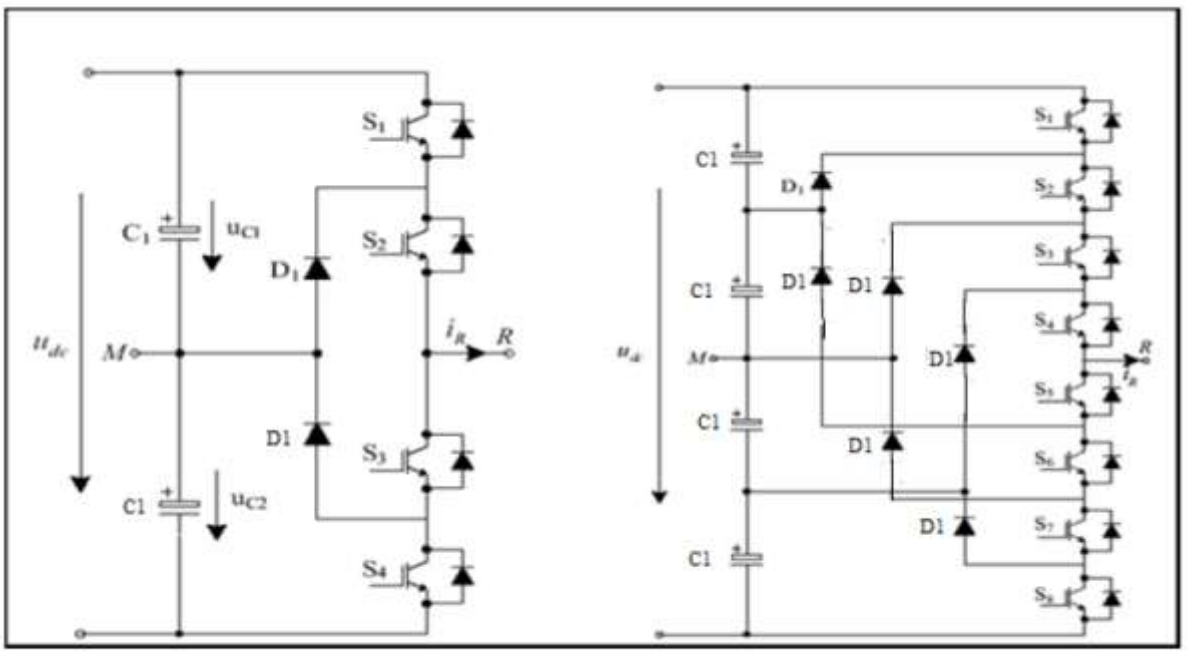


Figure.III.1 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

III.4.1 Onduleur multi niveaux à diode de bouclage :

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi niveaux est le NPC (Neutral Point Clamped). Cette topologie à été initialement proposé par A.Nabac en 1981 pour la génération de N niveaux de tension. La figure(III.2) représente la structure d'un convertisseur triphasé à potentiel distribué, dans laquelle les diodes sont utilisés pour réaliser la connexion avec le point de référence 0.afin d'avoir une tension de 220 V, cependant ces diodes non seulement augmentent le cout de ce type du convertisseur mais créent un problème d'encombrement.

Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, N-1 capacités. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à E/ (N-1), E est la tension totale du bus continu. Chaque couple d'interrupteur (STD, STD') forme une cellule de commutation, les deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire. [30]



a) NPC trois niveaux **b) NPC cinq niveaux**

Figure.III.2 Topologies d'onduleurs NPC

Cette topologie présente plusieurs avantages dont quelques-uns sont énumérés ci-dessous :

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

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

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

Le maintien de l'équilibre de la charge des condensateurs demeure toujours une question ouverte pour les topologies des onduleurs NPC avec plus de trois niveaux. Bien que le l'onduleur NPC à trois niveaux fonctionne avec un facteur de puissance élevé, il est employé surtout dans les circuits de compensation. Cela est dû au problème d'équilibrage des capacités. [31]

III.4.2 Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants :

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

Dans la topologie suivante (Figure. III.3) on représente l'onduleur a condensateur flottant a trois et cinq niveaux.

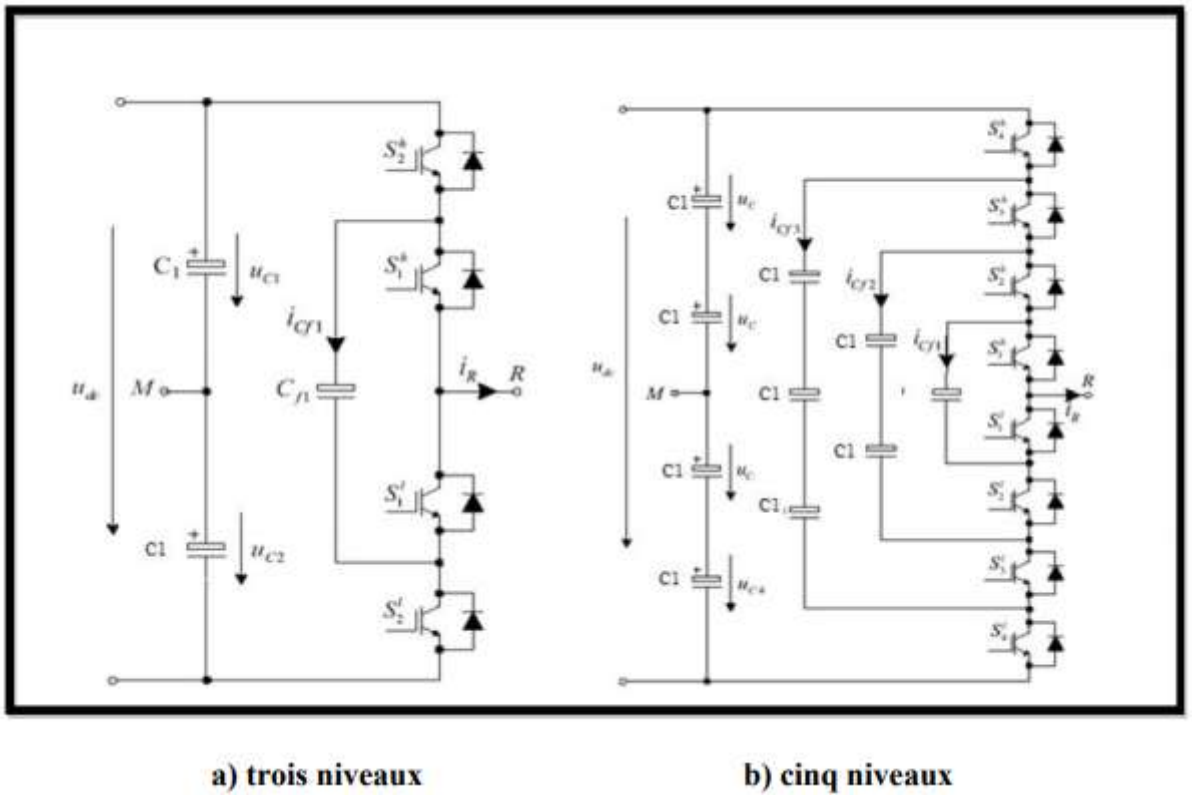


Figure.III.3 Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages :

- Le concept de condensateur Flottant peut être appliquée à un certain nombre de convertisseurs de différents types, DC /AC ou AC/ DC
- La plupart des stratégies de modulation sont facilement appliquée à cette topologie
- Les tensions sur les condensateurs sont automatiquement équilibrées par cette stratégie de modulation conventionnelle. Si désiré, les tensions de condensateur peuvent être activement contrôlées par une modification appropriée des signaux de commande.

Le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs, aussi bien pour un transfert unidirectionnel de la puissance que bidirectionnel.

- Sa modularité permet une extension et une adaptation aisées des stratégies de commande à un nombre élevé de niveaux.
- Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus. [32]

Cette topologie présente quelque inconvénients, tel que:

- La topologie exige beaucoup de condensateurs à haute tension-beaucoup plus nombreux que d'autres topologies. Ces condensateurs doivent conduire le courant de pleine charge pendant au moins une partie du cycle de commutation. Heureusement si la fréquence de commutation est élevée, ces condensateurs peuvent généralement être relativement faibles en valeur de la capacité.
- La topologie en ‘est pas intrinsèque que ment tolérante aux pannes. [30]
- Contrairement au premier cas qui ne nécessite que (N-1) capacité. De plus il est évident que des courants de grandes valeurs efficaces circuleront à travers ces condensateurs.
- Il y a un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés. [32]

III.4.3 Onduleurs multi niveaux en cascade :

En1975, dans les auteurs ont proposé un convertisseur multi niveaux en cascade qui consistait en la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasé, ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. La figure (III.4) Montre le schéma de base d’un convertisseur N niveaux en cascade formé par l’association en série de N-1/2 ponts à deux niveaux. La tension en sortie d’une telle structure est donnée par la somme des N-1/2 tensions en sortie de ces ponts.

Une autre alternative consiste à envisage de mettre en série plusieurs ponts monophasé alimentés par une même source de tension continue Ec. Cette structure est appelée polygonale et l’utilisation d’un transformateur d’isolement à la sortie de chaque pont est obligatoire pour connecter les sortie alternative de chaque pont. [33]

Les complications et le coût des sources isolées pour chaque pont n’est pas un inconvénient sérieux parce qu’il est compensé par les avantages de la construction modulaire. L’avantage principal de cette approche est que la topologie de ce type d’onduleur facilite la maintenance en plus elle permet de donner une façon très pratique pour augmenter le nombre de niveaux [34].Pour améliorer la résolution de ces convertisseurs sans augmenter le nombre de cellules, il est possible d’alimenter les cellules par des tensions d’entrées différentes. [31]

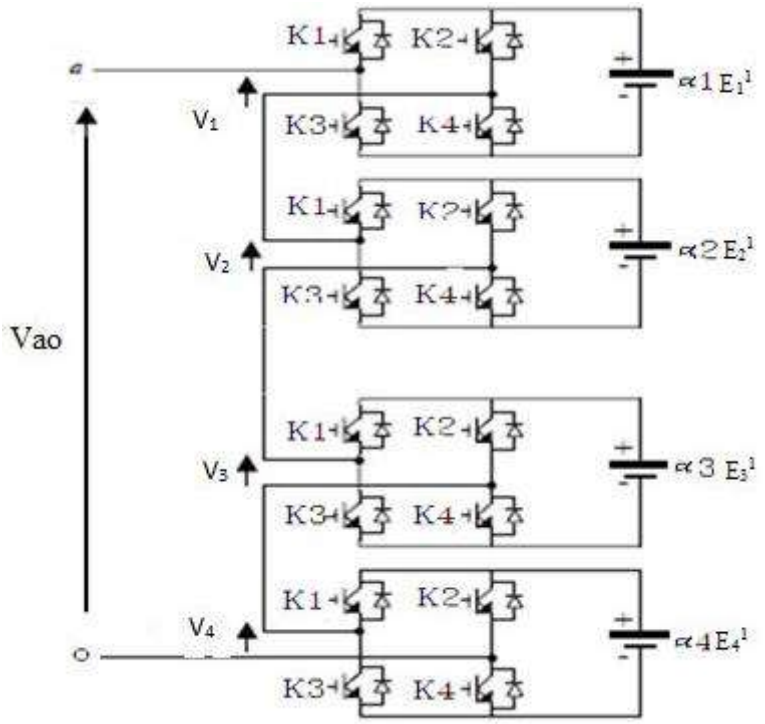


Figure.III.4 Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade

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

Avantage

L'onduleur multi niveaux en cascade est une structure de convertisseurs d'énergie, il présente l'idée d'employer des sources séparées à courant continu pour produire une forme d'onde d'une tension alternative.

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

Inconvénients

- Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur Traditionnel.
- Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
- Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC. [30]

III.5.Techniques de commandes MLI :

Nous distinguons plusieurs types de techniques de MLI, dont nous pouvons citer (figure. III.5)

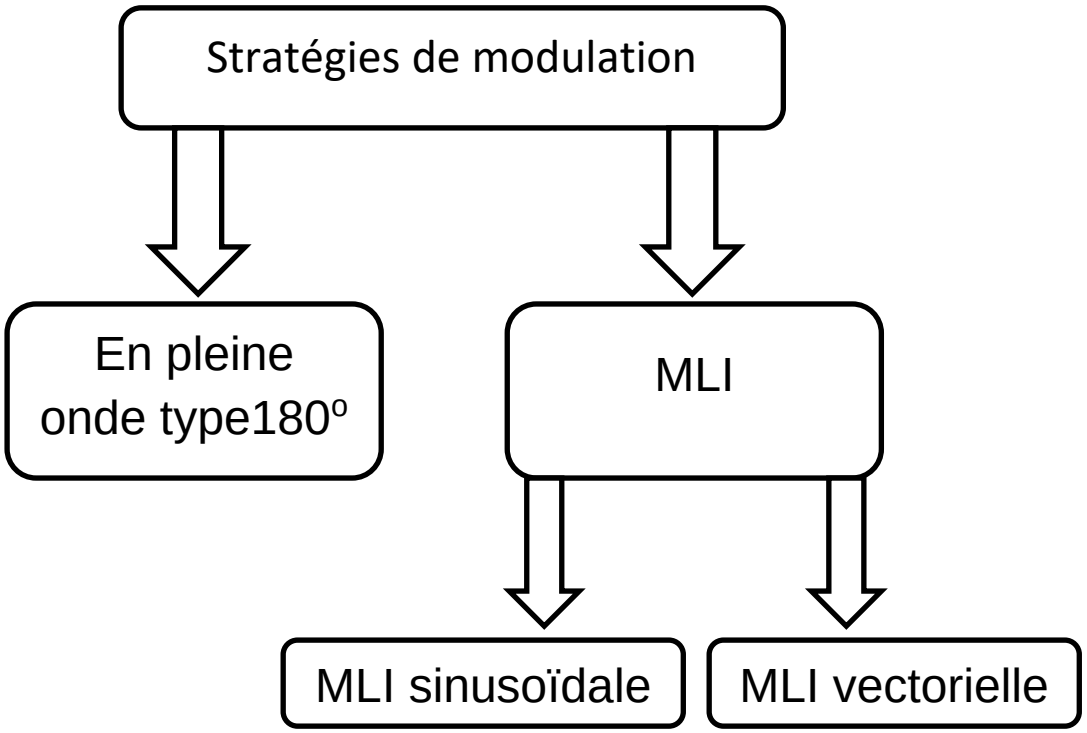


Figure.III.5 Différentes techniques de commande MLI

III.5.1. Principe de la modulation de largeur d'impulsion :

La conversion continue alternative est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur qui vont ainsi effectuer des connexions temporaires entre les bornes de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative. Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque

interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs (MLI), cette technique est basée sur la comparaison d'un signal de référence appelé aussi modulatrice d'amplitude Ar et de fréquence Fr, avec un signal appelé porteuse d'amplitude Ap et de fréquence Fp très élevée. (Figure III.6)

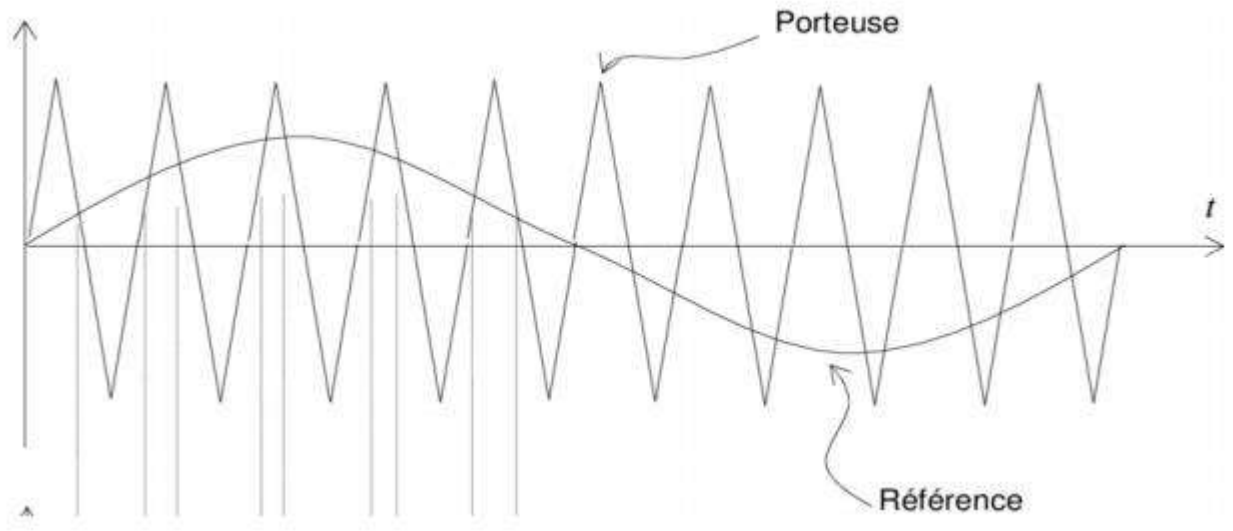


Figure.III.6 Principe de la modulation

III .5.2. Commande en pleine onde de type 180 º :

La tension générée par la stratégie de la commande pleine onde à une forme rectangulaire, Sa décomposition en série de Fourier a montré que cette forme d'onde est riche en harmoniques. Ce type de commande convient pour les onduleurs à deux niveaux.

III .5.3. Modulation sinusoïdale (ou sinus-triangle)

La modulation sinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire. Cette technique exige une commande séparée pour chacune des phases de l'onduleur [35]. La figure ci-dessous illustre le principe de base de cette technique.

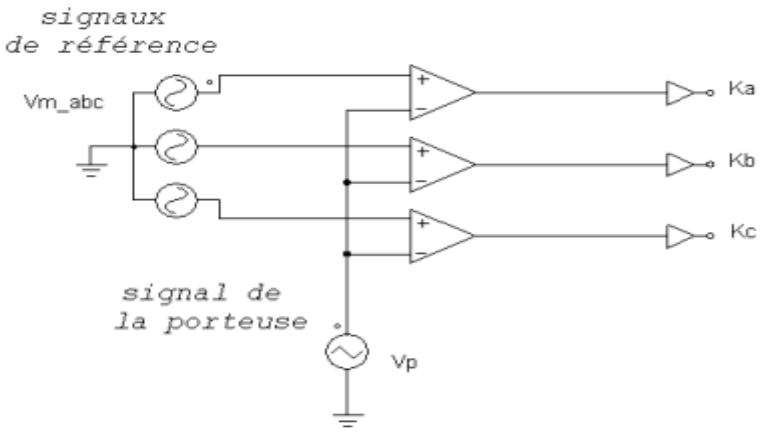


Figure.III.7 Schéma de principe de la technique sinus-triangle

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, les caractéristiques sont :

• L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_m de la référence : $m = f_p / f_m$

• Le cœfficient de réglage r égal au rapport de l'amplitude $A_m$de la référence à l'amplitude crête A_p de la porteuse : $r = A_m/A_p$

• Le facteur d'évaluation des performances de la MLI qui est le distorsion facteur de total des harmoniques de la tension de sortie (THD), défini par le rapport de la valeur efficace des harmoniques de tension à la valeur efficace du fondamental de cette tension :

$$THD = \frac{V_h}{V_1} = \frac{\sqrt{V^2 rms - V_1^2}}{V_1} \qquad \textbf{(III.1)}$$

Dans cette section, on analyse la stratégie de commande à modulation sinusoïdale, il s'agit de déterminer, pour un onduleur triphasé à cinq niveaux de type NPC, les signaux de commande des interrupteurs.

a) Modulation sinusoïdale naturelle :

Comme pour les onduleurs à deux niveaux, les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur NPC sont obtenus à partir des intersections des trois signaux de référence sinusoïdaux déphasés entre eux de 120° , de fréquence f_m et d'amplitude A_m , avec un signal triangulaire d'amplitude A_p et de fréquence f_p , très supérieure à(Figure(III.8.a)).La figure (III.8) montre le principe de la technique MLI sinusoïdale naturelle utilisée pour un onduleur deux niveaux [36]

Les formes d'ondes des tensions de sortie par rapport au point milieu (O) de la source continue V_{ao} , V_{bo} et V_{co}sont représentées par les figures (III.8.b, III.8.c et I III.8. d) respectivement.

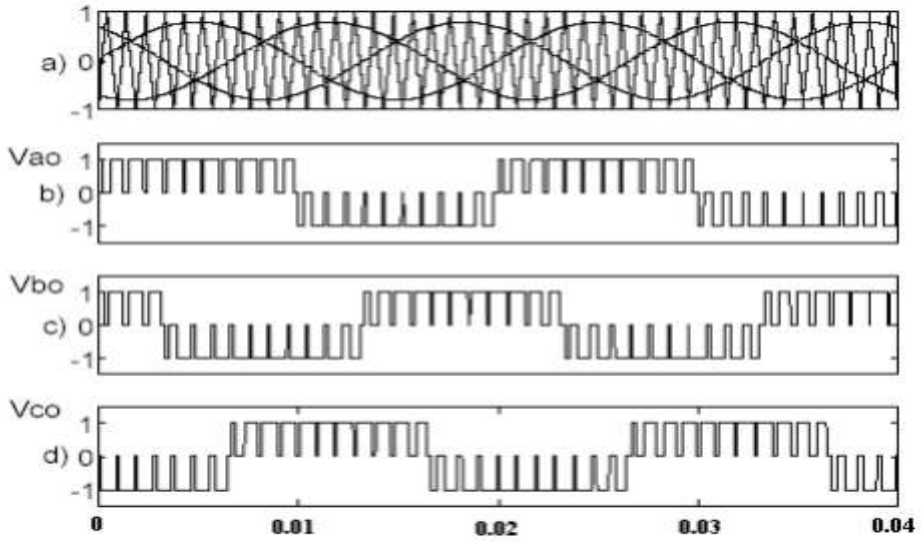


Figure.III.8 Principe de la modulation MLI sinusoïdale classique

b) Modulation sinusoïdale à double triangles :

Cette stratégie est basée au principe sur la modulation sinusoïdale naturelle. Pour l'onduleur deux niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires symétriques de même fréquence f_p et de même amplitude A_p .Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitudeA_m et de fréquence f_m . C'est la modulation sinusoïdale à double triangle.

Pour les onduleurs avec un nombre de niveaux n supérieur à trois, la technique sinusoïdale naturelle avec son signal triangulaire unique, ne permet pas la génération de tous les signaux de commande requis. Alors, Cette technique nécessite $(n-1)$ signaux triangulaires de même fréquence f_p et de même amplitude A_p .

La figure (III.9) représente le principe de la modulation sinusoïdale à double triangle. Deux porteuses sont utilisées, avec trois signaux de référence, pour générer la commande de chaque phase comme il est illustré sur la figure (III.9.a). Les figures (III.9.b, III.9.c) et (III.9.d) montrent les formes d'ondes des tensions V_{ao} , V_{bo} et V_{co} rapportées au point milieu de la source continue à l'entrée de l'onduleur [37].

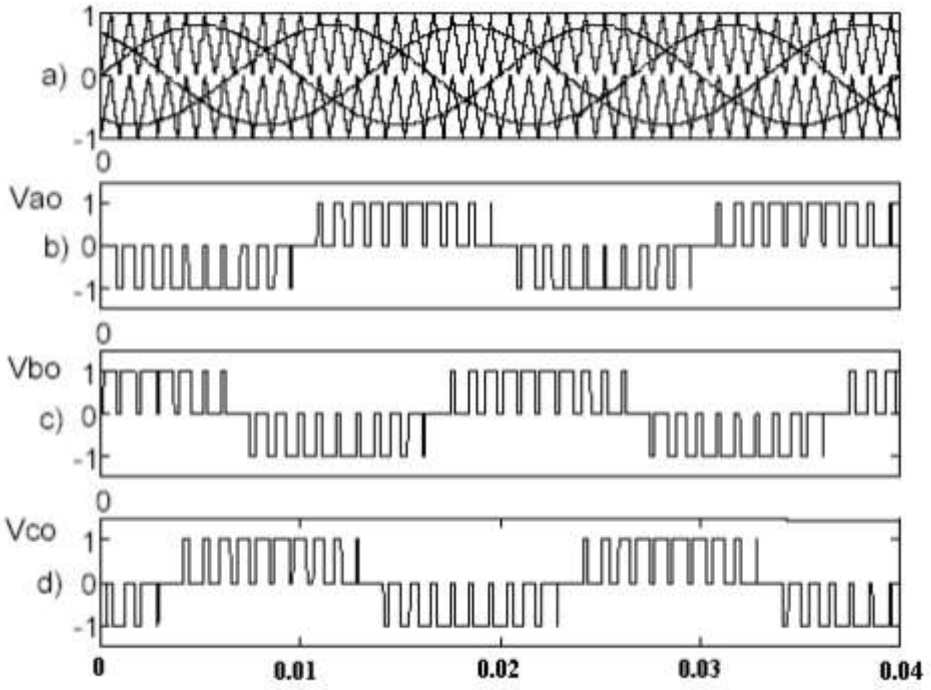


Figure.III.9 Principe de la MLI à doubles triangles

- Signaux de référence

Ce sont des signaux sinusoïdaux déphasés entre eux de 120° et sont caractériser par l'amplitude Ar et sa fréquence f

$$V_{ref\ a} = Ar\sin(2\pi.f.t)$$

$$V_{ref\ b} = Ar\sin(2\pi.f.t - \frac{2\pi}{3}) \qquad \textbf{(III.2)}$$

$$V_{ref\ c} = Ar\sin(2\pi.f.t - \frac{4\pi}{3})$$

-la porteuse

La porteuse triangulaire caractérisée par l'amplitude Ap et la fréquence fp est calculée par :

$$Vp(t) = \begin{cases} Vp(4.fp.t - 1) & si \quad 0 \le t \le \frac{Tp}{2} \\ Vp(-4fp.t + 3) & si \quad \frac{Tp}{2} \le t \le Tp \end{cases} \qquad \textbf{(III.3)}$$

Avec: $fp = \frac{1}{Tp}$

Les intersections entre les tensions de références et la porteuse donnent les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs.

III .5.4. La Modulation vectorielle :

III 5.4.1 Principe de la MLI Vectorielle :

Le principe de la modélisation vectorielle (SVM) consiste à reconstruire le vecteur tension à partir de huit vecteurs de tensions, chacun correspond à une combinaison des états des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasé.

La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des beaucoup des charges (par exemple moteur asynchrones…etc.)

Contrairement à d'autres méthodes, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur.

Cette technique de MLI suit les principes suivants [38].

- Un vecteur tension de contrôle $\overrightarrow{Vref}$ est calculé globalement est approximé sur une période de modulation « T_m» par un vecteur tension moyen. -

Pour chaque phase réalisation d'une impulsion de largeur T centrée sur la période dont la valeur moyenne est égale à la tension de référence à l'instant d'échantillonnage . -

Tous les interrupteurs d'un même demi-pont ont un état identique au centre et aux deux extrémités de la période.

III.5.4.2 La transformation de Clarke :

Pour simplifier les calculs dans la modulation vectorielle nous utilisons la transformation de Clarke [39], cette dernière nous permet de remplacer le système triphasé de trois tensions U'_a,U'_b , U'_c de somme nulle par un système diphasé respectant le transfert de puissance.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U'_a \\ U'_b \\ U'_c \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.4)}$$

La modulation vectorielle traite donc, les signaux triphasés comme un tout. L'onduleur triphasé à trois niveaux de tension ayant trois bras et trois configurations, possède modes de commutations possibles. Il peut donc générer 27 vecteurs différents de la tension de sortie [40].

La représentation sur le plan (α, β) de ces 27 vecteurs est donnée par la figure (III.10) :

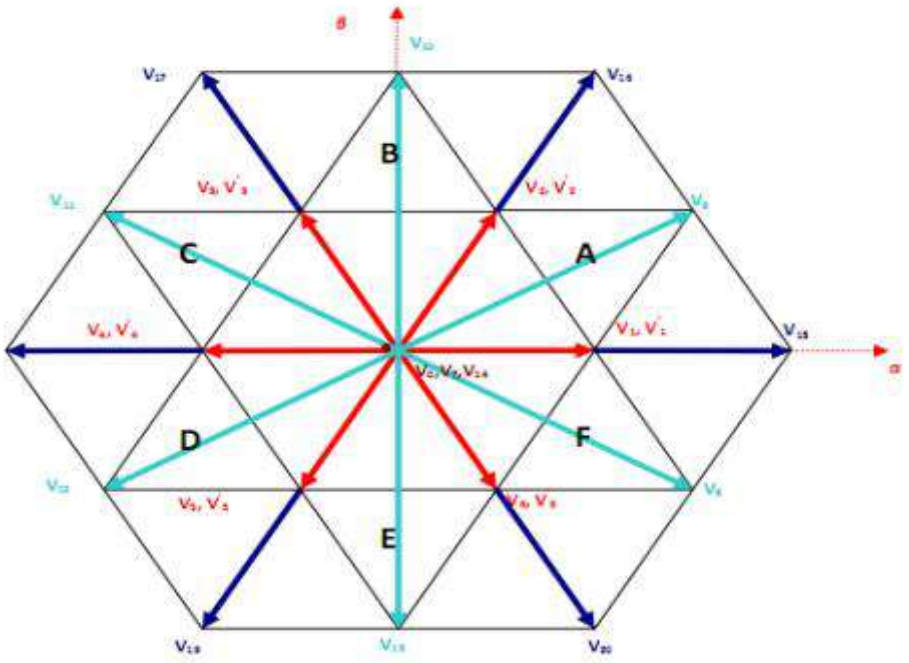


Figure.III.10 Représentation dans le plan (α, β) des vecteurs de tension de l'onduleur à trois niveaux de tension

III.6 Onduleur à cinq niveaux de type NPC :

III.6.1 Structure de l'onduleur à cinq niveaux :

L'onduleur triphasé à cinq niveaux étudié est constitué de trois bras et quatre sources de tension continue. Chaque bras comporte huit interrupteurs, plus deux diodes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montés en tète bèche. La figure (III.11) donne une représentation schématique d'un bras de cet onduleur, [41].

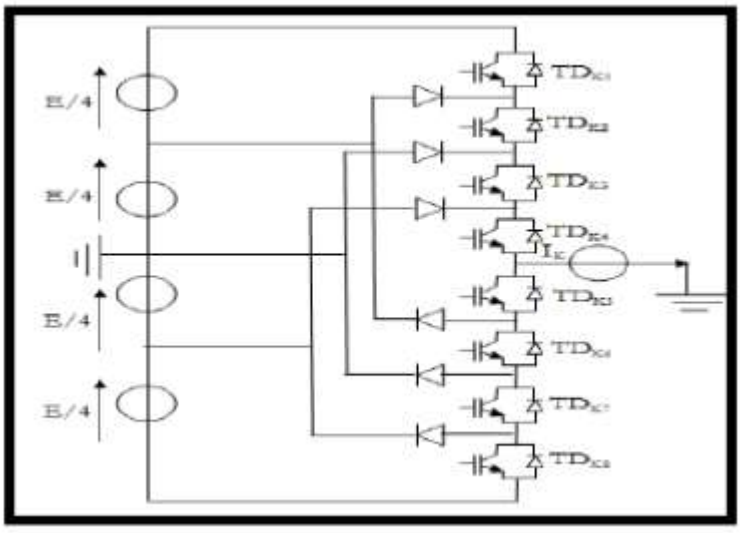


Figure.III.11 Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux

III.6.2 Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux :

Une analyse topologique d'un bras montre cinq configurations possibles, pour définir les séquences de fonctionnements de cet onduleur, définissant d'abord les différents états que peut prendre la tension simple (la tension entre le bras de l'onduleur et le point milieu fictif), par exemple. La tension simple Vao est définie par l'état de huit quadruplet qui peuvent être transistor, un GTO ou bien un IGBT ou autre avec une diode en antiparallèle. Les états possibles d'un seul bras d'interrupteurs est de 2^5 =32 états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et 1. Seules les cinq états suivantes sont possibles, [41].

- **Première configuration {11110000} :**

Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont passants et Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8 sont bloqués figure (III.12), la valeur de tension simple Vao est donnée par l'équation suivante :

$$Vao = +E/2 \quad \textbf{(III.5)}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$Vka5 = Vka6 = Vka7 = Vka8 = +E/4 \quad \textbf{(III.6)}$$

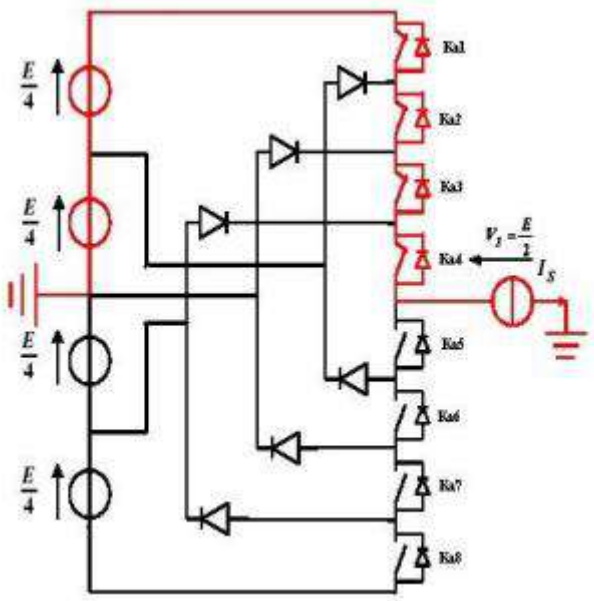


Figure.III.12 1ère configuration du 1er bras

- **Deuxième configuration {01111000} :**

Ka2, Ka3, Ka4 et Ka5 sont passants et Ka6, Ka7, Ka8 et Ka1 sont bloqués figure (III.13), la valeur de tension simple Vao est donnée par l'équation suivante :

$$Vao = +E/4 \quad \textbf{(III.7)}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$Vka1 = Vka6 = Vka7 = Vka8 = +E/4 \quad \textbf{(III.8)}$$

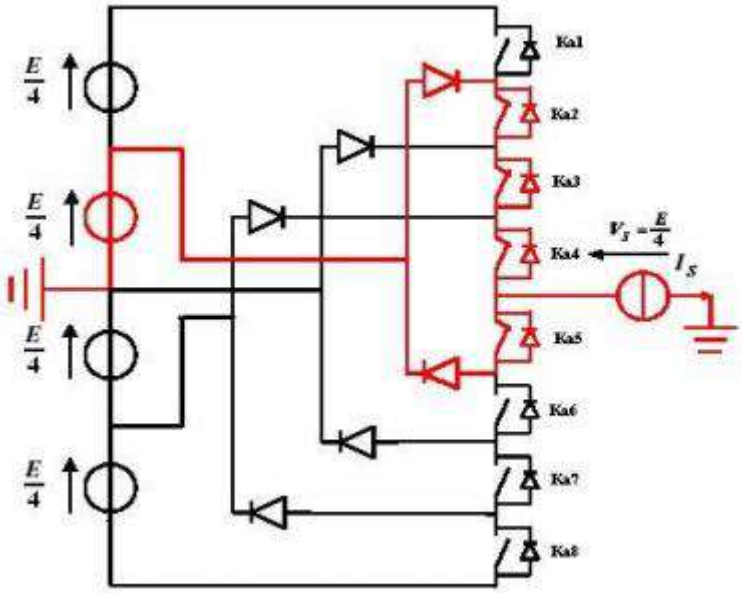


Figure.III.13 2ème configuration du 1er bras

- **Troisième configuration {00111100} :**

Ka3, Ka4, Ka5 et Ka6 sont passants et Ka7, Ka8, Ka1 et Ka2 sont bloqués figure (III.14), la valeur de tension simple Vao est donnée par l'équation suivante :

$$Vao=0 \quad \textbf{(III.9)}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$Vka1 = Vka2 = Vka7 = Vka8 = +E/4 \quad \textbf{(III.10)}$$

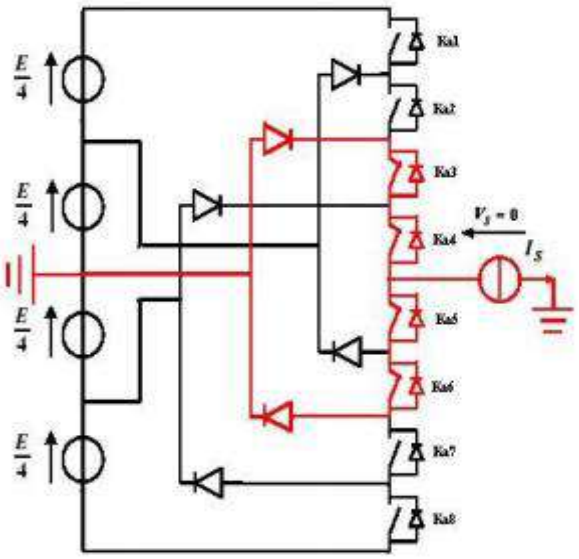


Figure.III.14 3ème configuration du 1er bras

- **Quatrième configuration {00011110} :**

Ka4, Ka5, Ka6 et Ka7 sont passants et Ka8, Ka1, Ka2 et Ka3 sont bloqués figure (III.15), la valeur de tension simple Vao est donnée par l'équation suivante :

$$Vao = -E/4 \quad \textbf{(III.11)}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$Vka1 = Vka2 = Vka3 = Vka8 = +E/4 \quad \textbf{(III.12)}$$

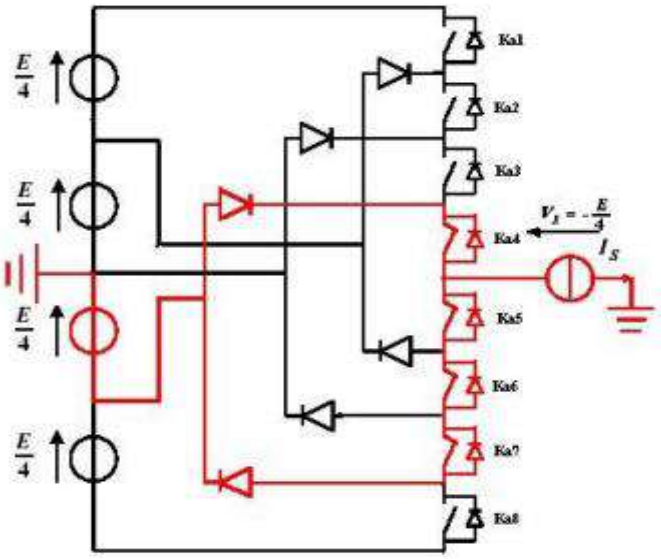


Figure.III.15 4ème configuration du 1er bras

- **Cinquième configuration {00001111} :**

Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8 sont passants et Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont bloqués figure (III.16), la valeur de tension simple Vao est donnée par l'équation suivante :

$$Vao = -E/2 \quad \textbf{(III.13)}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$Vka1 = Vka2 = Vka3 = Vka4 = +E/4 \quad \textbf{(III.14)}$$

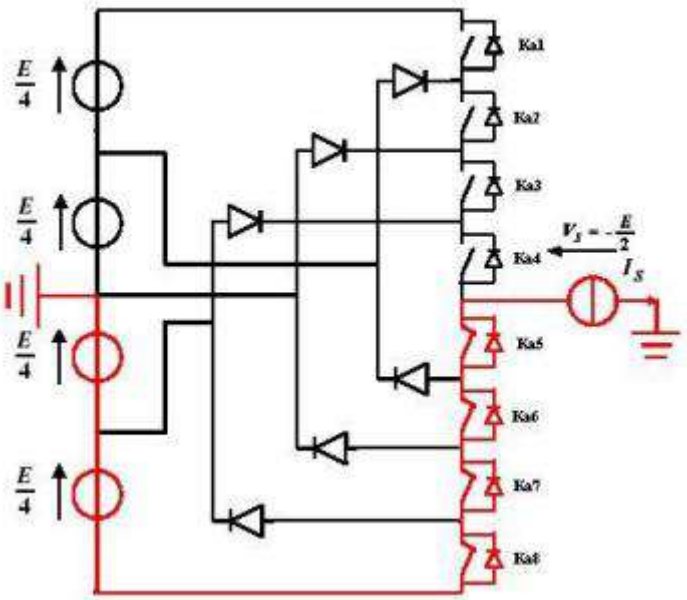


Figure.III.16 5ème configuration du 1er bras

Etat des interrupteurs								Tension de sortie Vao
Ka1	Ka2	Ka3	Ka4	Ka5	Ka6	Ka7	Ka8	
1	1	1	1	0	0	0	0	E/2
0	1	1	1	1	0	0	0	E/4
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	-E/4
0	0	0	0	1	1	1	1	-E/2

Tableau.III.1 Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux

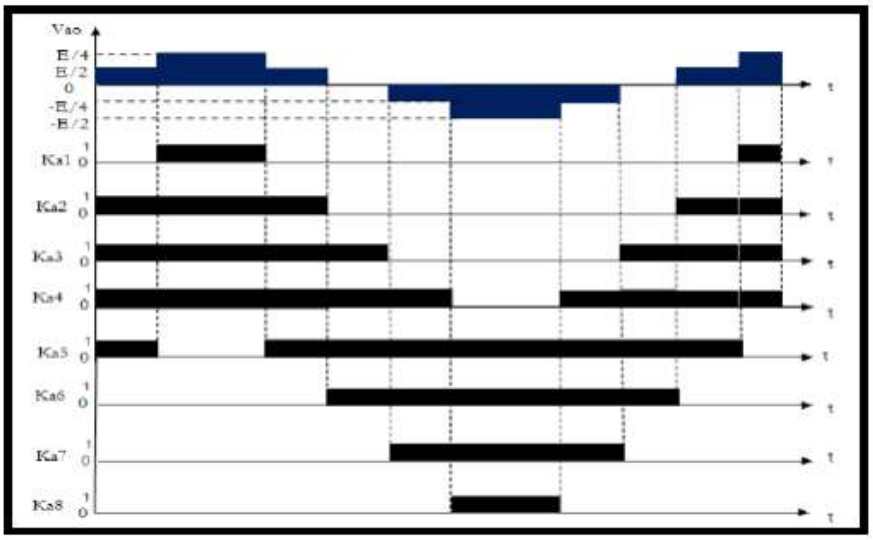


Figure.III.17 les signaux de commande de chaque interrupteur Et la forme d'onde de la tension de sortie Vao

Partie B : Simulation d'onduleur cinq niveaux de type NPC à z source

III.7. Principe de la commande d'élévation simple (Simple Boost Control SBC) :

Cette stratégie est caractérisée principalement par sa simplicité et elle s'articule sur le transfert partiel de l'état zéro vers l'état du court-circuit. Elle est basée sur la commande MLI sinusoïdale traditionnelle avec l'ajout de deux lignes droites comme signaux de référence supplémentaires, l'une est positive et l'autre est négative, passant respectivement par les valeurs maximale et minimale du signal sinusoïdal de référence pour produire la durée de l'état du court-circuit [42] [43][44][45]

L'insertion de cet état est générée lorsque la porteuse est supérieure ou inférieure respectivement aux deux lignes droites positive et négative. La Figure II.2 représente les signaux de commande de cette stratégie.

III.8. la simulation :

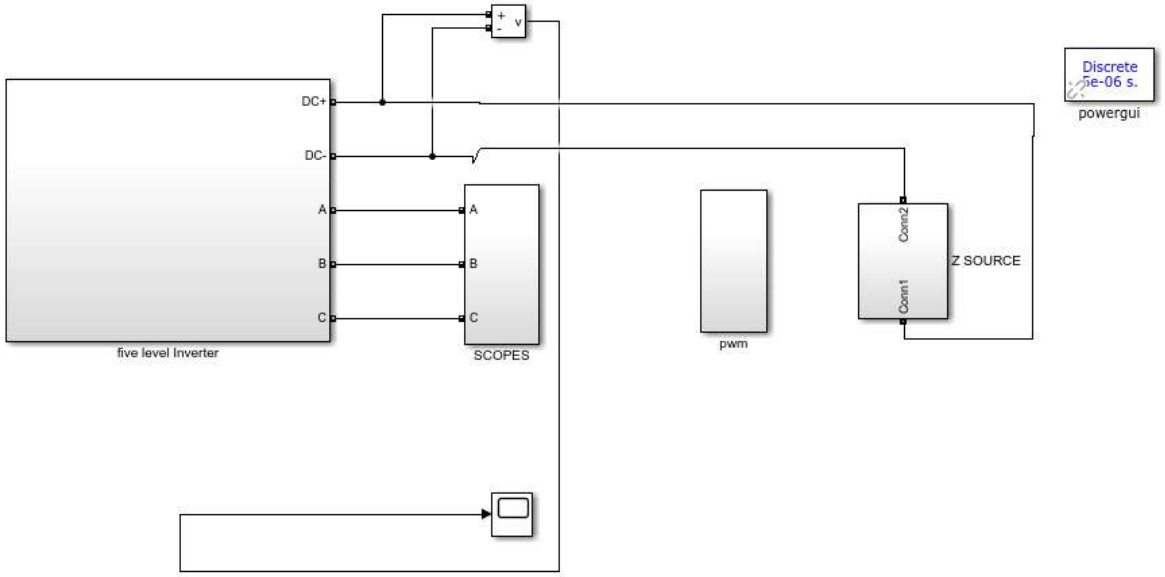


Figure.III.18 le schéma blocs d'un onduleur cinq niveaux de type NPC à z source

III.8.1.Les résultats de simulation :

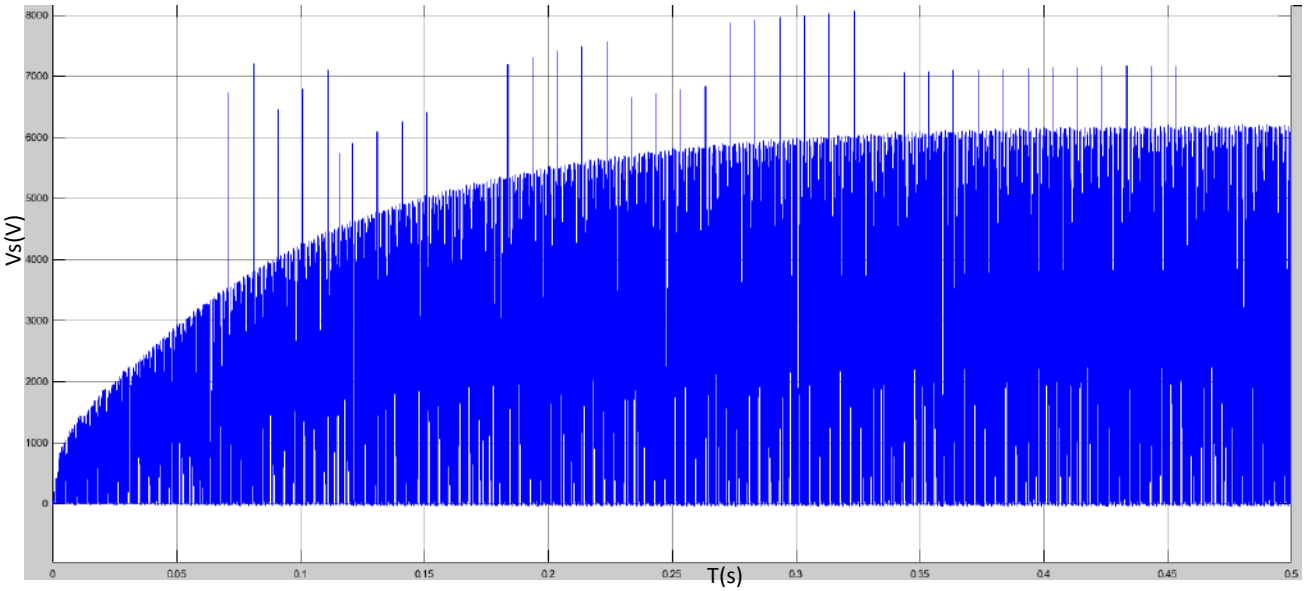


Figure.III.19 la tension de sortie de z source

On varie m et on fixe le r (r=0.85) :

m=6

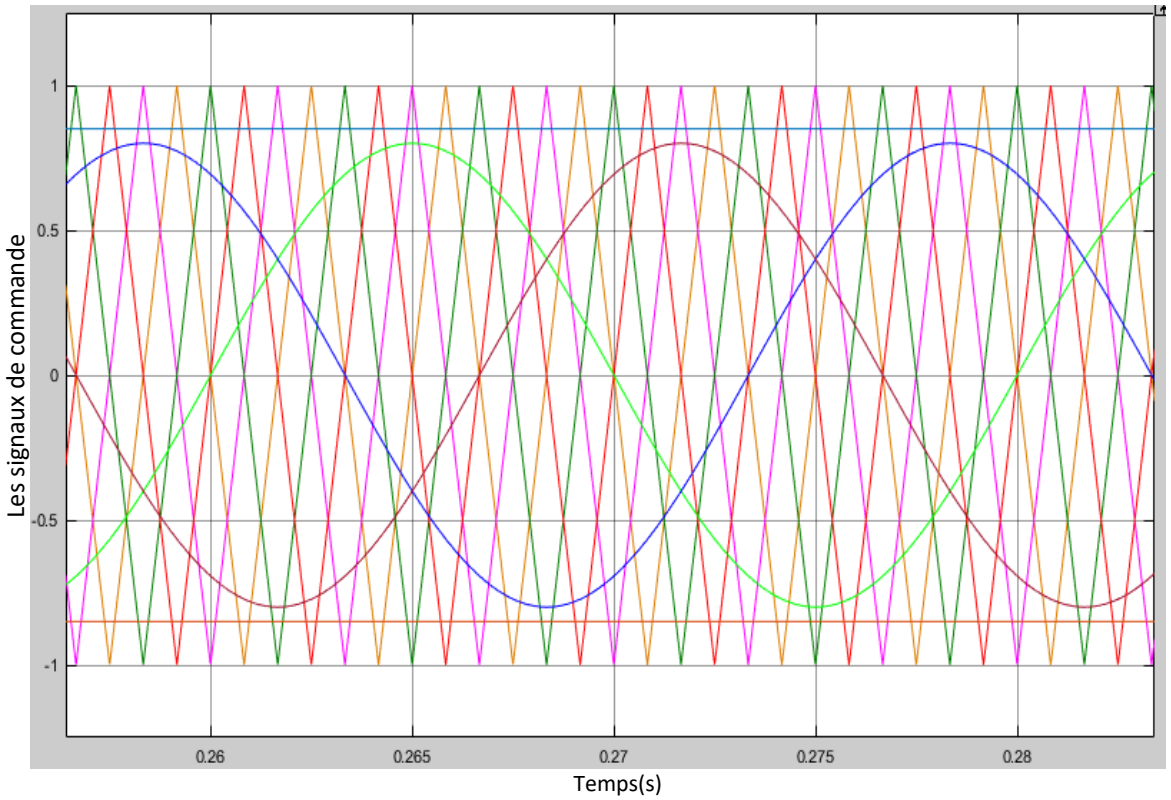


Figure.III.20 Tensions de références et porteuses pour m=6

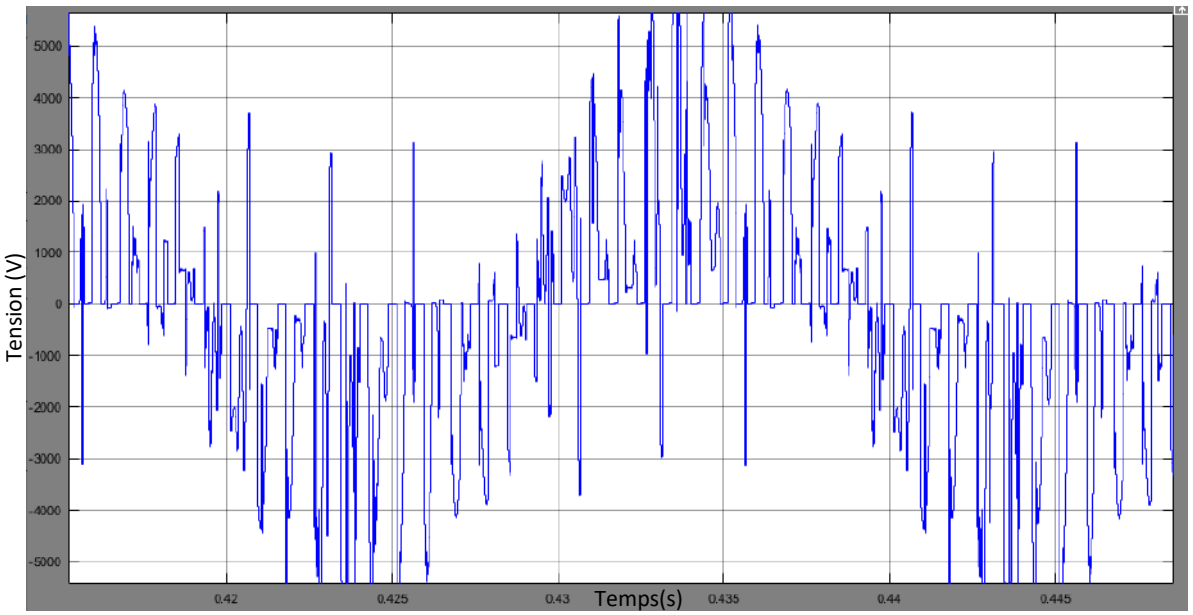


Figure.III.21 Tension simple de la phase 1 pour m=6

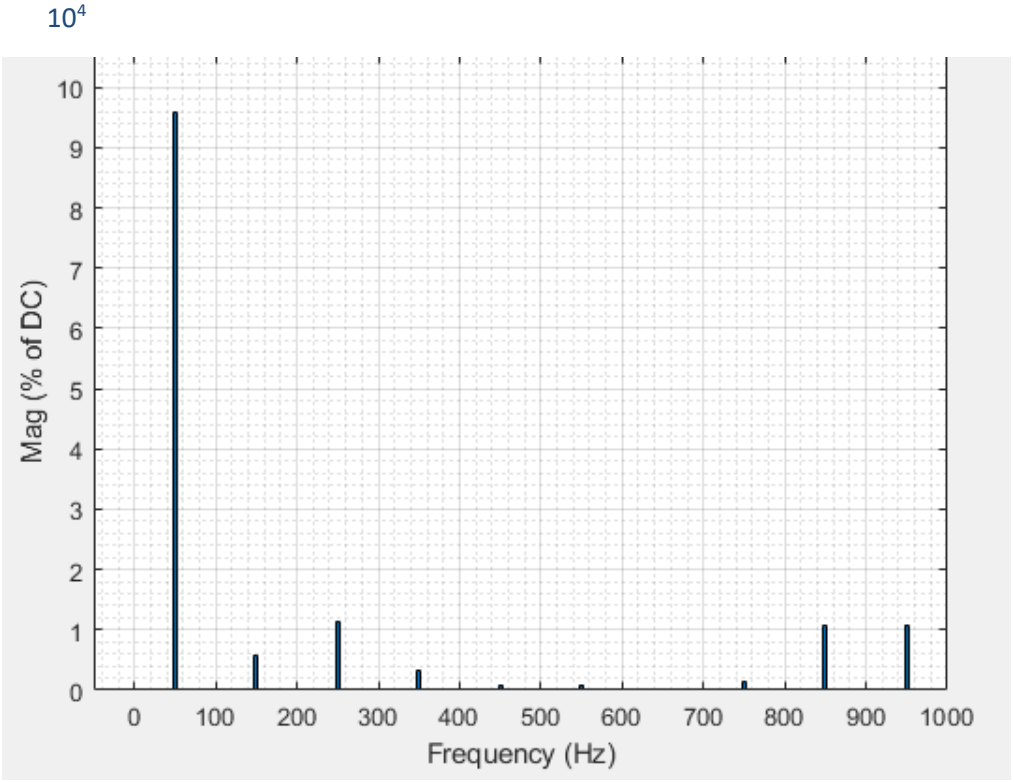


Figure.III.22 l'analyse harmonique par FFT pour m=6

m=15

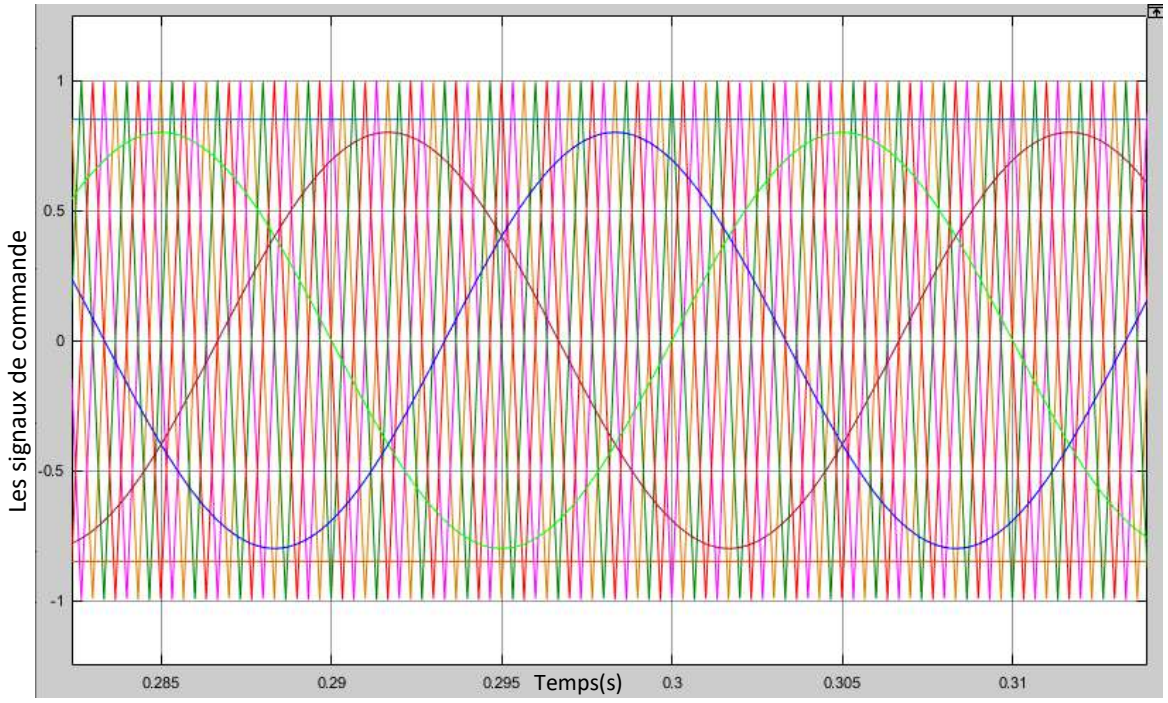


Figure.III.23 Tensions de références et porteuses pour m=15

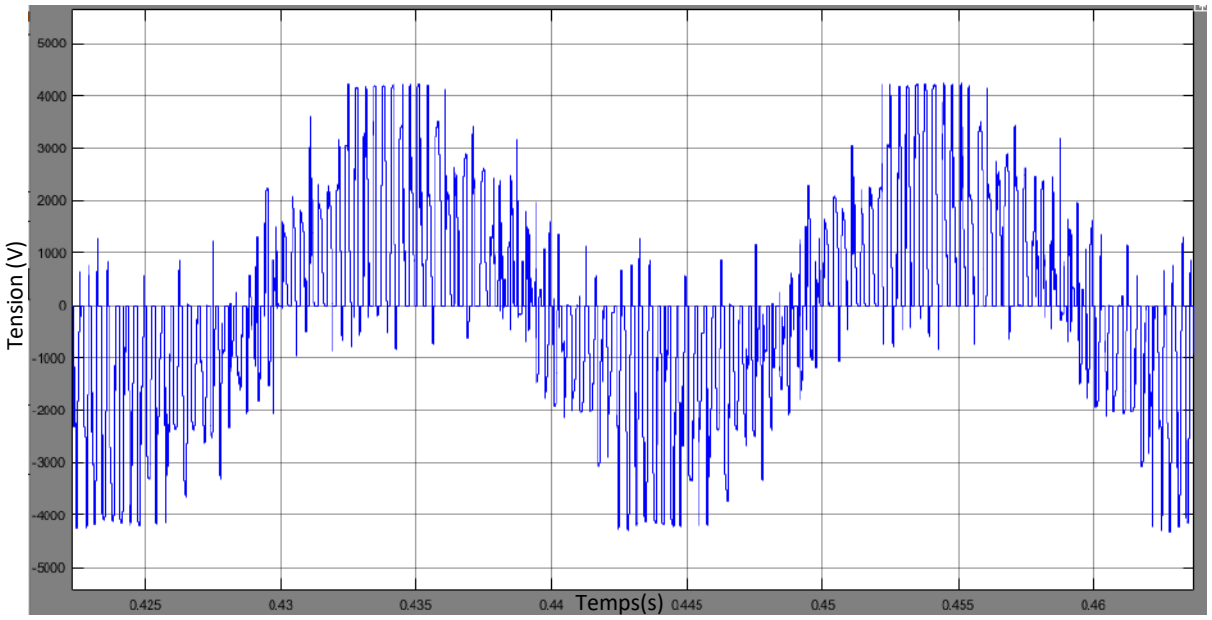


Figure.III.24 Tension simple de la phase 1 pour m=15

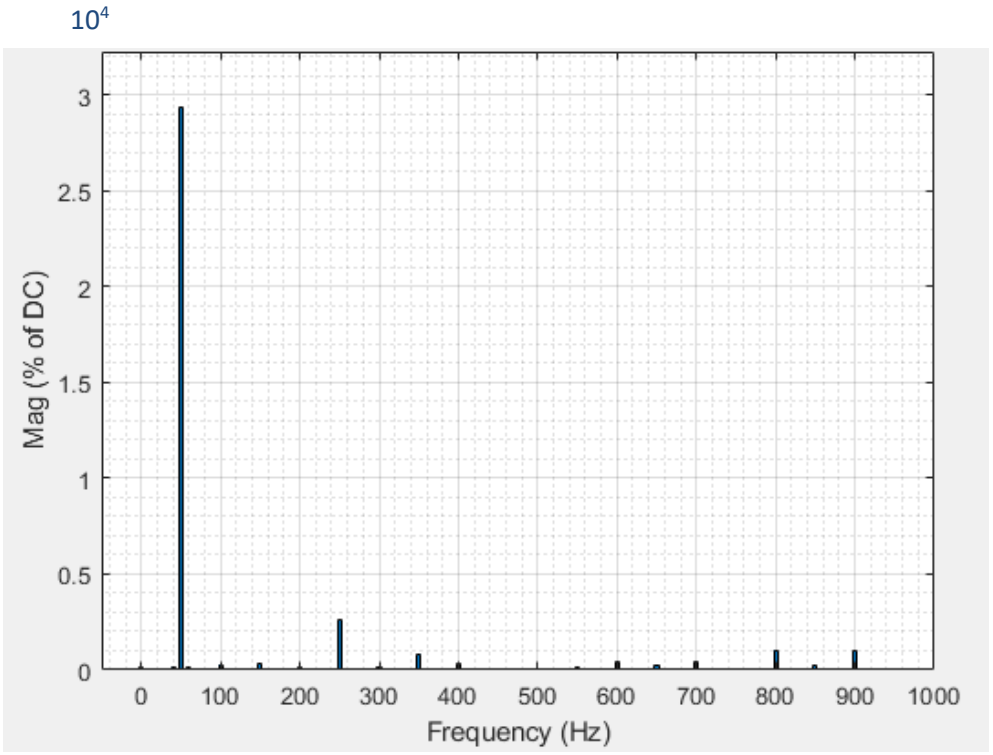


Figure.III.25 l'analyse harmonique par FFT pour m=15

On fixe m=6 et on varie le r

Dans les figures (III.19 ;III.20 ;III.21) nous avons fixé le m=6 et r=0.85 la tension de références et porteuses reste la même que r =0.95

r =0.95

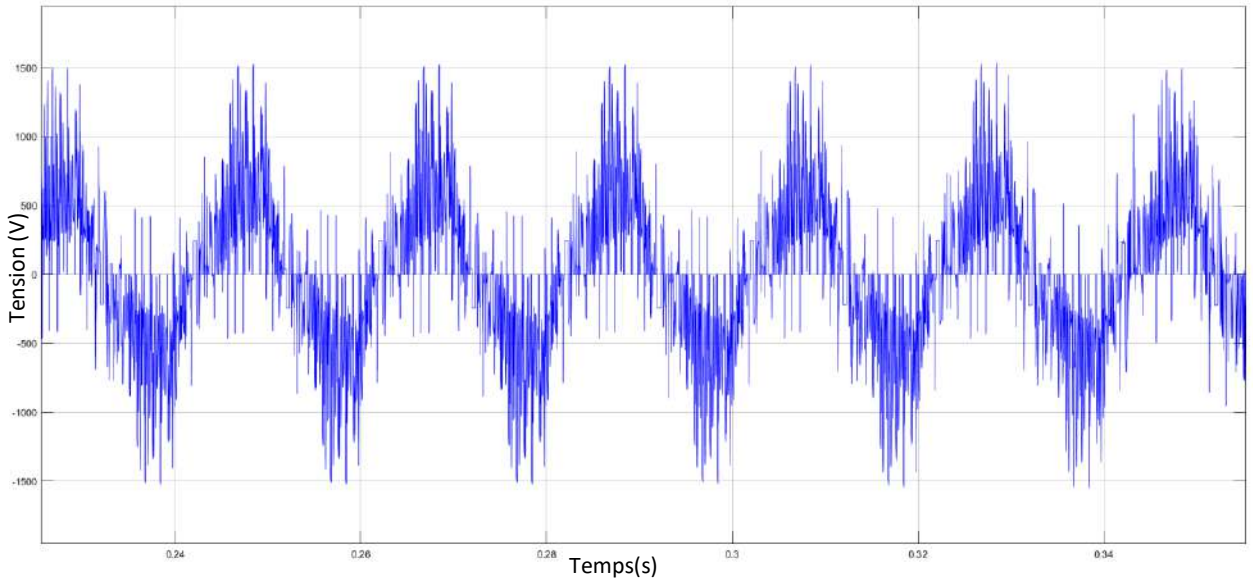


Figure.III.26 Tension simple de la phase 1 pour r =0.95

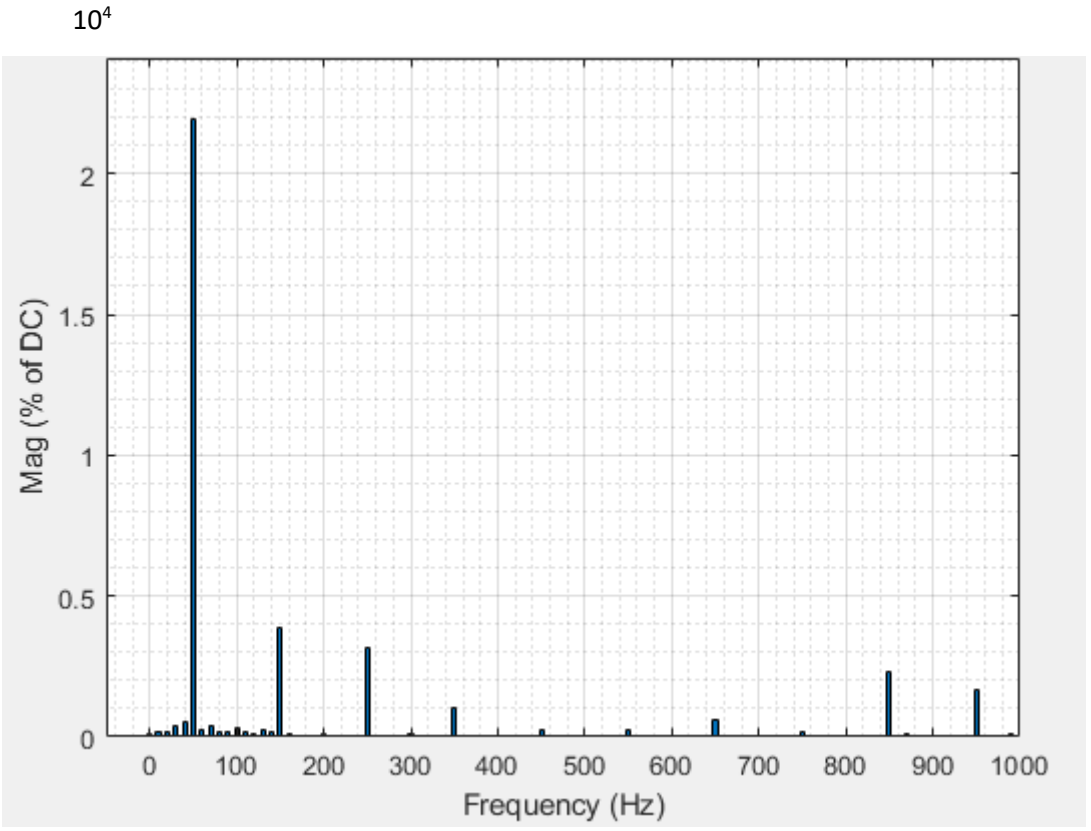


Figure.III.27 l'analyse harmonique par FFT pour r=0.95

III.8.2.Interprétation des résultats :

- Quel que soit m pair ou impair, la tension V1 ne présente que des harmoniques impaires
- L'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement filtrées alors le taux d'harmonique de distorsion diminue
- Nous observons aussi que le z source fait son rôle très bien il élève la tension de 200 v jusqu'à 1000v et 6000v selon les configurations et la variation de m et r.
- Quand nous varions 0.8 vers 1 l'amplitude de tension diminue.

III.9.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types des onduleurs multi-niveaux et Les différentes stratégies de commande de l'onduleur sont la MLI sinusoïdale et la MLI vectorielle

Dans ce chapitre on a exploité la commande MLI de l'onduleur cinq niveaux avec la technique SBC et les signaux triangulaires.

La commande de l'onduleur multiniveaux influence sur les résultats de z source

L'objectif de la commande MLI réside dans le décalage des harmoniques vers les fréquences les plus élevées ce qui facilite le filtrage. L'utilisation de l'onduleur multi-niveaux présente deux avantages :

- La montée en puissance.

- L'amélioration de la qualité de la tension délivrée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du développement des nouveaux convertisseurs, dans le but d'améliorer la fiabilité et le rendement des systèmes de production des énergies électriques à source renouvelable. Nous avons vu que l'onduleur multi-niveaux avec Z source permet de répondre aux exigences de l'interconnexion tout en assurant un fonctionnement optimal d'un centrale PV

En première partie, nous avons étudié le principe des systèmes photovoltaïques où nous avons présenté le modèle des différents éléments qui le constituent (module, générateur, …..) ainsi que nous avons détaillé la technique de maximisation de puissance P & O.

Dans la deuxième partie, nous avons analysé le fonctionnement de l'onduleur z source en établissant les équations de sortie de convertisseur, ce dernier permet d'avoir en sortie des tensions amplifiées de forme alternative contrairement aux onduleurs conventionnelles.

Les onduleurs multi niveaux se sont l'objectif de la troisième partie où nous avons représenté les différentes topologies de ces onduleurs et nous avons appliqué les deux techniques de commande de MLI (MLI sinusoïdal et MLI vectorielle), et nous avons exposé la simulation sous Matlab/Simulink de l'ensemble « générateur PV avec une commande MPPT et l'onduleur multi-niveaux avec z source». L'étude spectrale a montré que malgré la fréquence de commutation est très basse, notre onduleur peut engendrer des ondes de tension acceptable.

De ce fait, quelques conclusions ont été déduites:

- Les sources PV sont des sources non linéaires et très sensibles aux conditions métrologiques (Eclairement et Température), ceci nécessite un étage d'adaptation.
- L'onduleur multi-niveaux permet de répondre aux exigences d'interconnexion du réseau électrique il suffit une fréquence de découpage très basse par rapport aux onduleurs classiques donc on peut réduire les pertes par commutation engendrées au niveau des interrupteurs de puissances
- L'onduleur à Z source élimine l'étage de conversion Buck-boost et réduit sa commutation et utilise que des éléments passifs.
- L'onduleur à Z source utilise fonctionne en buck et on boost en utilisant le court circuit des bras de l'onduleur.

Notre travail non exhaustif offre quelques perspectives qui sont :

- Intégration de l'onduleur z-source dans des systèmes comme éolienne ou un système hybride ainsi avec d'autre stratégie de commande.
- Appliquer les différentes méthodes de contrôle de z-source.
- L'inspection des nouvelles topologies d'onduleur multi niveaux par l'utilisation des techniques MLI avancées
- Améliorer le rendement de convertisseur z-source par la technique MPPT dans les systèmes photovoltaïques.

Bibliographie

[1] **M.N.Mchalikh et CH.Hmada** ‘Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ’ Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.

[2] **Mr. ADIL** « Création d’une entreprise d’installation des panneaux solaires» mémoire fin d’études master Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen. 2014.

[3] **M. Hatti**, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d’un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.

[4] **F .Chekider**, «étude et implémentation d’une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire magister en électronique, université de Jijel, 2008.

[5] **D.Morales**, «Maximum Power Point TrackingAlgorithms for Photovoltaic Applications», mémoire master en électronique, Technologie, Université de Aalto Finlande, 2010.

[6] **F. Chekired**, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[7] **Anne LABOURET, Michel VILLOZ**, “Energie solaire photovoltaïque”, 2éme édition, Edition Dunod, le Moniteur, juin 2006.

[8] **S. M. Ait-Cheikh**, «Etude, Investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d’état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[9] **K. Helali** ‘’Modélisation d’une cellule photovoltaïque Etude comparative ‘’ Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi –Ouzo 2012.

[10] **M.L.Louazane** ‘’Etude technico-économique d’un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla ‘’Mémoire de Magister Université El Hadj LakhdarBatna 2008.

[11] **CH. Maher** ‘’Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque’’ Mémoire Master Université Sfax 2008.

[12] **K.Sobaihi** ‘’ étude et réalisation d’un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction ‘’ Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.2003.

[13] **M. Belhadj** ’’Modélisation d’un système de captage photovoltaïque autonome ’’ Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.

[14] **Djamel BELLALA**, “Contribution à l’Optimisation des Systèmes de Conversion d’Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques”, Thèse de doctorat, Université de Batna, 2009.

[15] **Alain Bilbao** « learreta réalisation de commandes mppt numériques » diplôme ingénieur technique industriel, septembre 2006

[16] **M. Moulay-Amar et M. Loghouini**, «Etude et réalisation d’un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d’ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005

[17] **N. Abouchabana**, *« Etude d’une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT »*, Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[18] **N. Goléa**, cour, 2009

[19] **O.Guenounou et H.Lehouche** «Etude et simulation des techniques MPPT d’un système photovoltaique» Mémoire d’ingéniorat, université de bejaia, Algerie, 2019

[20] **Aamarouayache Mohamed**, « contribution à l’optimisation d’une chaine de conversion d’énergie photovoltaïque », doctorat en sciences en electrotechnique option ,2014

[21] **F.Ferrah** «Etude et simulation d’un étage MPPT pour un système à énergie renouvelable », Mémoire d’ingéniorat, Université Larbi Ben M’hidi, OUM EL BOUAGHI, Algerie,2013

[22] **Dalia Al Maamoury, Muhamad Bin Mansor, Ali Assim Al Obaidi** ‘‘active power control for a single-phase grid connected pv system ” , international journal of scientific & technology research vol 2, issue 3, 2013.

[23] **F.Benzeineb** «étude et commande d'un onduleur Z-source : application aux systèmes photovoltaïques » mémoire de master, Université SAAD DAHLAB, Blida, Algeria , 2016

[24] **Saeed, N, Ibrar, A. and Saeed, A**. (2017) A Review on Industrial Applications of Z-Source Inverter. Journal of Power and Energy Engineering, 5, 14-31. https://doi.org/10.4236/jpee.2017.59002

[25] **PENG F.Z**., Z-source inverter, Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume 39, Issue 2, March-April 2003 Page(s):504 – 510

[26] **SHEN M., WANG J., JOSEPH A., PENG F.Z**., Maximum constant boost control of the Z-source inverter, Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE, Volume1, 3-7 Oct. 2004

[27] **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

[28] **Martin Aimé**, « Évaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques Application aux nouvelles structures multicellulaires», Thèse de Doctorat, Université Toulouse, spécialité Génie Electrique, 2003.

[29] **Luc André Grégoire**, «Convertisseur à cellule empilée faible à taux de distorsion harmonique: conception et mise en œuvre », Mémoire présenté à l'école de technologie supérieure comme exigence partielle à l'obtention de la Maîtrise en Génie Electrique, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal, 2010.

[30] **Houria Ben Zemammouch** « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.2010.

[31] **MANSOURI Abdallah** «Commande des Onduleurs Multiniveaux», Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de MASTER,

UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAFM'SILA.2016.

[32] **FaÏÇal Mnif** « Etude et Réalisation des lois de commande par mode de Glissement et par approche Géométrique: Application à un Onduleur De Tension Monophasés », Thèse présente à l'université du Québec a Trois-Rivières Comme Exigence Pour l'obtention du Déplume de maitrise sciences appliquées en électronique industrielle, Université du Québec.1991.

[33] **Ammiche Abd ennour** «Commande des onduleurs multiniveaux de tension à diode flottante » mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en génie électrique. Université de m'sila 2012/2013

[34] **B. K. Bose**, "Power Electronics and AC Drives", Edition Practice Hall, 1986.

[35] **V.G.Agelidis, H. c. Goh**,« LowDistortion Variable Level PWM Technique», IEEE Proc-Electr. Power Appl, Vol. 145, N°2, pp. 73-78, March 1998.

[36] **A. Sarinar Toled**, « Commande Directe et Observation des convertisseurs de puissance: Application à l'Onduleur de tension Triphasé », These de Doctorat, Institut National Polytechnique de Gronoble, France, 2000.

[37] **Jean Bonal, Guy Séguier**, « Entraînements Electriques a Vitesse Variable», Technique et Documentation, Vol. 2, Décembre 1998.

[38] **BOUAKAZ OUAHID**, "Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone", Mémoire MAGISTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA, 2006.

[39] **Rakeshparekh** «V Fcontrol of3-Phase induction Motor Using Space Vector Modulation » Microchip technology Inc 2005.

[40] **Constern-Sünke Berendsen**, « Méthodes de Diagnostic dans la Partie Commande des Associations Convertisseurs-Machines Tournantes », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1992.

[41] **BOUAKAZ OUAHID**, "Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux Fonctionnement Symétrique et asymétrique ", Mémoire d'ingénieur d'état, Département d'électrotechnique, université de Batna, 2005.

[42] **F.Z.PENG, M.SHEN, and Z.QIAN** "Maximum Boost Control of the Z-Source Inverter". IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 20, NO. 4, JULY 2005.

[43] **J.-P. FERRIEUX, F. FOREST** "Alimentations à découpage – Convertisseur à résonance ", édition Masson, p. 249-257, 1994.

[44] **M. OLSZEWSKI** "Z-Source Inverter for Fuel Cell Vehicles", U.S Department of Energy FreedomCAR and Vehicle Technologies, 2005.

[45] **M. RAZALI** "Simple boost switching technique for z-source inverter", Faculty of Electrical Engineering UniversityTechnologi Malaysia.