REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTER 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 Electrique

Spécialité : Automatique

Thème

Commande d'un onduleur Z source appliqué à un système photovoltaïque

---

Présenté par :

BERRABEH El horabi

TELDJOUNE Mohamed

Proposé et Dirigé par :

KADDOUR Benyoucef

Promotion Juin 2020

Dédicace

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire " berrabah el horabi et teldjoune mohamed "

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole

tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère

Que dieu les gardes et les protège.

A mes adorables

sœurs et frères A

mes amies.

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux

que j'aime.

Je dédie ce

travail.

RESUMES

Ce travail constitue une étude sur les systèmes photovoltaïques (PV) qu'ils sont raccordé au réseau électrique avec faire la modélisation et simulation et présenté les résultats. Nous avons effectué une étude générale du générateur photovoltaïque et de son fonctionnement à sa puissance maximale en utilisant un hacheur survolteur commandé par un algorithme MPPT de type P&O, le but étant d'améliorer le rendement en puissance du système PV. On va essayer de raccorder se system avec un réseau BT par un onduleur triphasé commandé par la MLI.

Mots clé: Photovoltaïques, Hacheur, MPPT, Onduleur, MLI

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail

Nous tenons à remercier a encadreur KADDOUR BENYOUCEF d'avoir posé un sujet très intéressent et pour leurs conseils.

Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté sur mon travail.

Qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude pour l'intérêt qu'il a accordé à notre travail.

je veux aussi remercier docteur Benyousef et mes amis et qui nous a aidé pour le bon déroulement de ce travail et tout personne qui nous aidé à atteindre ce point-là.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïque

I.1.Introduction ……..……2

I.2. Cellule photovoltaïque ……..…..2

I.3. Modélisation d'une cellule photovoltaïque ……..……...4

I.3.1. Modèle idéal ……..……4

I.3.2. Modèle réel à une diode ……6

I.3.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque ……...6

I.3.3.1. Courant de court-circuit (Icc) ……..……6

I.3.3.2. Tension de circuit-ouvert (Vco) ……..……7

I.3.3.3. Puissance de la cellule PV ……..……7

I.3.3.4. Puissance maximale d'une cellule PV ……7

I.4 Module photovoltaïque ……..……..8

I.4.1. Caractéristiques d'un module ……..……..9

I.4.2 Facteurs limitatifs du rendement ……..……..……9

I.4.2.1 Influence de l'éclairement ……9

I.4.2.2 Influence de la température ……...….10

I.4.2.3Influencedelarésistancesérie RS ……10

I.4.2.4 Influence de la résistance parallèle RP ……...……11

I.4.5 Panneau solaire ……..…11

I.5. Système photovoltaïque ……..……...…11

I.5.1. Définition ……...…11

I.5.2. Le rôle principal du convertisseur statique ……...12

I.5.3. Types d'un système solaire photovoltaïque ……..12

I.5.3.1. Système autonome ……..12

I.5.3.1.1. Système autonome sans batterie ……..……12

I.5.3.1.2. Système autonome avec batterie …….……..12

I.5.3.2. Système hybride …….…..13

I.5.3.3. Système raccordé au réseau électrique ……15

I.6. Étages d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et une charge ……15

I.6.1. Les convertisseurs électriques (DC-DC) ……15

I.6.1.1. Hacheur dévolteur (Buck) ……..…17

I.6.1.2. Hacheur survolteur (boost) ……18

I.6.1.3. Hacheur dévolteur-survolteur (buck-boost) ……...…20

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 ……..……29

I.7. Conclusion ……29

Chapitre 2 : Modélisation de convertisseur Z-source

II.1 Introduction ……..……31

II.2. Définition ……31

II.3 Principe de fonctionnement de l'onduleur z-source ……31

II.4 Etude de l'amplification maximal ……..…36

II.5 Dimensionnements de l'inductances et les condensateurs ……..……38

II.6 Simulation ……...…39

II.6.1 Les résultats de la simulation ……...…40

II.6.2 Interprétation des résultats ……..……44

II.7 Conclusion ……..……44

Chapitre 3 : Stratégies de la commande d'un onduleur Z-source

Partie A : Modélisation et commande de l'onduleur deux niveaux……..46

III.1 Introduction ……46

III.2 Convertisseur DC-AC ……46

III.3 Les méthodes de survoltage ……51

III.3.1 Simple Boost (MLI simple Boot Control SBC) ……..51

Partie B : Simulation de l'onduleur deux niveaux a z source

III.4 les simulations ……52

III.4.1 Les paramètres de simulations ……...52

III.4.2 Interprétation des résultats ……60

III. Conclusion ……60

CONCLUSION GENERALE ……62

LISTE DES FIGURES

Fig (I.1) Représentation schématique d'une cellule solaire ……...……2

Fig (I.2) Modèle simplifié d'une cellule PV ……..……3

Fig (I.3) Modèle réel à une diode d'une cellule PV ……..……4

Fig (I.5) Module photovoltaïque ……...……5

Fig (I.6) Câblage des cellules dans un module ……..……5

Fig (I.7) Evolution de la caractéristique (I V) et (P V) du module en fonction de L'éclairement ……..……8

Fig (I.8) Evolution de la caractéristique (I -V) (P -V) du module en fonction de la température fonctionnement à tension optimale constante ……8

Fig (I.9) Panneau photovoltaiqe ……9

Fig (I.10) schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage …….……11

Fig (I.11) Exemple d'un système PV hybride ……..……12

Fig (I.12) Exemple Système raccordé au réseau électrique ……13

Fig (I.13) système photovoltaïque avec un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT …..…14

Fig (I.14) Symbole d'un convertisseur DC-DC ……...……14

Fig (I.15) schéma d'un convertisseur dévolteur ……..…15

Fig (I.16) schéma simplifié de hacheur buck en deux phases ……..…15

Fig (I.17) schéma d'un convertisseur survolteur ……..……17

Fig (I.18) schéma simplifié de hacheur boost en deux phases……..……17

Fig (I.19) schéma d'un convertisseur dévolteur-survolteur ……18

Fig (I.20) schéma simplifié de hacheur buck-boost en deux phases ……..……19

Fig (I.21) Courbe caractéristique de puissance d'un GPV ……..……20

Fig (I.22) Recherche et recouvrement du point de puissance maximale ……22

Fig (I.23) Organigramme de la méthode PO ……...…23

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

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

Fig (I.26) La puissance à la sortie de PV P (W) en fonction de t (s) ……25

Fig (I.27) Le courant à la sortie de PV I(A) en fonction de t(s) ……26

Fig (I.28) Le courant à la sortie de l'hacheur Ib(t) ……26

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

…….……..……26

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

Chapitre II :

Fig (II.1) modèle d'impédance Z-source lié avec un onduleur …….……29

Fig (II.2) Schéma équivalent du mode 1……..…….....31

Fig (II.3) Schéma équivalent du mode 2……..……...……32

Fig (II.4) Schéma équivalent du mode 3……...……...…...32

Fig (II.5) Variation du facteur de modulation en fonction du rapport cyclique……...…..34

Fig (II.6) la tension des condensateurs et du courant dans la bobine pendant la période

T……..….....35

Fig (II.7) schéma de Z-source en MATLAB SIMULINK..……..……..……...…..36

Fig (II.8) la tension du sortie de z-source v=f(t) pour R=0.1……..…….……...…...37

Fig (II.9) tension au borne du condensateur vc=f(t) pour R=0.1…….....…….…….…….37

Fig (II.10) la tension du sortie de z-source v=f(t) pour R=0.4…….....…..……38

Fig (II.11) tension au borne de condensateur vc=f(t) pour R=0.4…….....…….38

Fig (II.12) la tension du sortie de z-source v=f(t) pour R=0.7……...…… 39

Fig (II.13) tension au borne de condensateur vc=f(t) pour R=0.7…….....…….39

Fig (II.14) la tension du sortie de z-source v=f(t) pour R=0.9…….…….……. 41

Fig (II.15) tension au borne de condensateur vc=f(t) pour R=0.9……..….……45

Fig.(III.1) Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT …….…….....47

Fig.(III.2) Modèle de l'onduleur à deux niveaux ……45

Fig.(III.3) Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoïdale à une porteuse ……...…….49 **Fig.(III.4)** La commande Simple Boost ……..51

Fig (III.5) programme de la stratégie SBC sur Matlab Simulink de l'onduleur 2 niveaux à z source ……...53

Fig (III.6) les références et la modulante avec l'enveloppe choisi …….……53

Fig (III.7) la tension de sortie de Z source V1(t) ……53

Fig (III.8) la tension de sortie de l'onduleur Vs(t) …….54

Fig (III.9) Zoom de la tension de sortie de l'onduleur Vs(t) …….…….54

Fig (III.10) diagramme fréquentiel FFT de Vs(t) ……54

Fig (III.11) les références et la modulante avec l'enveloppe choisi ……...……55

Fig (III.12) la tension de sortie de Z source V1(t) ……..55

Fig (III.13) la tension de sortie de l'onduleur Vs(t) ……56

Fig (III.14) Zoom de la tension de sortie de l'onduleur Vs(t) ……56

Fig (III.15) diagramme fréquentiel FFT de Vs(t) ……57

Fig (III.16) les références et la modulante avec l'enveloppe choisi ……57

Fig (III.17) la tension de sortie de Z source V1(t) ……..58

Fig (III.18) la tension de sortie de l'onduleur Vs(t) ……58

LISTE DES TABLEAUX

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

Introduction générale :

La consommation durant le siècle dernier a considérablement augmentée à cause de l'industrialisation massive. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, …etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre. En effet, la grande préoccupation du monde actuel est d'atténuer cette pollution par l'adaptation des sources d'énergie classiques à des critères très sévères et par l'utilisation des énergies renouvelables.

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans des domaines d'application les plus variés, dont le plus connu est sans doute celui de la variation de vitesse des machines à courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants à semi-conducteurs entièrement commandables, puissants, robustes et rapides, et d'autre part, sur l'utilisation quasigénéralisée des techniques dites de modulation de largeurs d'impulsions.

Les convertisseurs DC/AC de types onduleurs à source impédante, sont apparus dans la littérature scientifique dans les années 2000 a travers les travaux du Professeur Fang Zheng Peng publies dans l'article de congres [19] paru en 2002. L'objectif de projet consiste à étudier l'onduleur z-source afin de l'intégrer dans un système photovoltaïque dans le but d'améliorer le rendement énergétique du GPV.

Le premier chapitre est consacré à l'étude des systèmes photovoltaïques avec le principe de la MPPT , le deuxième chapitre donne un descriptif ainsi la modélisation de convertisseur Z-. Le troisième chapitre est consacré à une modélisation de l'onduleur deux niveaux a Z-source et une analyse de principe de fonctionnement de ce convertisseur.

Chapitre I :

description d’un système photovoltaïque

Chapitre I : description d'un système photovoltaïque

I.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe (alimenté une charge) ou stockée en batteries. Pour bien comprendre ce phénomène, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur l'effet photovoltaïque, Le principe de la cellule photovoltaïque et leurs différentes modèles et les convertisseurs DC /DC et la charge.

I.2. Cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage. Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple: silicium dopé au phosphore). Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons: il sera dit de type P (exemple: silicium dopé au bore). [1]

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore.

Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). [1]

Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés Figure (I.1). [1]

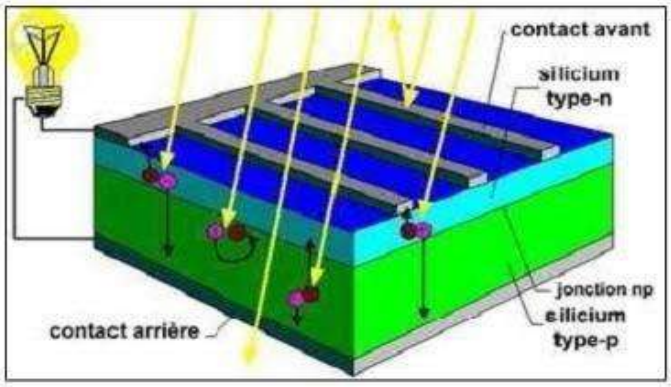


Fig (I.1) Représentation schématique d'une cellule solaire. [1]

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants: Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des pairs électrons/trous dans le matériau semiconducteur ; Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant: d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les pairs électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. [1]

I.3. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

I.3.1. 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**

fig (I.2). 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 $I_s = I_{ph} - I_D$ **(I.1)**

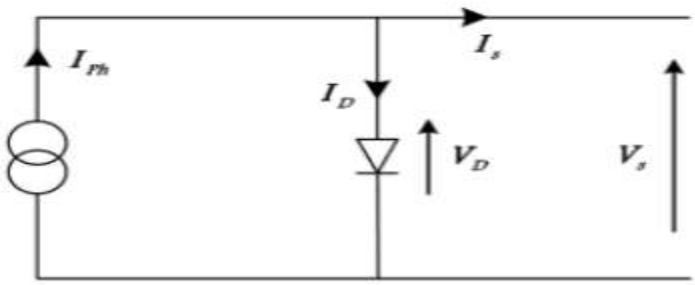


Fig (I.2) Modèle simplifié d'une cellule PV.

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 :

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

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellul

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.3.2. 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.3)). C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheets) [14].

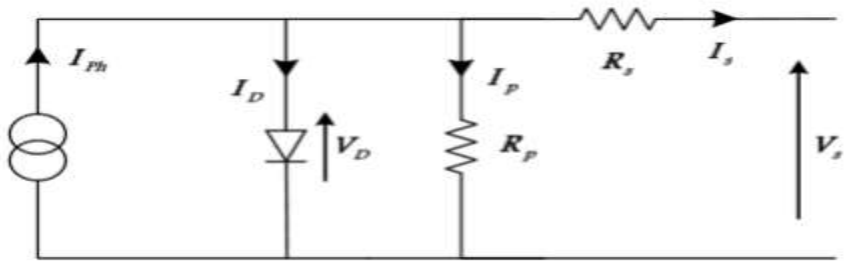


Fig (I.3) Modèle réel à une diode d'une cellule PV

Dans ce cas nous avons :

$$I_s = I_{ph} - I_d - I_p = I_{ph} - I_0\left(e^{\left(\frac{Vd}{nkT/q}\right)} - 1\right) - \frac{Vd}{Rp} \qquad \textbf{(I.4)}$$

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

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

I.3.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

I.3.3.1. Courant de court-circuit (Icc) :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (Rs nulle et Rsh infinie),

I.3.3.2. Tension de circuit-ouvert (Vco) :

C'est la tension Vco pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque)

I.3.3.3. Puissance de la cellule PV :

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairement, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc…), la puissance électrique P(W) disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P = VI \quad \text{(I.7)}$$

- P(w) : Puissance fournie par la cellule PV
- V(V) : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.
- I(A) : Intensité débitée par la cellule PV.

I.3.3.4. Puissance maximale d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale $Pmax$ correspondrait donc à la tension de circuit ouvert Vco multipliée par le courant de court-circuit Icc :

$$Pmax = Vco * Icc \quad \text{(I.8)}$$

- $Pmax$ (W) : La puissance fournie par la cellule PV.

- Vco(V) : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.
- Icc (A) : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie" (figure I.4), et la tension au point de puissance maximale $VPmax$ est inférieure à la tension de circuit ouvert Vco, de même que le courant fourni $IPmax$ est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit Icc . L'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$Pmax = VPmax * IPmax \quad \text{..... (I.9)}$$

I.4. Module photovoltaïque :

la cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis- à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série. [2]



Monocristalli nes Multicristall ines Couche mince

Fig (I.5) Module photovoltaïque. [2]

La figure **I.6 :** montre Câblage des cellules dans un module.

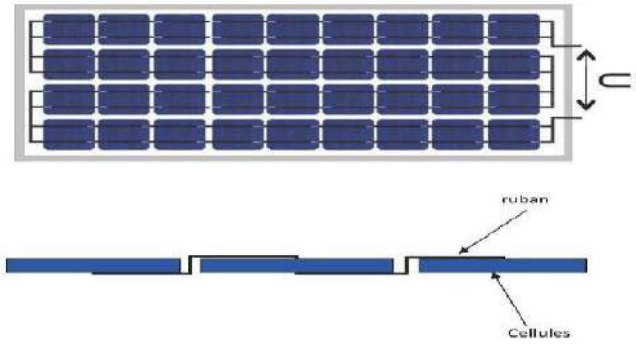


Fig (I.6) Câblage des cellules dans un module. [2]

I.4.1. Caractéristiques d'un module :

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes: [3]

- **La puissance de crête, Pc :** Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).
- **La caractéristique I=f (V) :** Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide, Vco :** Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit, Icc :** Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum, Pm (Vm, Im)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, Pm = Vop x Iop
- **Rendement :** Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

- **Facteur de forme :** Rapport entre la puissance optimale Pm et la puissance maximale que peut avoir la cellule : Vco. Icc

I.4.2. Facteurs limitatifs du rendement :

I.4.2.1. Influence de l'éclairement :

Le courant I_{CC} varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle), la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure (I.7) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimal varie très peut avec l'éclairement. [4]

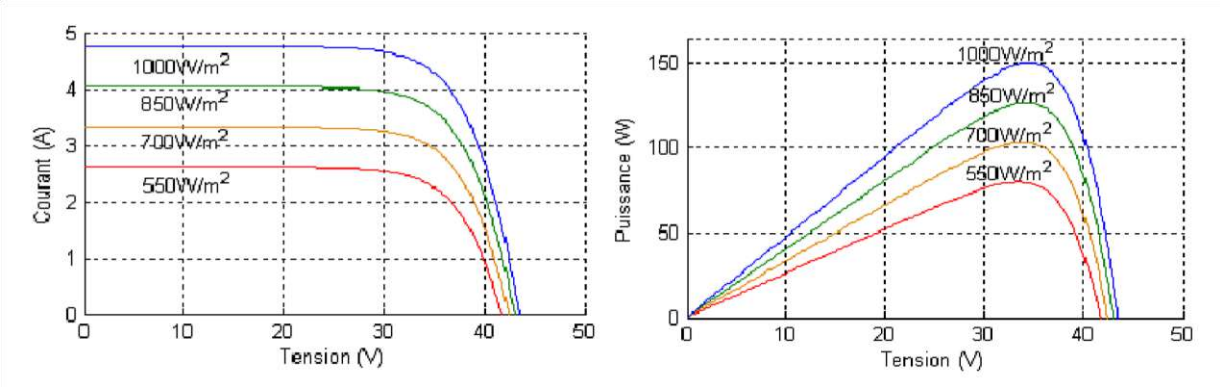


Fig (I.7) Evolution de la caractéristique (I V) et (P V) du module en fonction de L'éclairement. [6]

I.4.2.2. Influence de la température :

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de courte circuit diminue dans des proportions moindres Figure (I.8). La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température. Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un

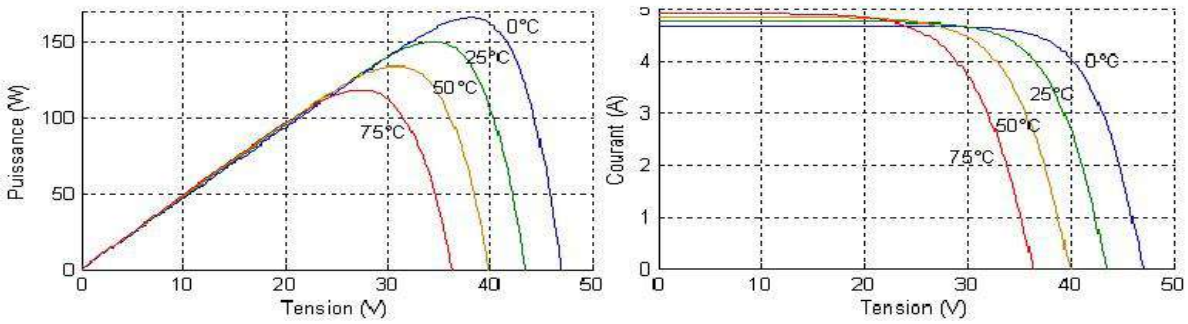


Fig (I.8) Evolution de la caractéristique (I -V) (P -V) du module en fonction de la température fonctionnement à tension optimale constante.

I.4.2.3. Influence de la résistance série RS :

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contactes ohmiques de la cellule.

Les contacts semi-conducteur – électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion. [5]

I.4.2.4. Influence de la résistance parallèle RP :

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structurales du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence des fissures et des défauts des structures complexes le siège de phénomène physique devient assimilable aussi à une résistance parallèle (RP).

Ordre de grandeur de RP pour une cellule au Si : RP = 10^2 à 10^4 Ω. RP augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle. [5]

I.4.5. Panneau solaire :

Le panneau solaire ou (champ solaire) (figure (I.9)) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise.

Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. [3]



Fig (I.9) Panneau photovoltaïque **[1]**

I.5. Système photovoltaïque :

I.5.1. 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.5.2. 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.**[3]**

I.5.3. Types d'un système solaire photovoltaïque :

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

I.5.3.1. 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 : **[1]**

I.5.3.1.1. 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.5.3.1.2. 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).

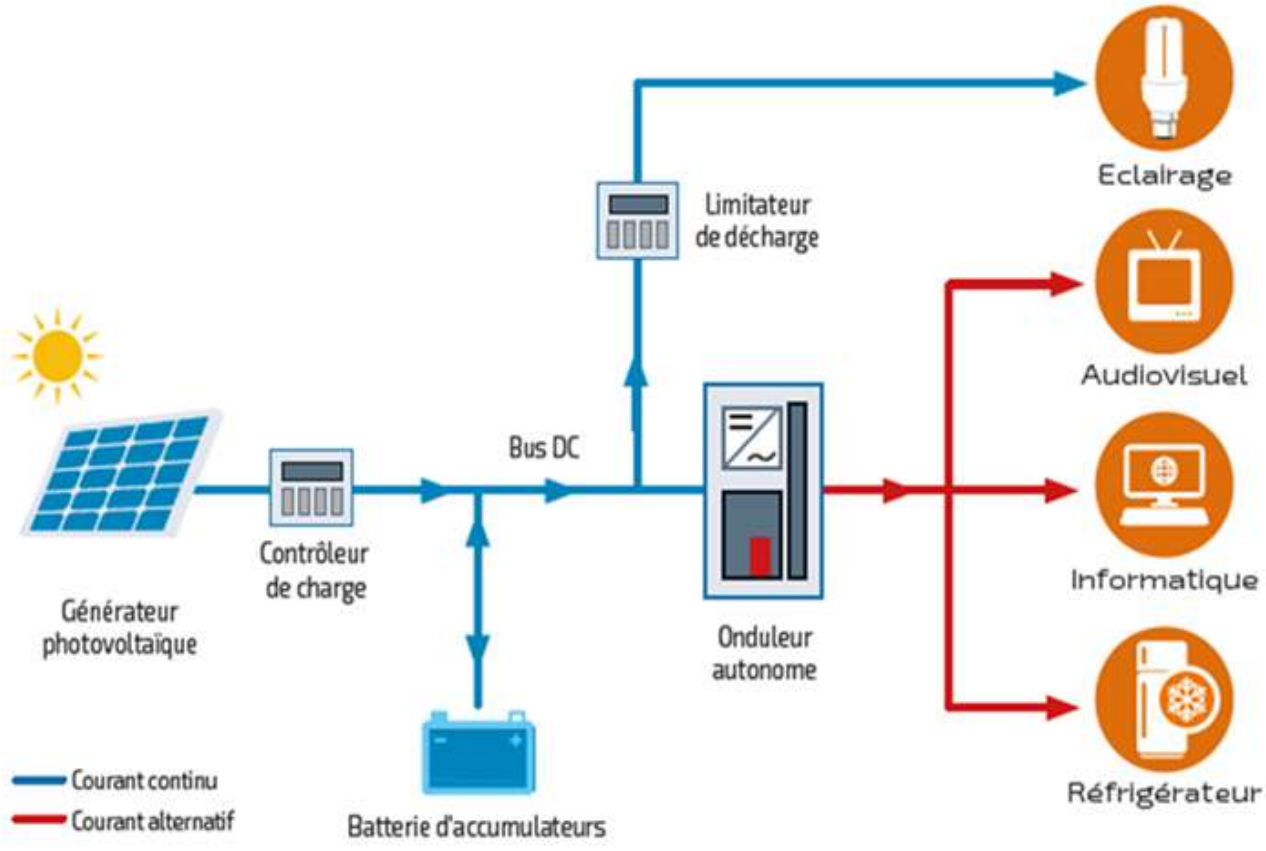


Figure.I.10 schéma de principe d'un système PV autonome avec stockage

I.5.3.2. 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].

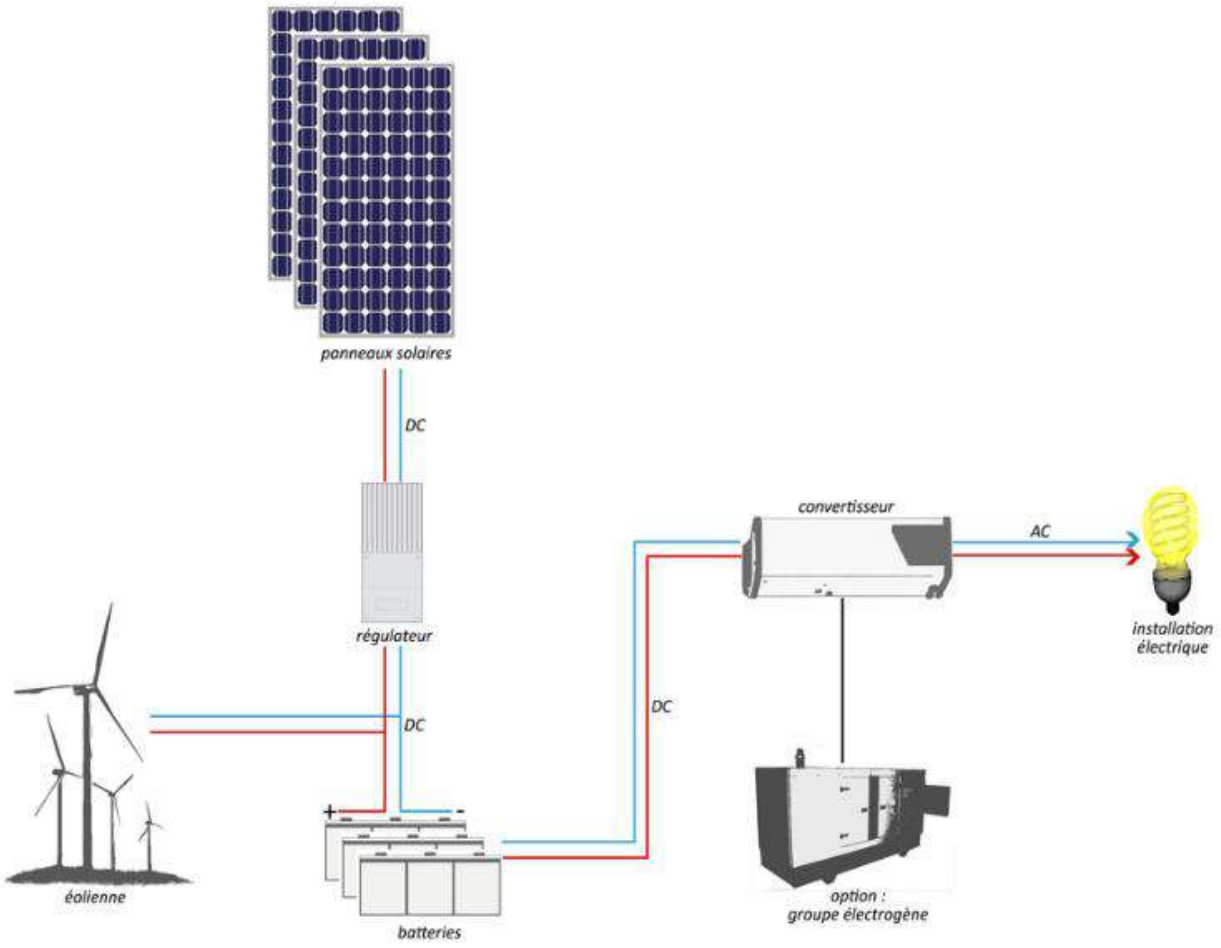


Figure. I. 11 Exemple d'un système PV hybride

I.5.3.3. 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.12 Exemple Système raccordé au réseau électrique

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 utlisée 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.

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).

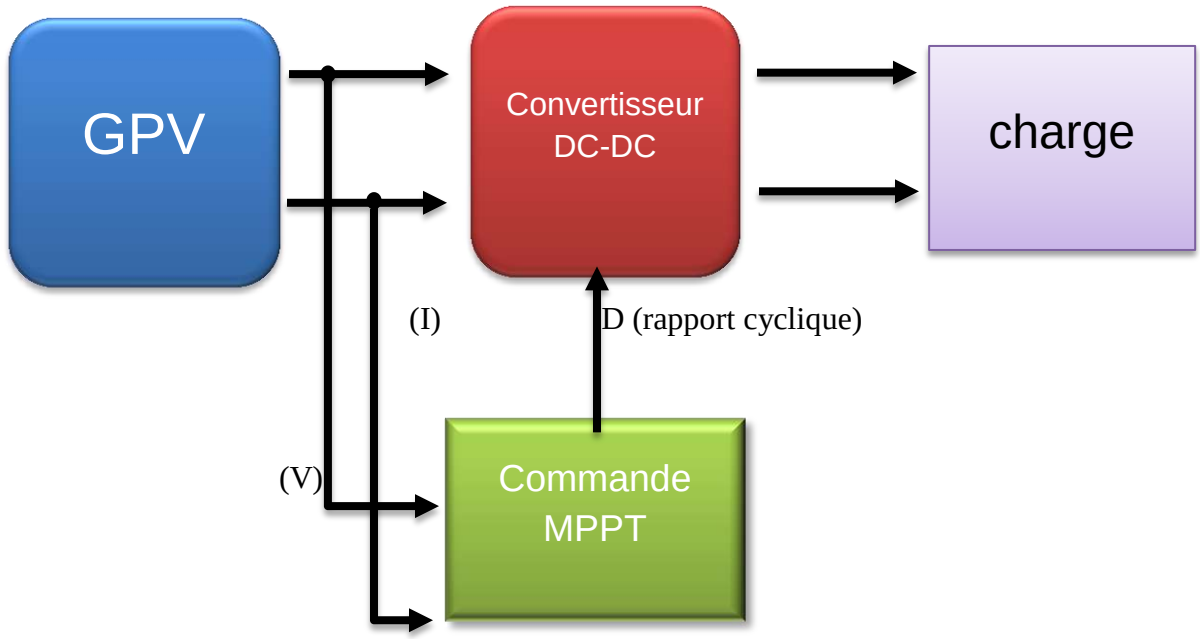


Figure.I.13 système photovoltaïque avec un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT

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]

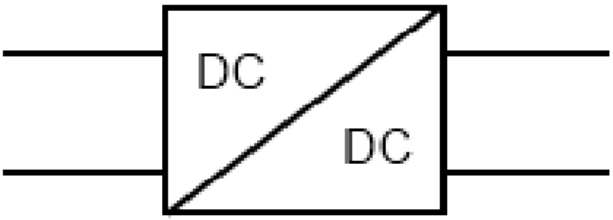


Figure.I.14 Symbole d'un convertisseur DC-DC

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. **[1]** Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

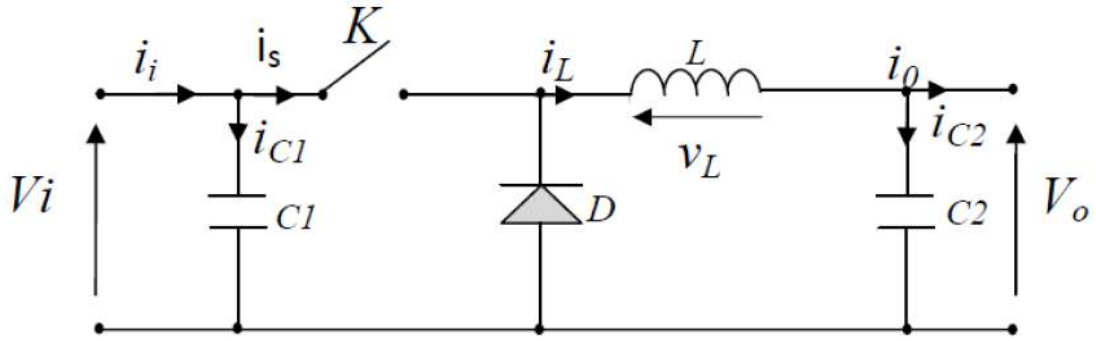
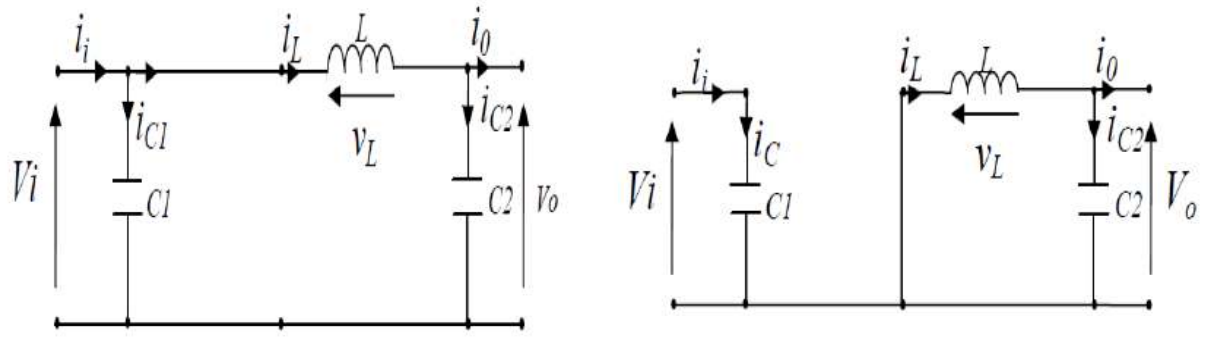


Figure.I.15 schéma d'un convertisseur dévolteur. **[1]**

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.



(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** :

$$I_{C1} = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV0(t)}{dt} = I_l(t) - I_0(t)$$

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

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

$$I_{C1} = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV0(t)}{dt} = I_l(t) - I_0(t)$$

$$V_L = L \frac{dVL(t)}{dt} = -V_0(t)$$

(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. **[6]**

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

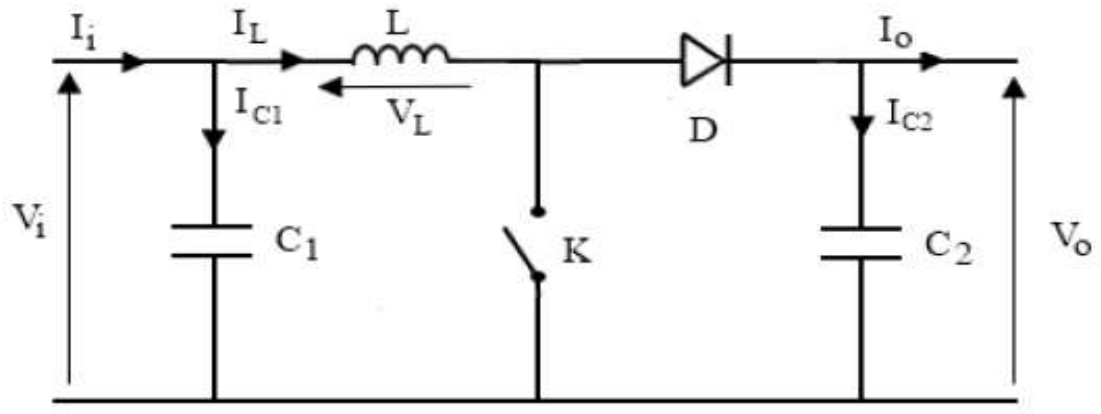


Figure.I.17 schéma d'un convertisseur survolteur**[6]**

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

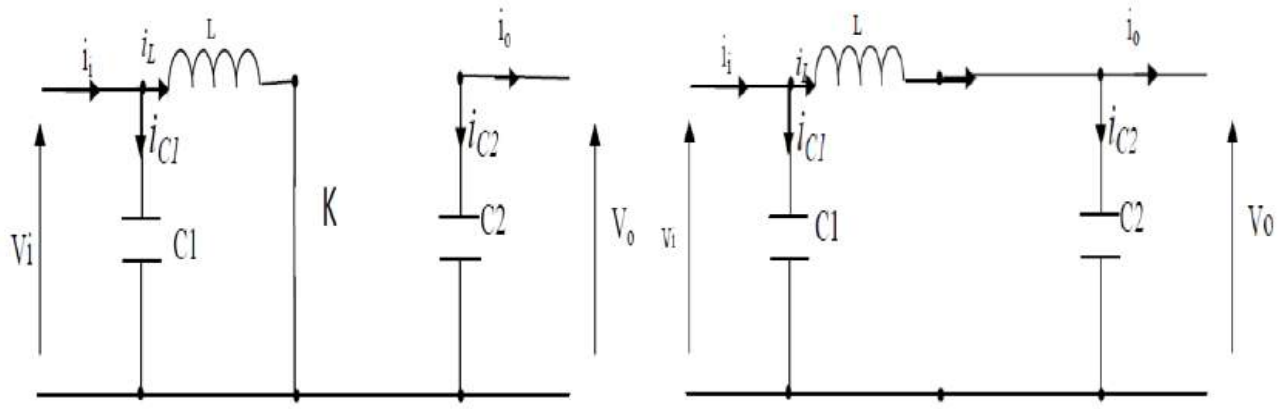


Figure.I.18 schéma simplifié de hacheur boost en deux phases

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

$$I_{C1} = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV0(t)}{dt} = -I_0(t)$$

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

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

$$I_{C1} = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV0(t)}{dt} = I_l(t) - I_0(t)$$

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

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 **[6].** La figure ci-dessous donne la forme de l'hacheur dévolteur-survolteur :

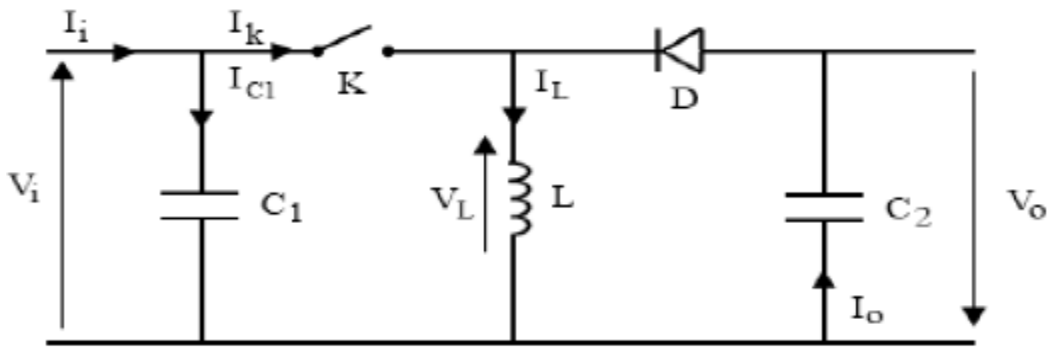


Figure.I.19 schéma d'un convertisseur dévolteur-survolteur**[6].**

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

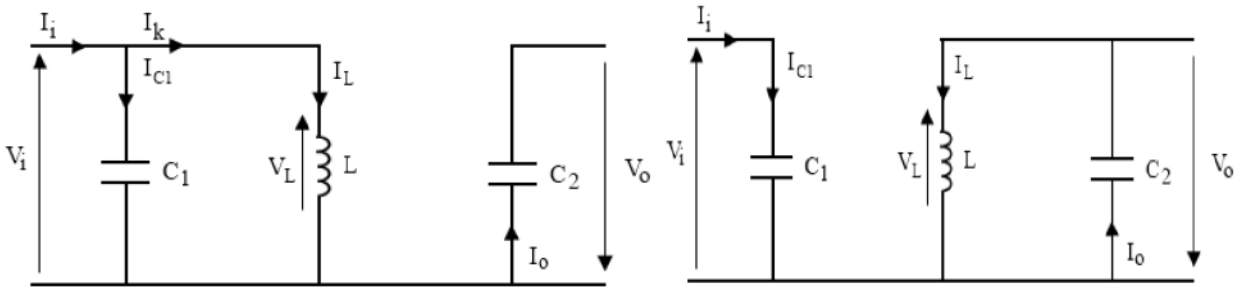


Figure.I.20 schéma simplifié de hacheur buck-boost en deux phases**[6].**

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

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

$$I_{C1} = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV0(t)}{dt} = - I_0(t)$$

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

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

$$I_{C1} = C_1 \frac{dVi(t)}{dt} = I_i(t)$$

$$I_{C2} = C_2 \frac{dV0(t)}{dt} = I_l(t) - I_0(t)$$

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

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.

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.

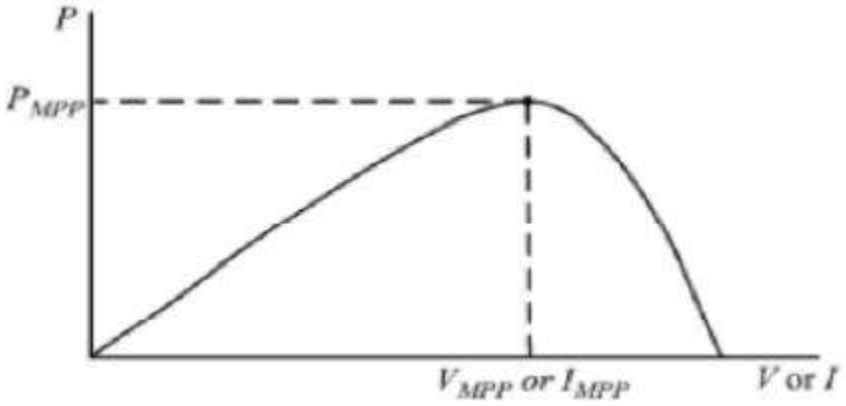


Figure.I.21 Courbe caractéristique de puissance d'un GPV

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.

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), on peut 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).

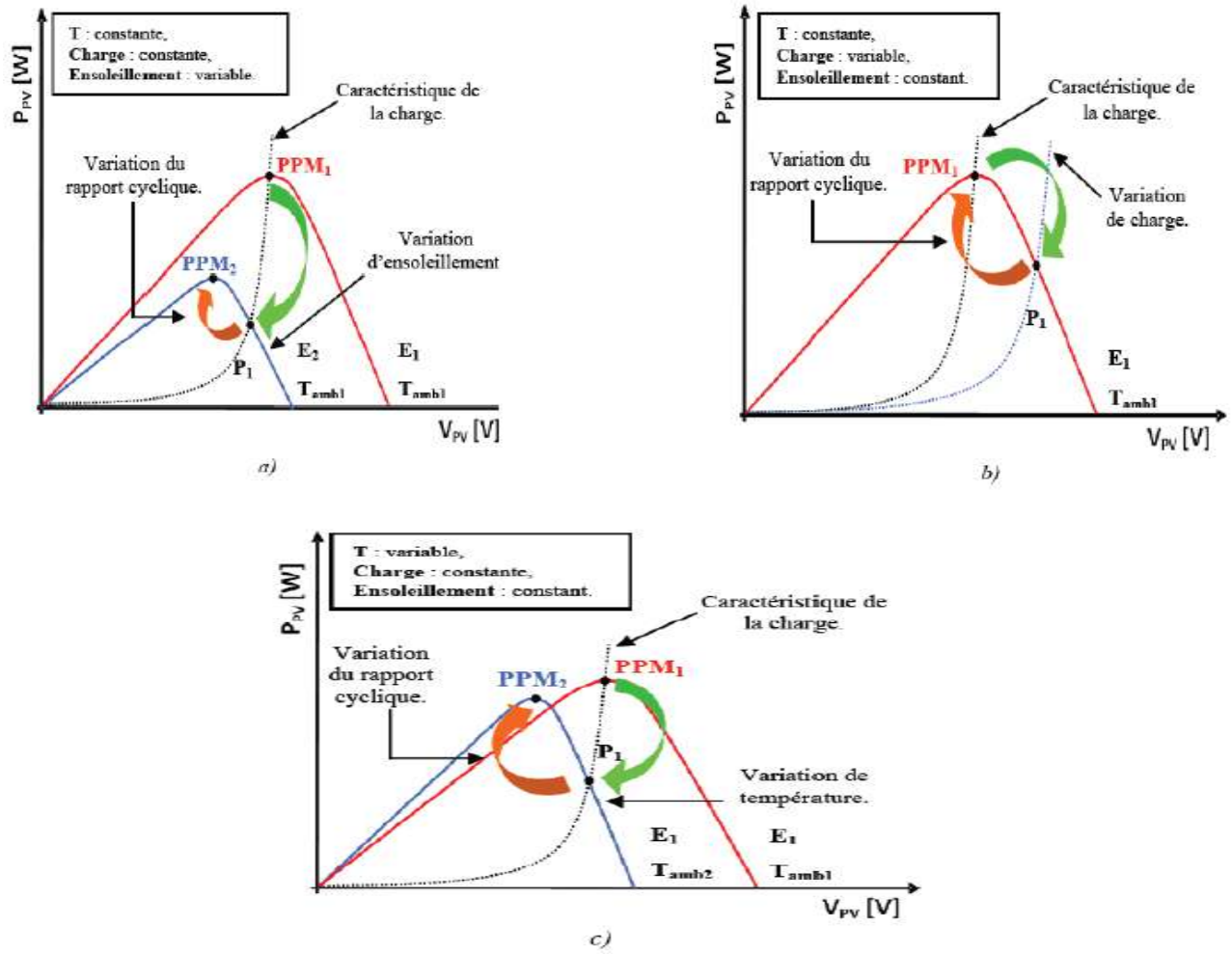


Figure.I.22 Recherche et recouvrement du point de puissance maximale

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 :

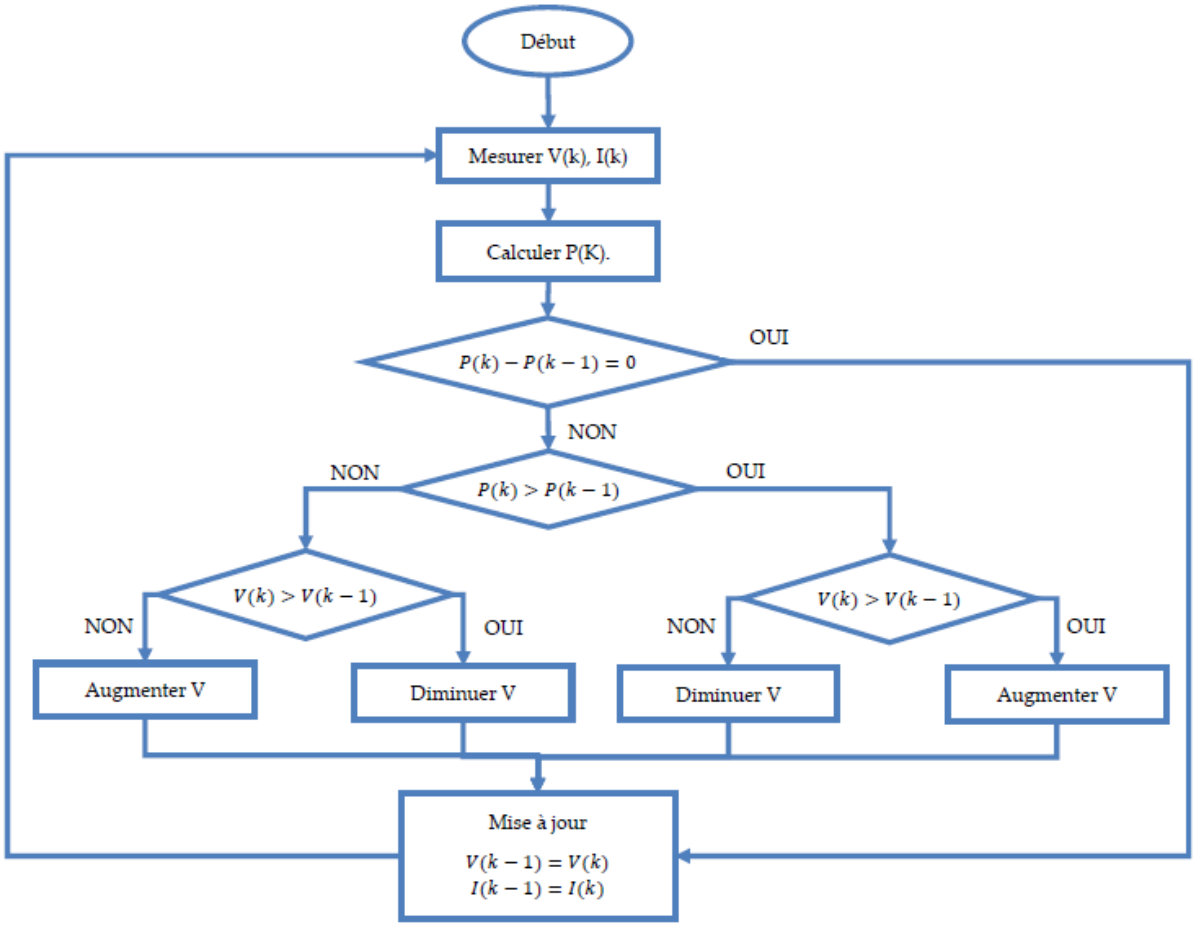


Figure.I.23 Organigramme de la méthode PO.

Dans ce chapitre, on présentera 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) :

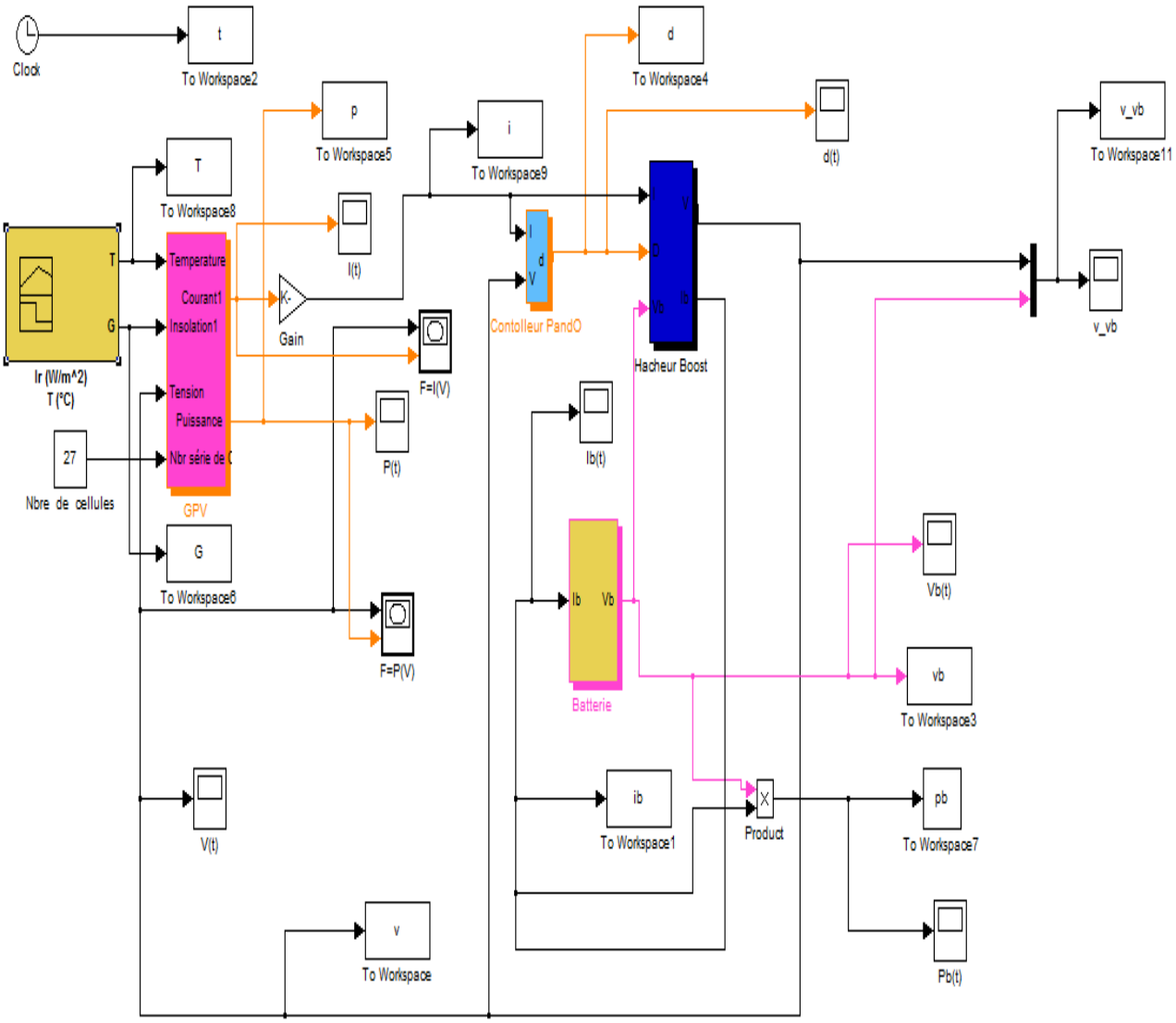


Figure.I.24 schéma blocs de la commande MPPT avec la méthode (P&O)

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

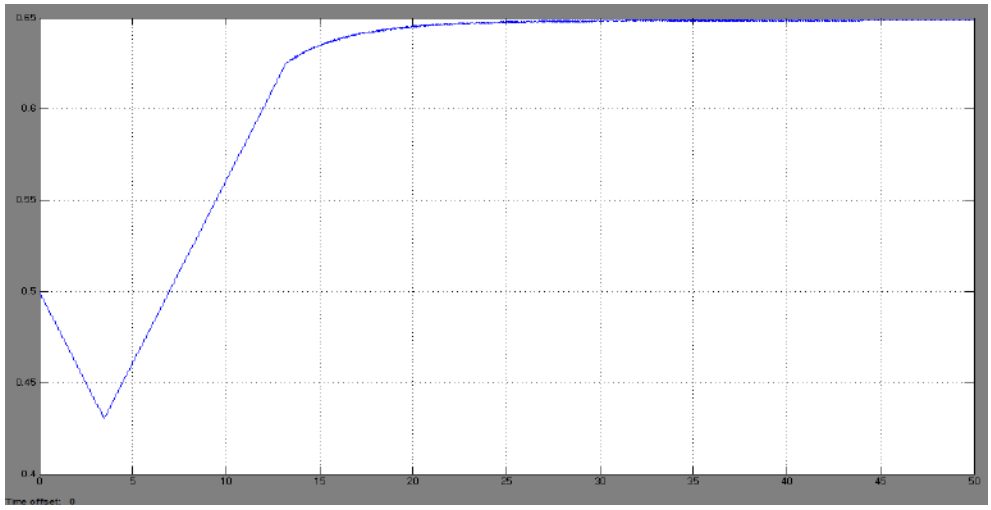


Figure.I.25 Evolution de rapport cyclique d(t)

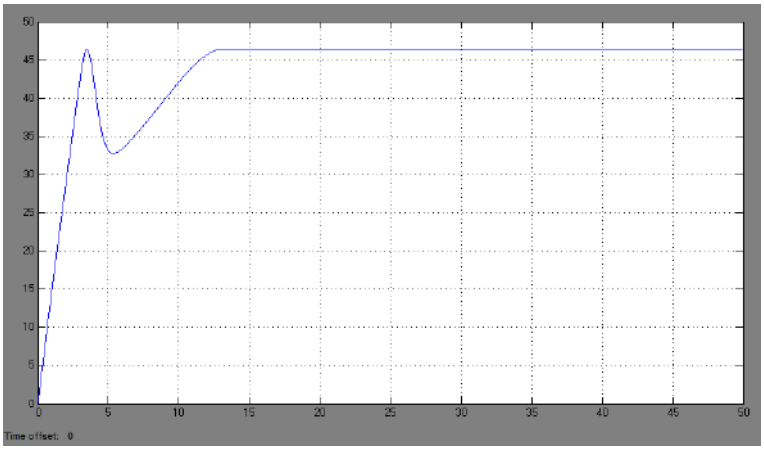


Figure.I.26 La puissance à la sortie de PV P (W) en fonction de t (s)

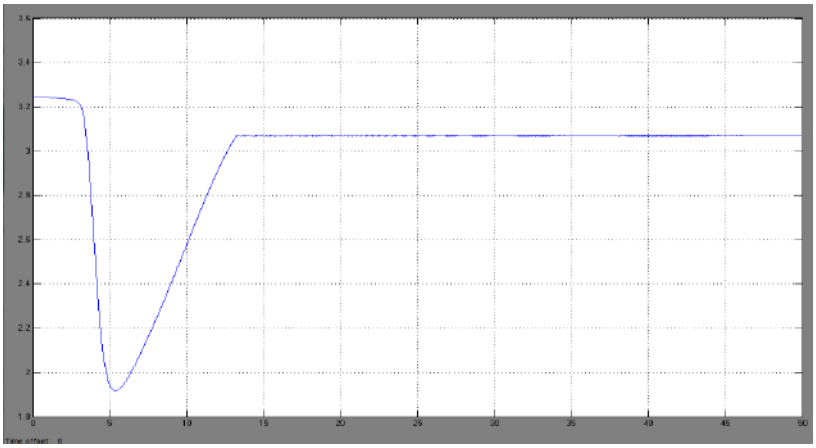


Figure.I.27 Le courant à la sortie de PV I(A) en fonction de t(s)

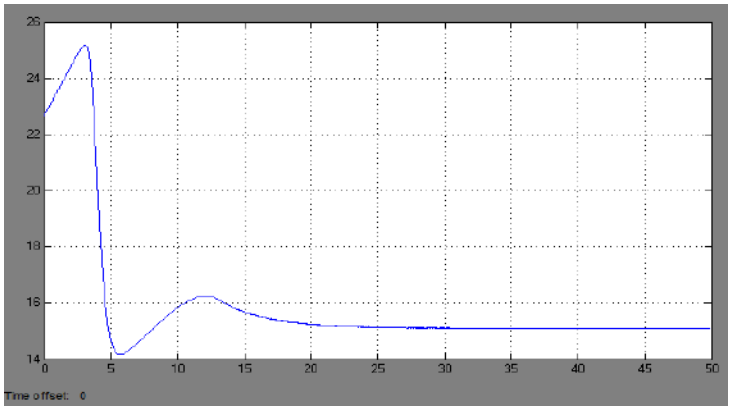


Figure.I.28 Le courant à la sortie de l'hacheur Ib(t)

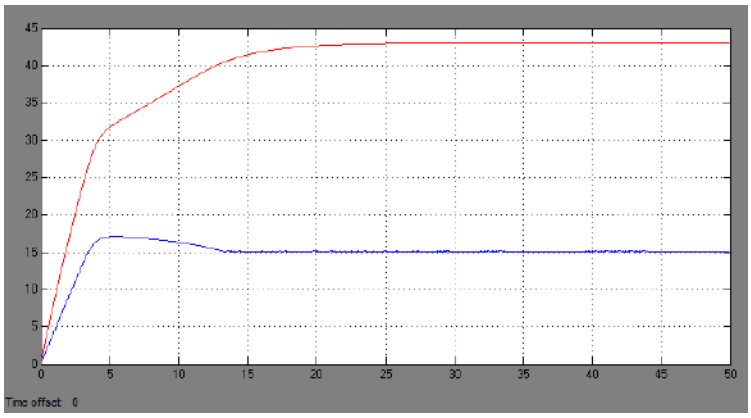


Figure.I.29 La tension à la sortie de l'hacheur par rapport à l'entrée Vs(V) en fonction de t(s)

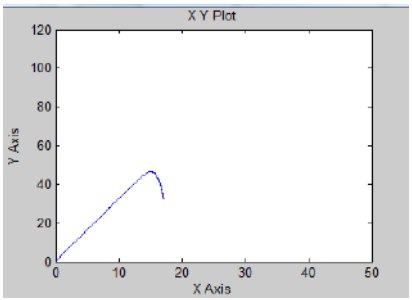


Figure.I.30 MPPT pour un éclairement de 1000W P(V)

I.6.2.5. Interprétations des résultats :

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

Chapitre 2 :

Modélisation de convertisseur Z-source

Chapitre 2 : Modélisation de convertisseur Z-source

II.1. Introduction :

Les onduleurs à Z source 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 [18]. Les convertisseurs DC/AC de types onduleurs à source impédante, sont apparus dans la littérature scientifique dans les années 2000 a travers les travaux du Professeur Fang Zheng Peng publies dans l'article de congres [7] paru en 2002.

II.2. Définition :

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.

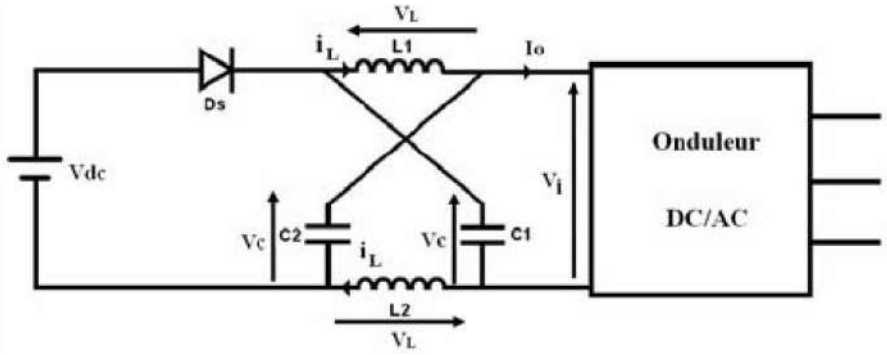


Figure.II.1 modèle d'impédance Z-source lié avec un onduleur

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

On définit 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 **[7]**:

- 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)**

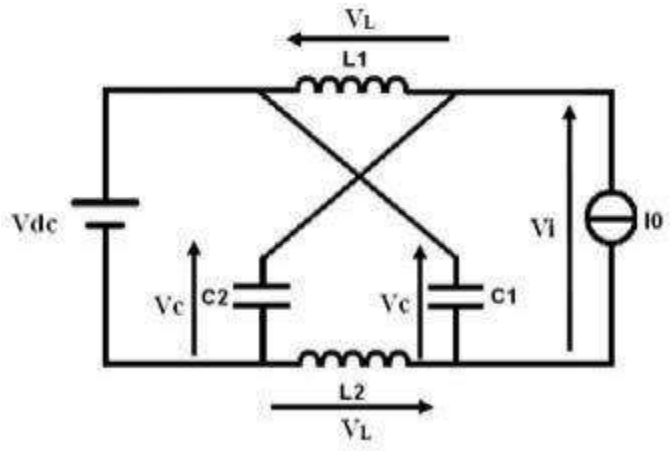


Figure.II.2 Schéma équivalent du mode 1

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.

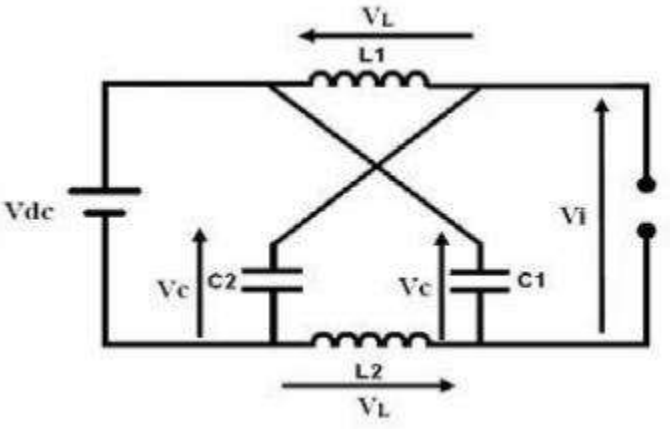


Figure.II.3 Schéma équivalent du mode 2

➢ 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).

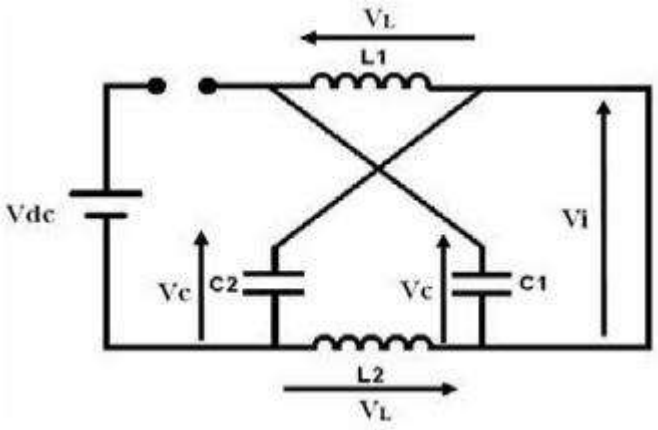


Figure. II.4 Schéma équivalent du mode 3

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.

On peut déduire la valeur moyenne de l'inductance L, tension au borne du 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 $V_{i\,max}$. On utilise les coefficients d'amplification de la structure :

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

on remplace 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 [z source]

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

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)

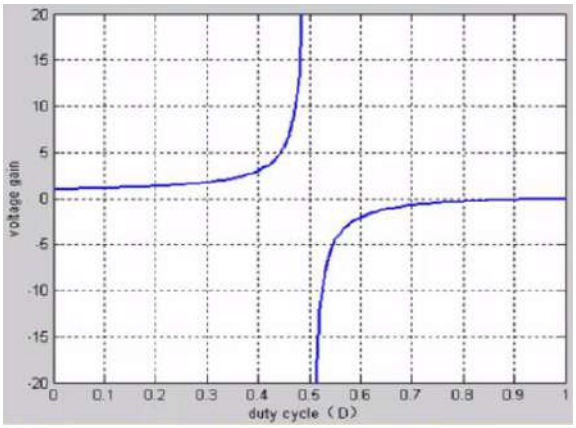


Figure II.5 : Variation du facteur de modulation en fonction du rapport cyclique

II.4.1. Interprétation de graphe :

On remarque 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 on dit 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 on peut 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.5. dimensionnements de l'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.

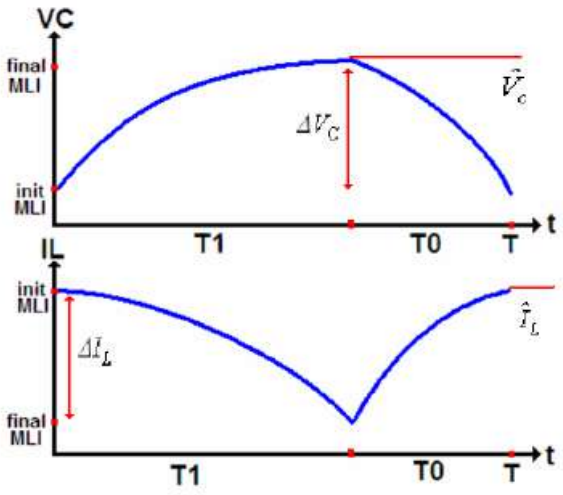


Figure II.6 la tension des condensateurs et du courant dans la bobine pendant la période T

Alors :

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

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

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.

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

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

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

II.6. Simulation :

Réalisation de Z-source par MATLAB Simulink en schéma blocks

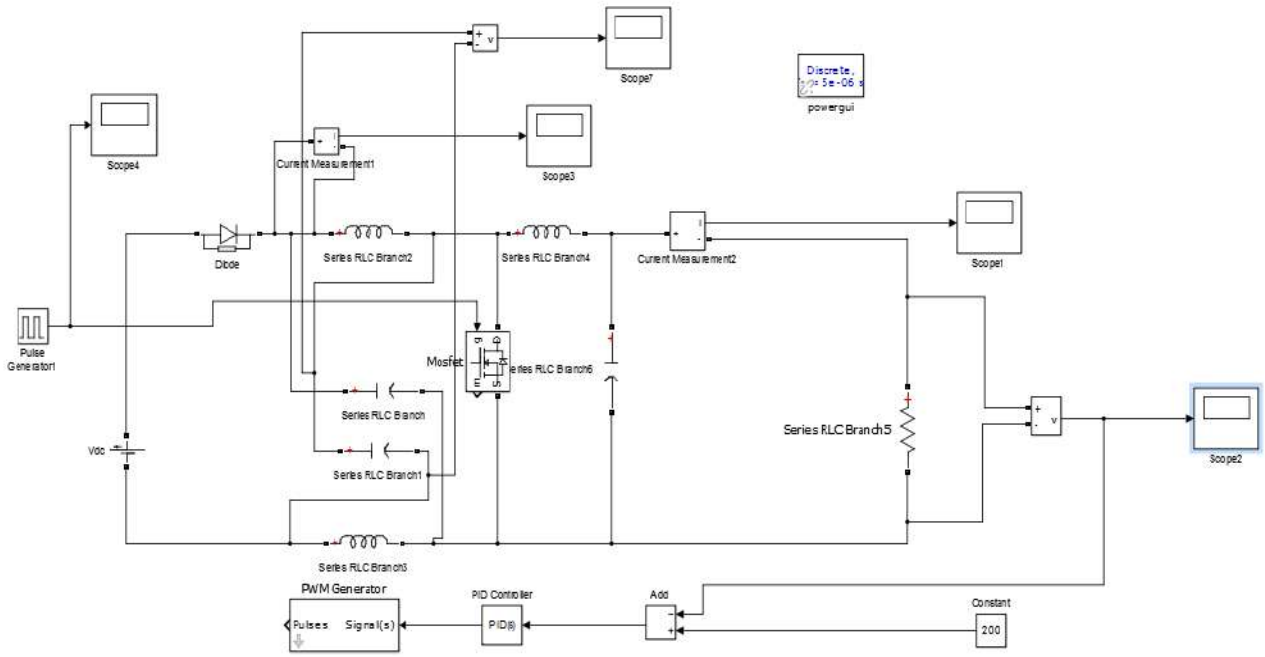


Figure II.7 : schéma de Z-source en MATLAB SIMULINK

II.6.1. Les résultats de la simulation :

Les figures suivantes représentent les résultats de simulations de la tension de sortie Vs de et de la tension Vc aux bornes de condensateur et de la tension Vl aux bornes de l'inductance pour différentes rapport cyclique R d'un signal carré Ve:

- les paramètres utilisés dans la simulations sont:

C1 =C2 = 500 µF

L1=L2 =50µH

- **Pour R=0.1** VE=100v , Vs=350v

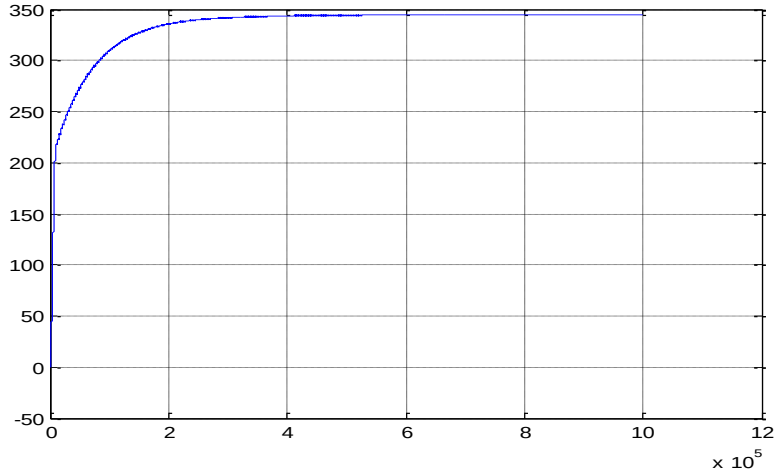


Fig (II.8) : la tension du sortie de z-source v=f(t) pour R=0.1

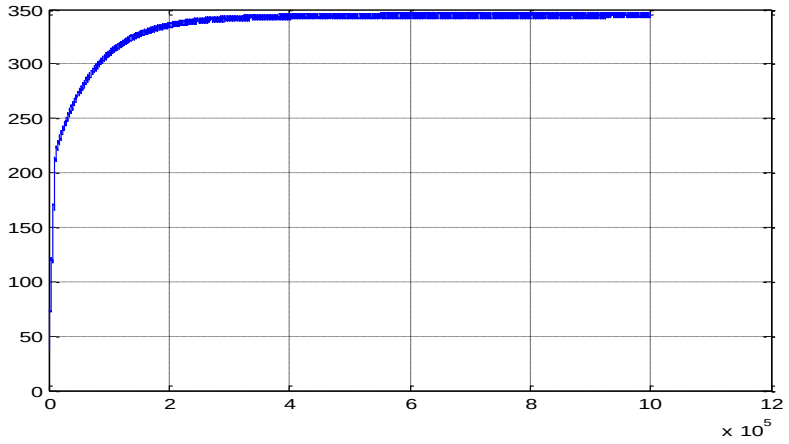


Fig (II.9) : tension au borne du condensateur vc=f(t) pour R=0.1

- **Pour R=0.4** VE=100V , Vs=1200v

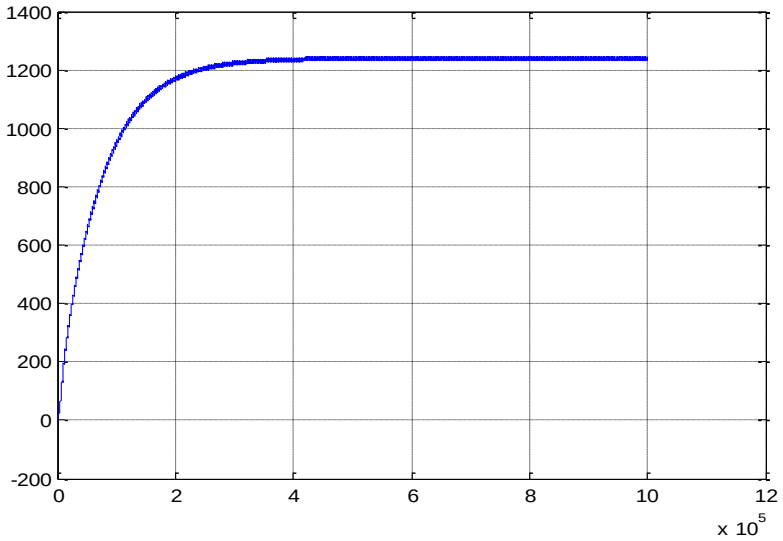


Fig (II.10) : la tension du sortie de z-source v=f(t) pour R=0.4

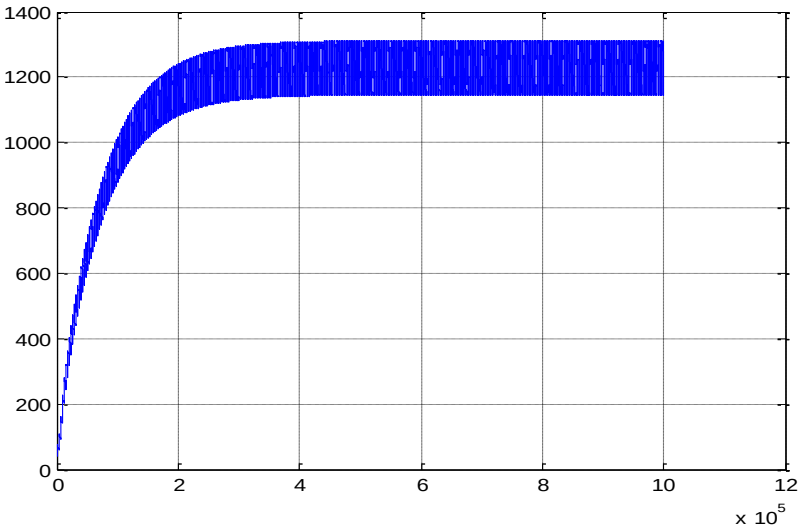


Fig (II.11) : tension au borne de condensateur vc=f(t) pour R=0.4

- **Pour R=0.7** VE=100 , Vs=160v

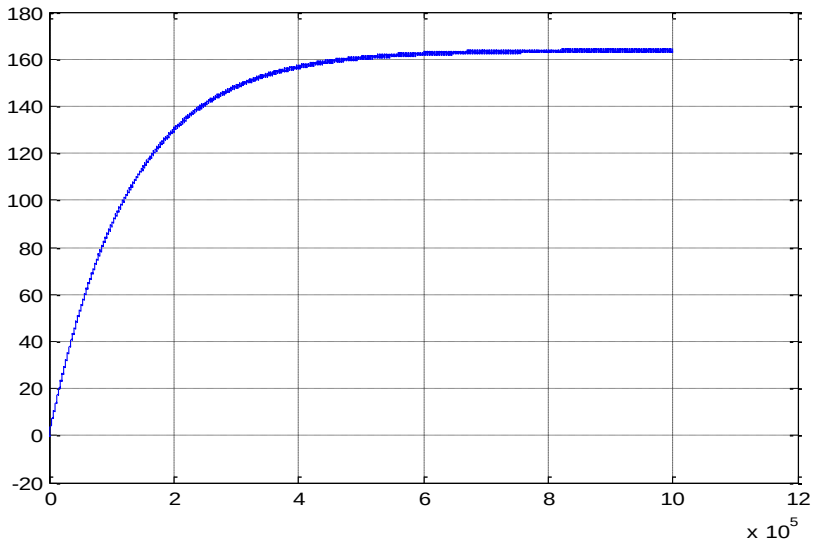


Fig (II.12) : la tension du sortie de z-source v=f(t) pour R=0.7

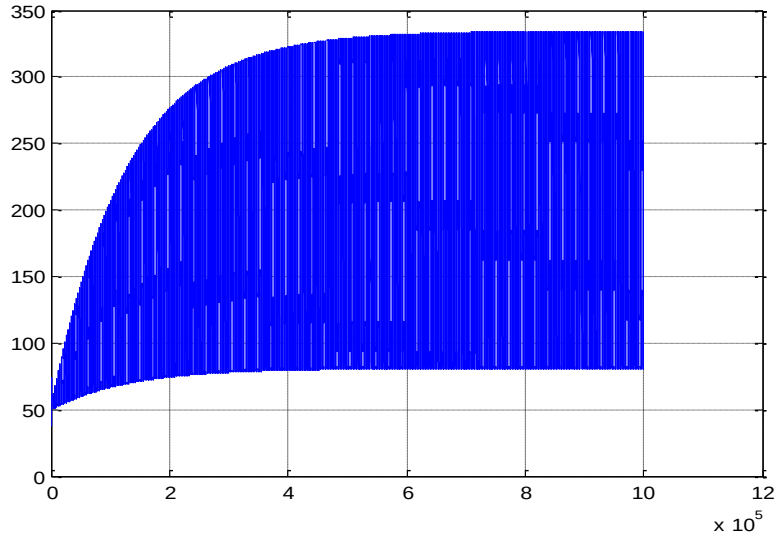


Fig (II.13) : tension au borne de condensateur vc=f(t) pour R=0.7

- **Pour R=0.9** VE=100v , Vs=100v

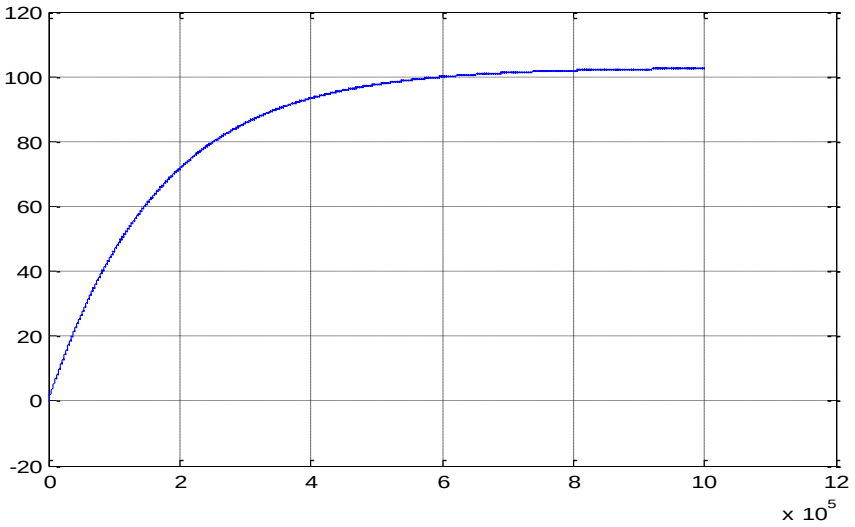


Fig (II.14) : la tension du sortie de z-source v=f(t) pour R=0.9

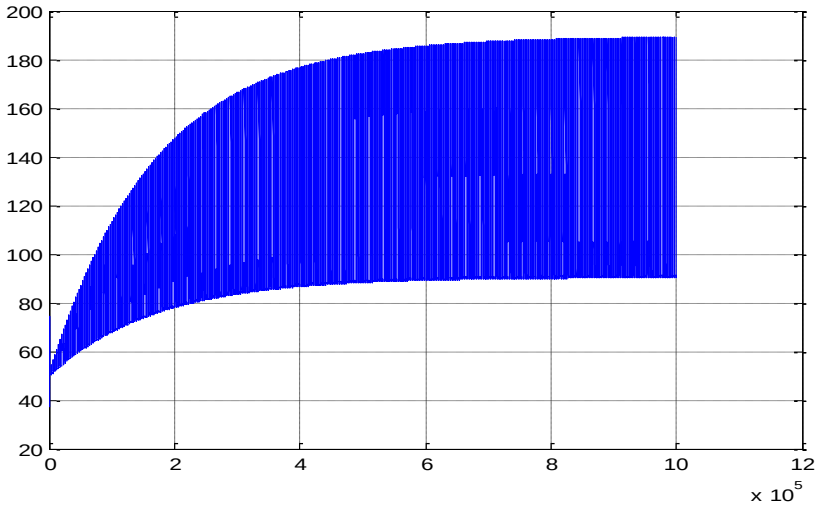


Fig (II.15) : tension au borne de condensateur vc=f(t) pour R=0.9

II.6.2. Interprétation des résultats :

- Pour les paramètres utilisés dans la simulations :
- On remarque lorsqu' on augmente le rapport cyclique R dans l'intervalle 0<R<0.5 le module Z source travail en mode boost.
- Si on augmente encore le rapport cyclique R dans l'intervalle 0.5<R<1 le module Z source travail en mode Buck.
- Le but des inductances est de limiter l'ondulation du courant à travers les dispositifs.
- Si la durée de court-circuit augmente la tension de sortie augmente

II.7. 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 3 :

Stratégies de la commande d'un onduleur Z-source

Chapitre 3 : Stratégies de la commande d'un onduleur Z-source

Partie A : Modélisation et commande de l'onduleur deux niveau

III.1 Introduction :

Les onduleurs Z-source utilisent un réseau d'impédance pour coupler l'onduleur à la source de tension continue. Ce réseau d'impédance est constitué d'une structure L C hybride croisée. Il permet à l'onduleur d'amplifier la tension de sortie grâce à une commande spécifique, ce qui le rend équivalent à la mise en cascade d'un hacheur survolteur avec un onduleur classique.

Notre objectif dans ce travail est déterminé le principe de fonctionnement. D'autre part, on cherche à obtenir des grandeurs de sortie ayant une meilleure définition, c'est-à-dire présentent un contenu harmonique réduit. **[8]**

III.2 Convertisseur DC-AC :

Un convertisseur DC/AC (onduleur) est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication,.) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux,…) **[9].**

Les onduleurs ont une structure en pont constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les transistors MOSFET(BT) ou des IGBT(HT). Les trois principaux éléments qui constituent un onduleur sont les suivants:

- Source de tension continue (par exemple: batterie, centrales photovoltaïques)
- Convertisseur DC/AC
- Filtre LC.

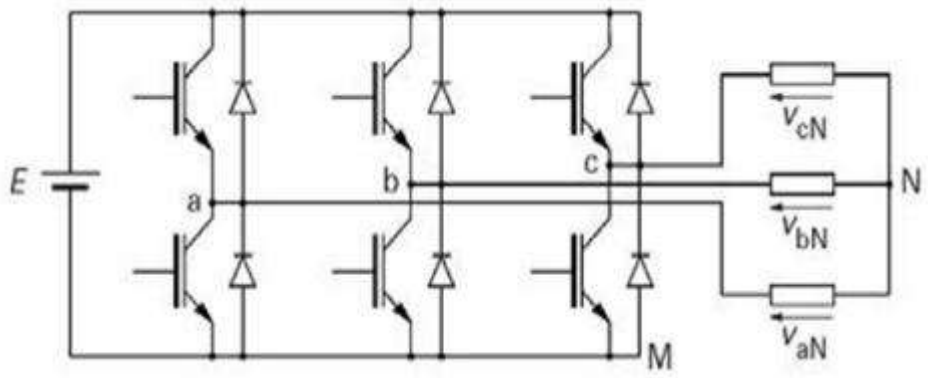


Fig.(III.1) Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT

III.2.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux :

La modélisation se fait par Bras à cause de symétrie de l'onduleur à deux niveaux. Après avoir modélisé chaque couple transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel « Si » Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur (Figure III.2).

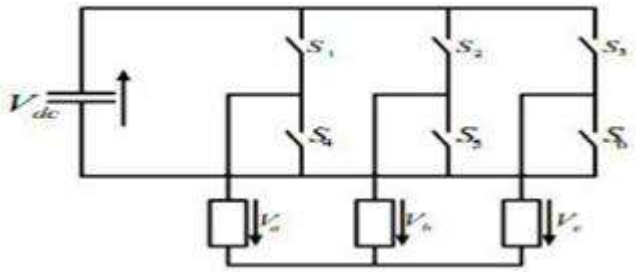


Fig.(III.2) Modèle de l'onduleur à deux niveaux

Pour déterminer les tensions des linges en fonction de la tension du bus continu et de l'état des commutateurs, nous définissons trois variables Sa, Sb et Sc qui dépendent des états des commutateurs dans les branches.

• Branche1 :

Sa=0 Si S1 est ouvert et S4 est fermé;

Sa=1 Si S1 est fermé et S4 est ouvert.

• Branche2 :

Sb=0 Si S2 est ouvert et S5 est fermé;

Sb=1 Si S2 est fermé et S5 est ouvert.

• Branche3 :

Sc=0 Si S3 est ouvert et S6 est fermé;

Sc=1 Si S3 est fermé et S6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} Uab = Vdc\,(Sa-Sb) \\ Ubc = Vdc\,(Sb-Sc) \\ Uca = Vdc\,(Sc-Sa) \end{cases} \qquad (3.1)$$

Ainsi, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}\,(U_{ab}-U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}\,(U_{bc}-U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}\,(U_{ca}-U_{bc}) \end{cases} \qquad (3.2)$$

tel que : Van, Vbn et Vcn sont des tensions simples.

Uab , Ubc, Uca sont des tensions composées

Donc l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} Van \\ Vbn \\ Vcn \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \qquad (3.3)$$

III.2.2 La commande par modulation de largeur d'impulsions MLI du l'onduleur :

La modulation de largeur d'impulsions triangulo-sinusoïdale c'est un type de commande qui utilise l'intersection entre une onde de référence sinusoïdale qui s'appelle la Modulante

avec une porteuse triangulaire bipolaire. La comparaison entre ces deux signaux permet de commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de puissance (figure 3.3).

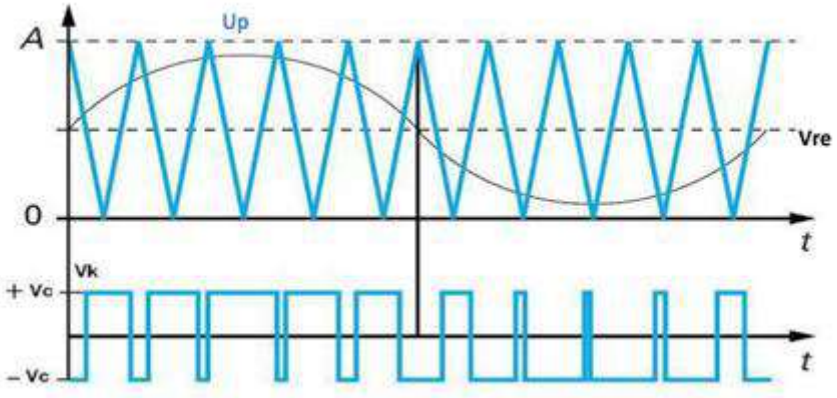


Fig.(III.3) Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoïdale à une porteuse.

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{fp}{f} \qquad (3.4)$$

- Le Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (Vref) et la porteuse (Up) :

$$r = \frac{Vref}{Up} \qquad (3.5)$$

L'algorithme de commande de la stratégie triangulo-sinusoïdale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes :

➢ Etape 1 :

$$\begin{cases} VrefK \geq Up \Longrightarrow V_K = V_{dc} \\ VrefK < Up \Longrightarrow V_K = -V_{dc} \end{cases} \quad (3.6)$$

➢ Etape 2 :

$$\begin{cases} VK = Vdc \Longrightarrow S_K = 1 \\ VK = -Vdc \Longrightarrow S_K = 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

III.3 Les méthodes de survoltage :

La technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) permet de commander la tension de sortie de l'onduleur en amplitude et en fréquence à partir des signaux de commandes des interrupteurs de l'onduleur tout en limitant l'effet des harmoniques. Cette technique a donné des résultats satisfaisants, et elle génère relativement moins d'harmoniques dans la tension de sortie.

II existe différentes méthodes qui peuvent être utilisées pour contrôler l'onduleur Z source qui sont : Simple Boost, Maximum Boost et Constant maximum Boost. Dans notre cas on a utilisé que la première stratégie.

III.3.1 Simple Boost (MLI simple Boot Control SBC):

La commande Simple Boost est simple et facile à mettre en œuvre. Toutefois, le rapport cyclique Shoot-Through obtenu D diminue avec l'augmentation du taux de modulation « r ». Le rapport cyclique Shoot-Through maximum de la commande Simple Boost est limité à 1-r pour une opération particulière, atteignant zéro pour un taux de modulation égale à 1. Par conséquent, l'opération avec un taux de modulation élevé pour la commande Simple Boost, conduit à une faible tension de sortie. Afin de générer une tension de sortie qui nécessite un gain en tension élevée, un faible taux de modulation doit être utilisé **[10,11].** En fait, cette stratégie de commande insert le Shoot-Through dans tous les états nuls de la MLI traditionnelle pendant une période de commutation, qui maintient les six états actifs inchangés comme dans la MLI à porteuse classique. La méthode de commande Simple Boost est illustré sur la figure (3.4).

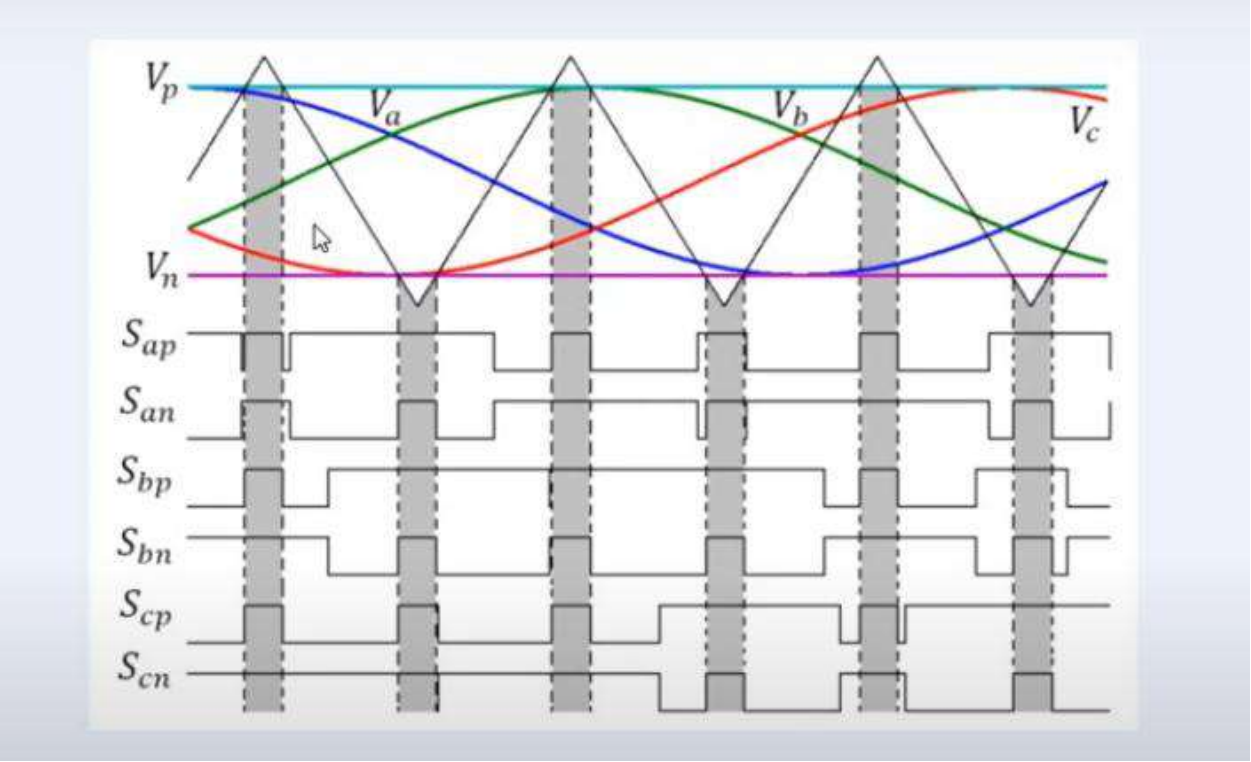


Fig.(III.4) La commande Simple Boost

Deux droites sont utilisées pour réaliser le rapport cyclique Shoot-Through (D). La première est supérieure ou égale à la valeur de crête des tensions de références sinusoïdales triphasées tandis que l'autre est le négatif de la première. Chaque fois que les signaux de la porteuse triangulaire sont plus élevés que la ligne droite positive ou inférieure à la ligne droite négative, l'onduleur sera exploité en ShootThrough, sinon, il fonctionne comme un onduleur à MLI traditionnelle.

La relation entre le taux de modulation (r) et le rapport cyclique maximal de Shoot-Through (D) est exprimée comme suit **[10,11,12]** :

$$D_{max} = 1 - r \qquad (3.8)$$

Avec :

r=T1/T

Le gain en tension de l'onduleur Z-source peut être écrit comme suit **[10]**

$$\begin{cases} G = B.r \\ B = \dfrac{1}{1-2D} \\ G = \dfrac{r}{1-2D} \end{cases} \qquad (3.9)$$

On remplace la valeur de Dmax dans l'équation (3.9), on obtient :

$$G = \frac{V_{ac}}{V_g/2} = MB = \frac{r}{2r-1}$$

G : représente le gain de l'onduleur Z-source.

Partie B : simulation de l'onduleur deux niveaux a z source :

III.4 les simulations :

On a choisi la technique SBC (simple boost control)

III.4.1 Les paramètres de simulations

L1= L2 = 5mH

C1= C2 = 1500 μF

L'amplitude des tension de référence Va , Vb , Vc = 0.727v avec une fréquence de 50Hz.

La figure 3.5 montre l'onduleur à Z source sur Matlab Simulink ou VE , V1 , Vs représentent respectivement la source de tension continue, et la sortie continue de Z source et enfin la sortie de l'onduleur.

Les résultats de simulation visualise V1 l'amplification à la sortie de z source ainsi la forme composé Vs a la sortie de l'onduleur avec une analyse spectral.

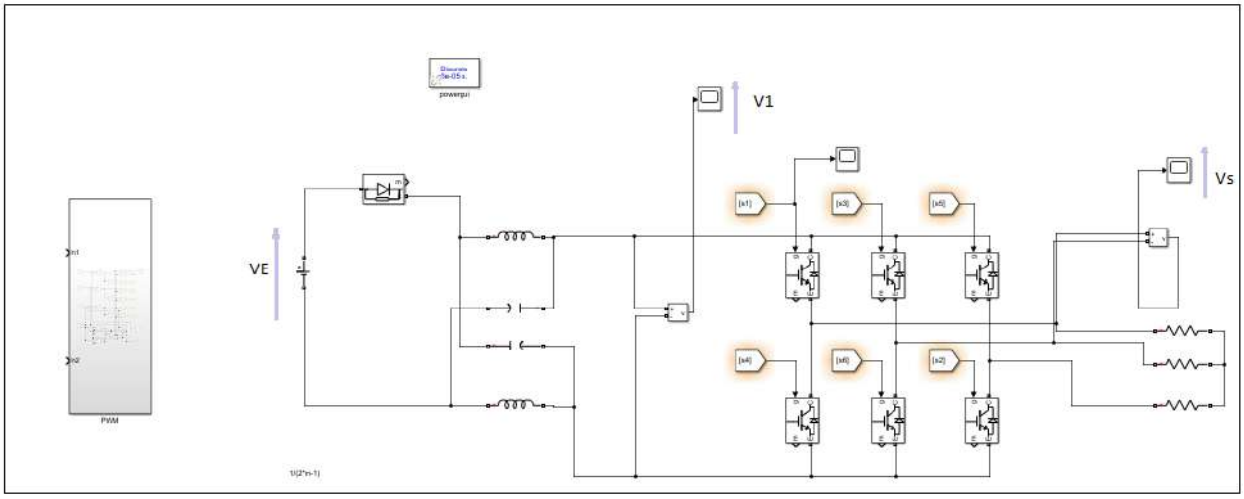


Fig (III.5) programme de la stratégie SBC sur Matlab Simulink de l'onduleur 2 niveaux à z source

- **Pour m= 10 r=0.8 VE= 100v**

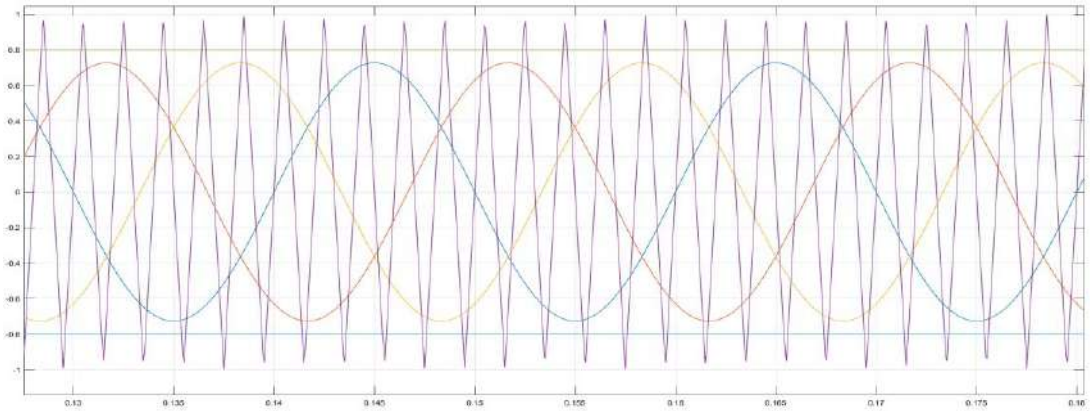


Fig (III.6) les références et la modulante avec l'enveloppe choisi

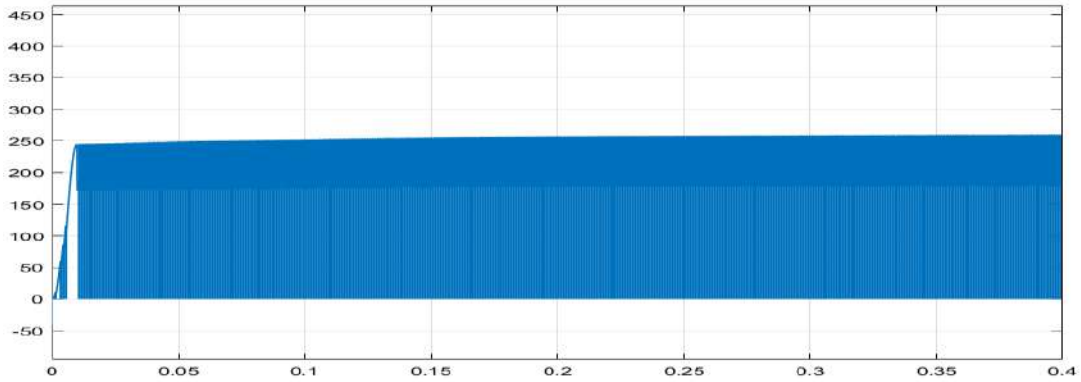


Fig (III.7) la tension de sortie de Z source V1(t)

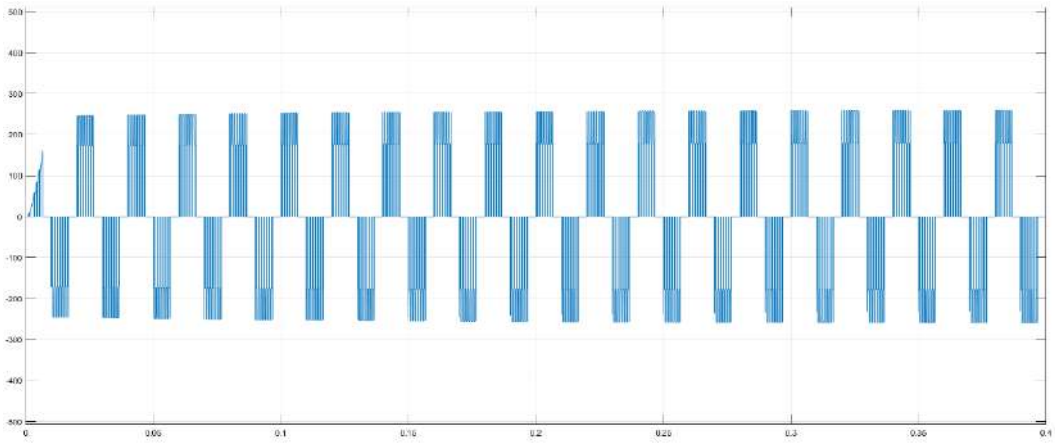


Fig (III.8) la tension de sortie de l'onduleur Vs(t)

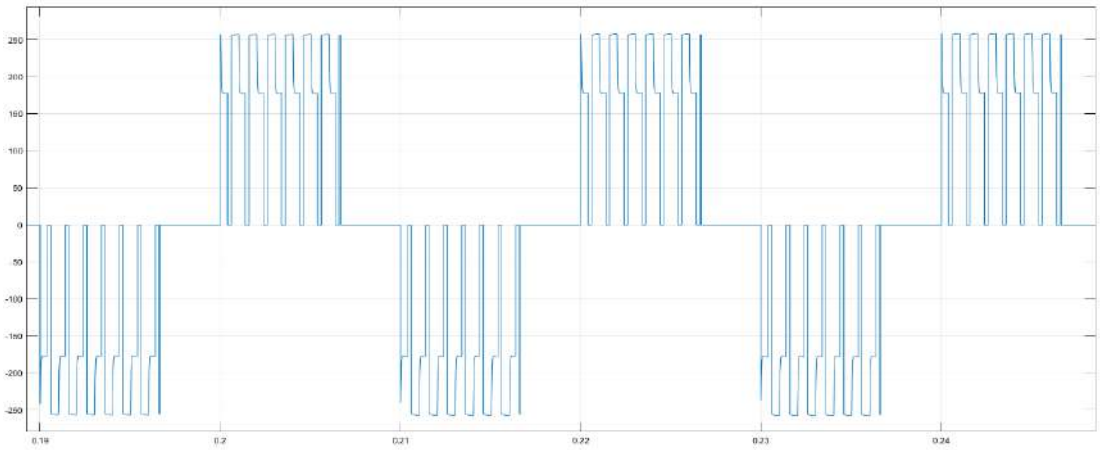


Fig (III.9) Zoom de la tension de sortie de l'onduleur Vs(t)

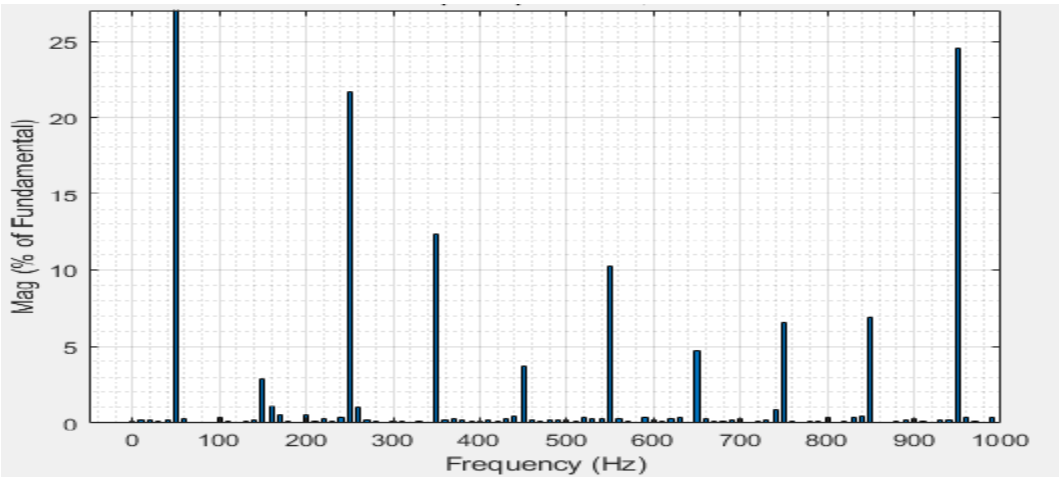


Fig (III.10) diagramme fréquentiel FFT de Vs(t)

- **Pour m=10 r=0.73**

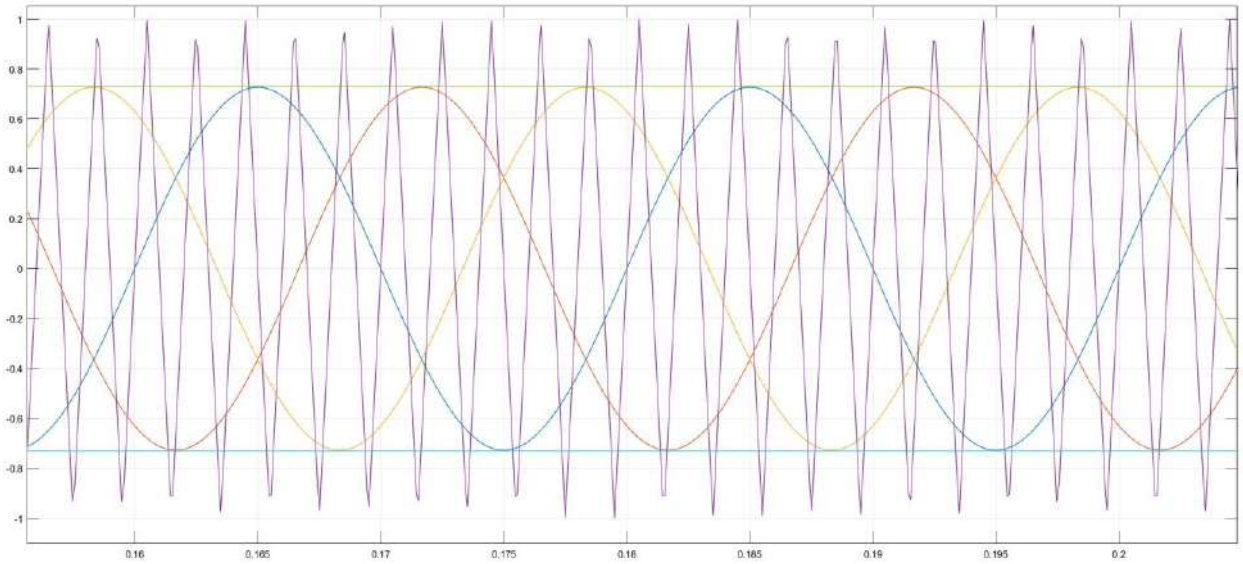


Fig (III.11) les références et la modulante avec l'enveloppe choisi

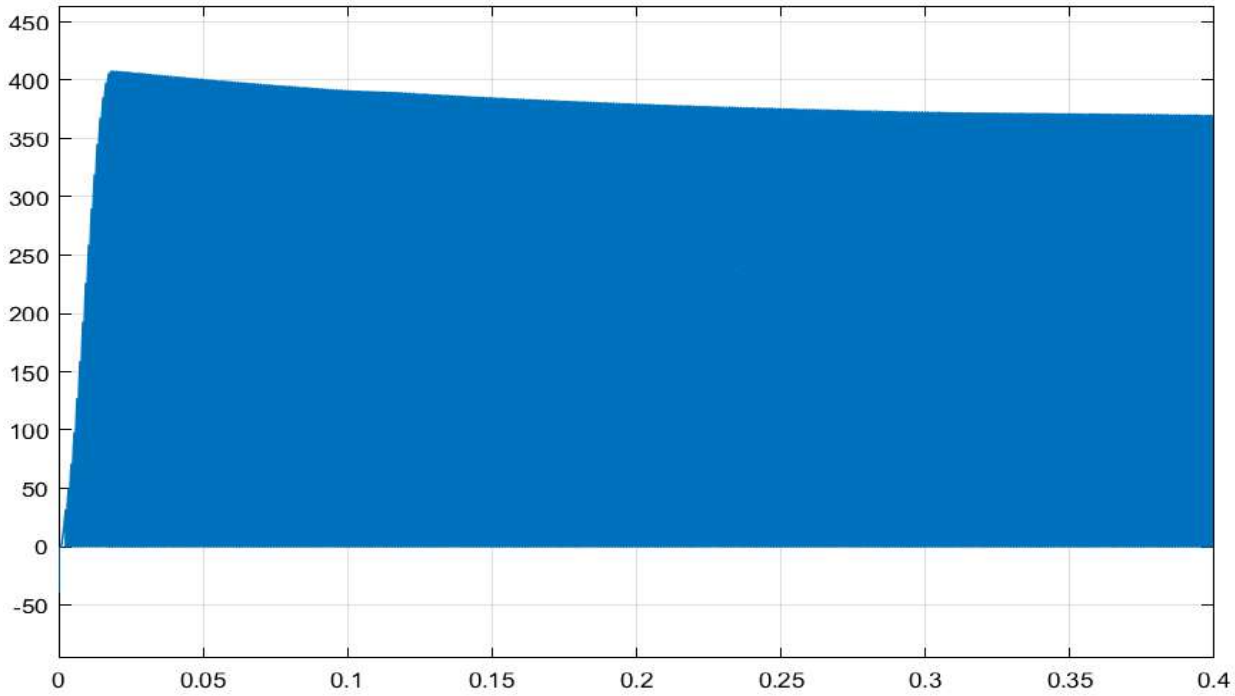


Fig (III.12) la tension de sortie de Z source V1(t)

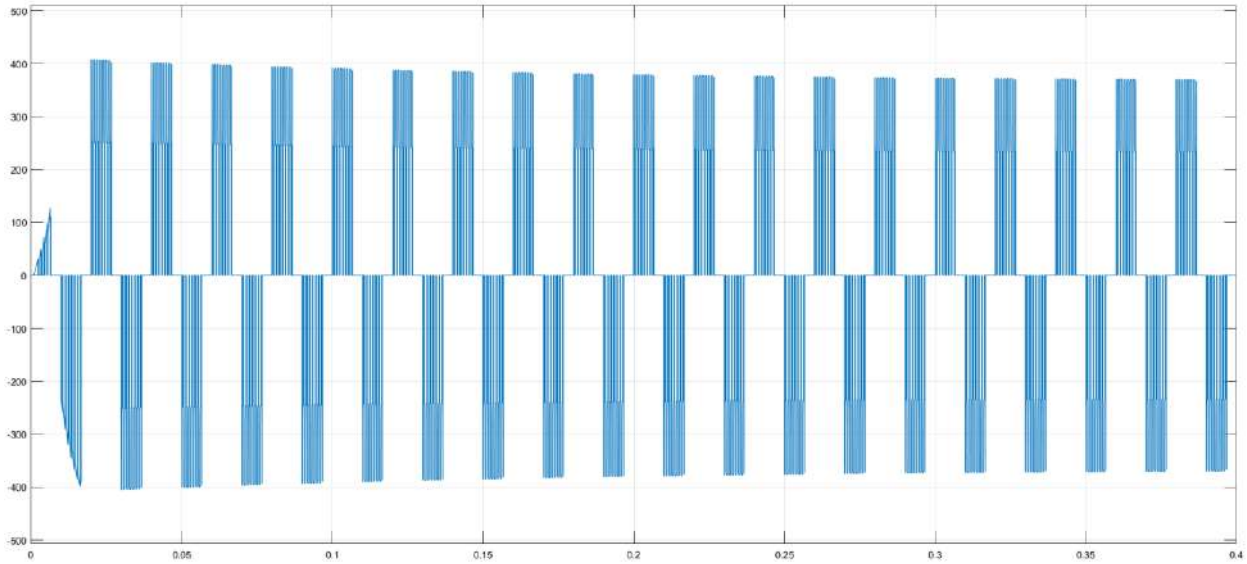


Fig (III.13) la tension de sortie de l'onduleur Vs(t)

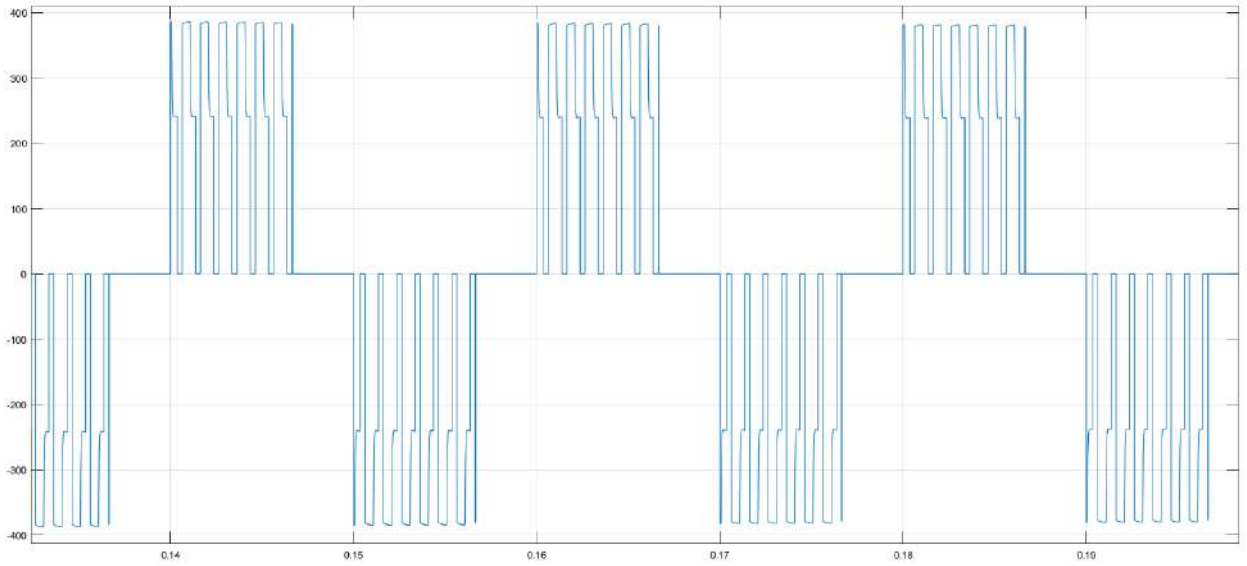


Fig (III.14) Zoom de la tension de sortie de l'onduleur Vs(t)

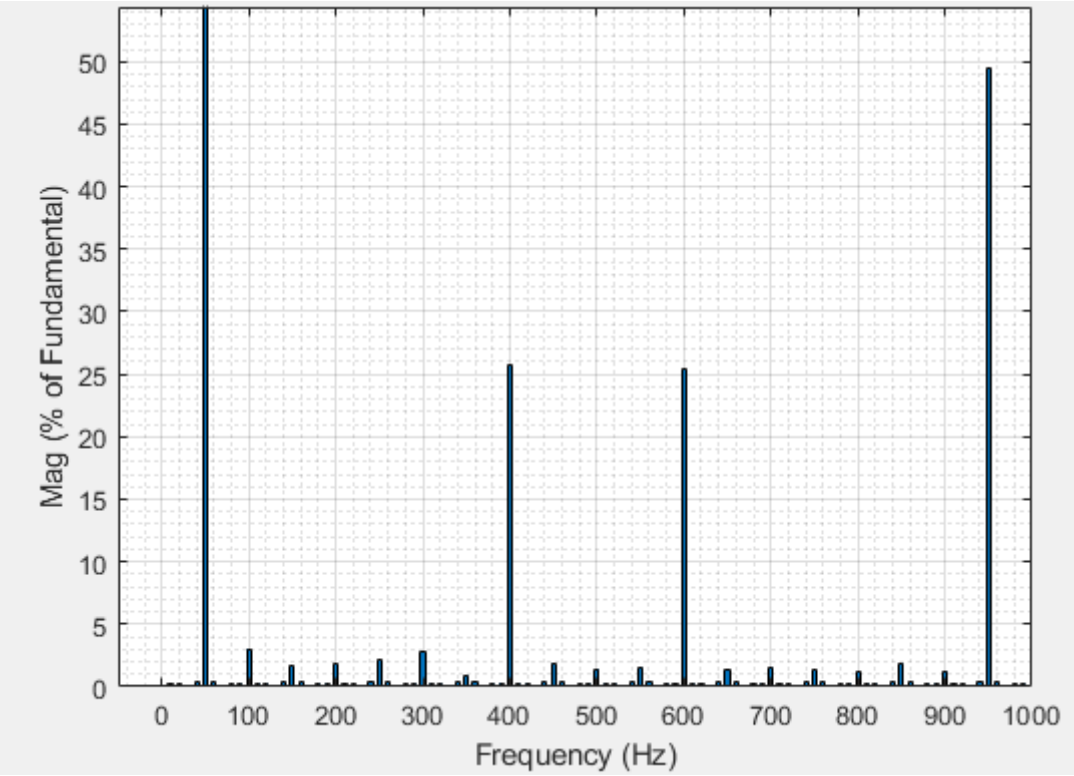


Fig (III.15) diagramme fréquentiel FFT de Vs(t)

- **Pour m=15 r=0.73**



Fig (III.16) les références et la modulante avec l'enveloppe choisi

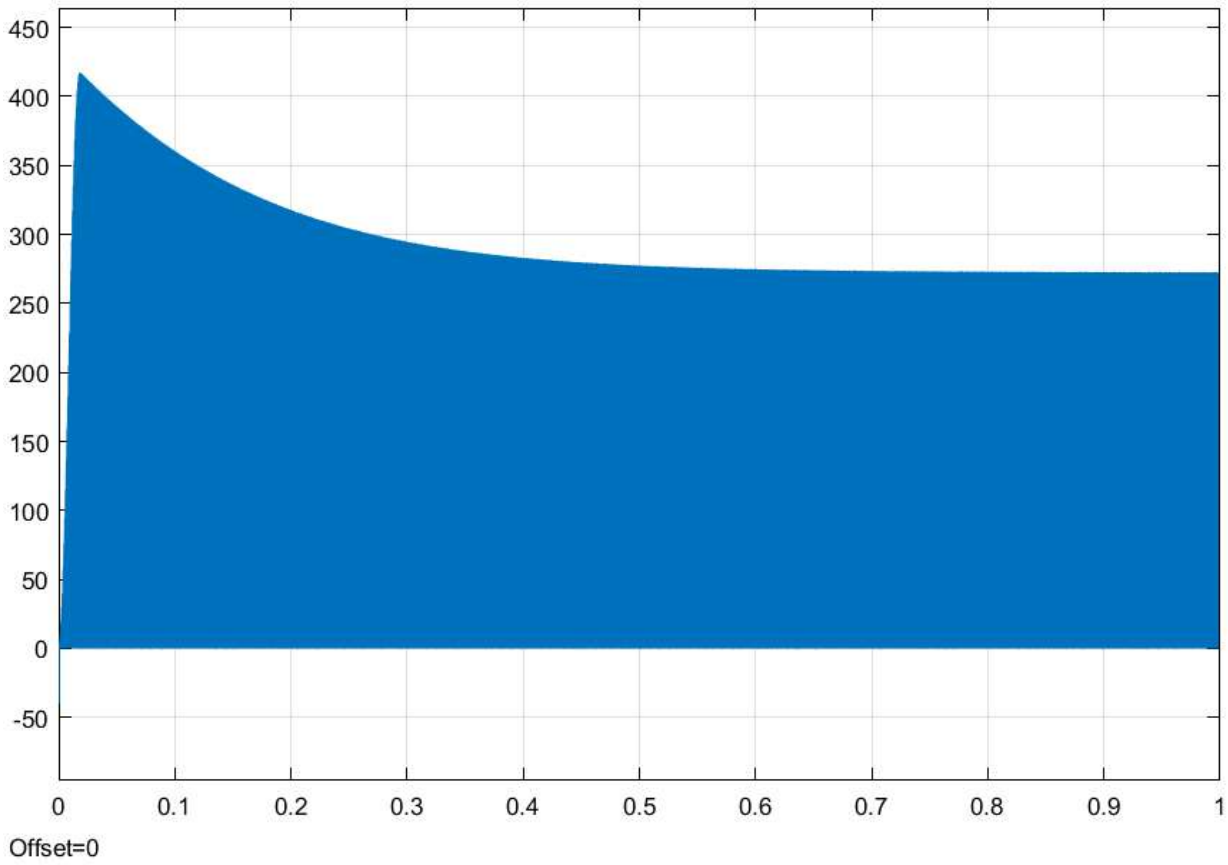


Fig (III.17) la tension de sortie de Z source V1(t)

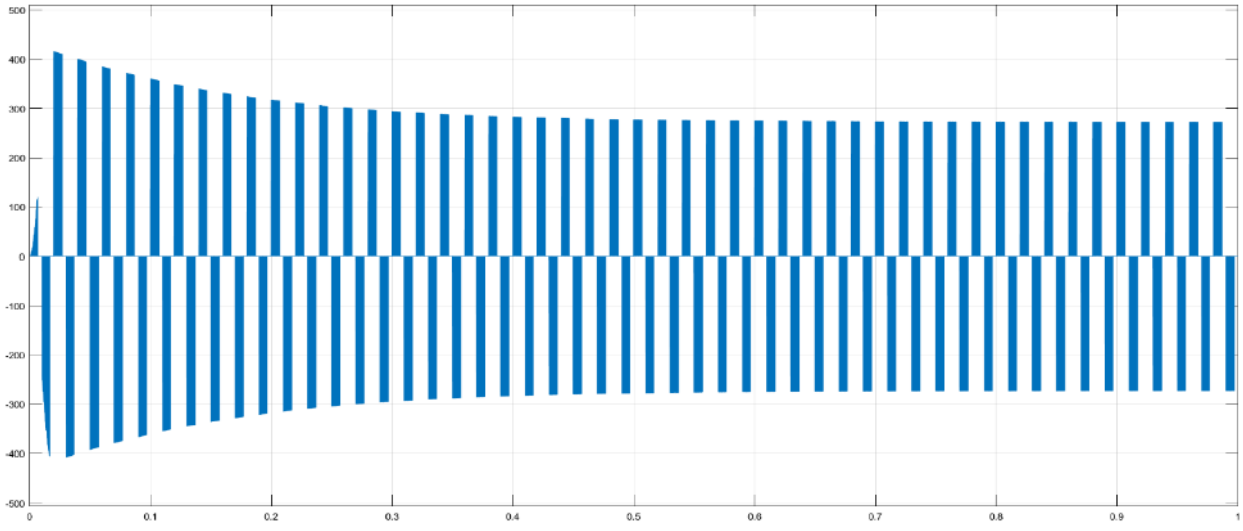


Fig (III.18) la tension de sortie de l'onduleur Vs(t)

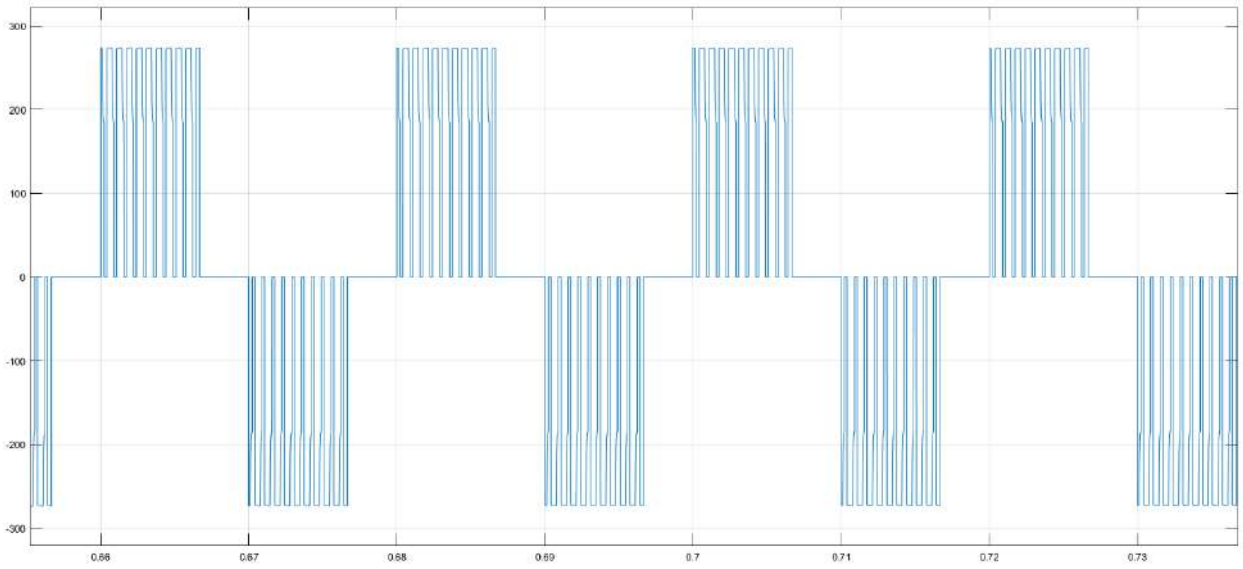


Fig (III.19) Zoom de la tension de sortie de l'onduleur Vs(t)

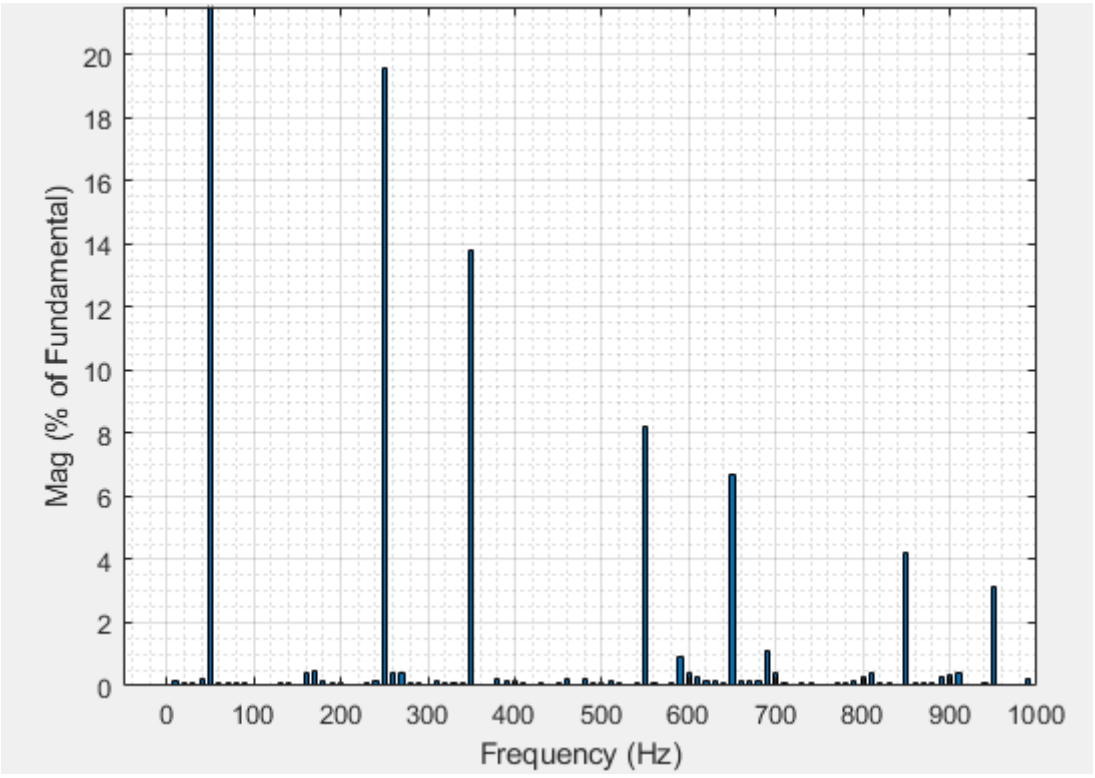


Fig (III.20) diagramme fréquentiel FFT de Vs(t)

III.4.2 Interprétation des résultats :

- ✓ La modulation MLI et avec l'augmentation de l'indice de modulation m permet de pousser les harmoniques vers les fréquences élevées et donc facilement filtrées par la charge(moteur) ce qui implique la qualité de la tension délivrée Vs.

- ✓ Nous observons aussi que le z source fait son rôle de façon à amplifier (boost) la tension continue de 100v vers des valeurs plus élever selon les configurations et la variation de m et r.
- ✓ on augmentant l'enveloppe de 0.73 vers 1 Quand nous varions 0.8 vers 1 l'amplitude de bus continu V1 diminue(le temps de court-circuit diminue).

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'onduleurs a deux niveaux avec la stratégies de commande MLI .

Comme on a exploré la commande MLI de l'onduleur deux niveaux avec la technique SBC.

L'objectif de la commande MLI réside dans le décalage des harmoniques vers les fréquences les plus élevées ce qui facilite le filtrage.

La montée en puissance et l'amplification de bus continue à l'aide de z source a donné des bons résultats (une tension alternative en sortie) toutes en diminuant le nombre des interrupteurs ainsi leurs commutations.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce travail nous avons fait l'étude de la modélisation d'une chaine photovoltaïque qui se compose d'un générateur PV, un étage d'adaptation (convertisseur DC /DC), une charge et un étage de commande pour piloter le convertisseur par la commande MPPT classique P&O.

Dans le deuxième chapitre, nous avons analysé le fonctionnement de z source en établissant les équations de sortie Buck est boost suivant le rapport cyclique de la durée de court-circuit, ce dernier permet d'avoir en sortie des tensions continue amplifiées.

Les onduleurs à deux niveaux se sont l'objectif de la troisième partie où nous avons modélisé et appliqué les techniques de commande de MLI (MLI sinusoïdal), et nous avons exposé la simulation sous Matlab/Simulink de l'ensemble 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).
- 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 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 système 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.

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude de l'onduleur a z source des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire, l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique et la commandes MPPT classique.

perspective à ce travail, il serait intéressant de procéder à l'implémentation matérielle des de l'onduleur a deux niveau a z source ainsi d'introduire la techniques MPPT .

Bibliographie :

[1] : BENSACI Wafa « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Thème de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla 2012.

[2] : MECHALIKH M.Nadjib,HAMADA Charaf Eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » Thème de Magister, Université KASDI MERBAH – OUARGLA 2013.

[3] : Mr.MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN 2012.

[4] : M_{elle} NAKOUL Zakia « Optimisation d'une centrale solaire a base d'un générateur pv[Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah] » Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN 2010.

[5] : M. SLAMA Fateh « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » Thème de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF.

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

[7] : F.Z. Peng. « Z-source inverter ». In 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference, volume 2, pages 775 –781 vol.2, oct. 2002

[8] : François Gruson1, Arnaud Videt1, Philippe Le Moigne1, Philippe Delarue2, Philippe Baudesson3, Jacques Ecrabey4 , « Intérêt de la structure onduleur Zsource », L2EP-Ecole Centrale de Lille, Cité Scientifique – BP 48, 59651 Villeneuved'Ascq cedex, L2EP-U.S.T.L. bât. P2, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq,Schneider Toshiba Inverter Europe, 33 rue Blanchet, 27120 Pacy-sur-Eure,Schneider Electric, Site 38 Tec Rue Henri Tarze, 38000 Grenoble,

[9] : S. Kido et al., 'High Performance UPS System Employing Microcomputer – Based Control', IEEE INTELE'91, 1991.

[10] : BENZIADA .Mohamed Abdelghani, OUAIL Mohamed. « Utilisation du convertisseur Z-source dans un système photovoltaïque », thèse d'ingénieur d'État en Électrotechnique, juin 2015 à l'ENP

[11] : Jin LI, Jinjun LIU, Zeng LIU, "Loss Oriented Evaluation and Comparison of Z-Source Inverters Using Différent Puise Width Modulation Stratégies",
IEEE Applied Power Electronics Conférence and Exposition, pp. 851 -856,
2009.

[12] : Byamakesh .Nayak ,Saswati.Swapna Dash , « perfermance analyse of different control strategies in a Z-source inverter », article, YMCA university of science et tech , india ,