



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة -

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGÉNIERIE - ANNABA

Département d'Électronique, d'Électrotechnique et Automatique

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Science et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

Présenté par

Youcef Mehdi GHERSALLAH

Nacef Moulla

ETUDE D'UN ONDULEUR Z-SOURCE POUR UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Encadré par

Dr. Tarek MESSIKH

ENSTI Annaba

Co-Encadré

Dr. Mohamed ROUAMEL

ENSTI Annaba

Membres du jury :

Pr. Mourad HOUABES

Président

ENSTI-Annaba

Dr. Soumaya BENNEDJAI

Examineur

ENSTI -Annaba

Dr. Sofiane CHIHEB

Examineur

ENSTI -Annaba

Année 2025

Dédicace

À Celui par qui tout commence et vers qui tout retourne,
à Allah, source de lumière pour les cœurs en quête et refuge pour les âmes épuisées. C'est en
Lui que j'ai trouvé la force et la foi d'avancer quand mes pas faiblissaient, et c'est par Sa
sagesse que l'effort a trouvé un sens.

À mes parents,
pour leur amour inconditionnel tissé de patience et leur présence faite de prières muettes.
À la compassion maternelle d'un cœur pur, et au soutien paternel d'un soldat de l'ombre, qui
m'ont bercé dans le silence et la force, et m'ont transmis, par le simple fait d'exister en moi à
travers mes principes et mes valeurs, le ressenti prodigieux d'être, pour eux, une source de
fierté. Qu'Allah vous accorde santé, sérénité et élévation ici-bas comme dans l'au-delà.

À mes frangins de sang et par le vécu,
qui incarnent, par leur simple présence, les plus belles âmes que la terre ait portées,
La force soufflante sur les nuages passants, Les néons de mes néants.

Et enfin...

À ceux dont la voix s'est tue mais dont l'écho habite encore nos silences,
à ceux qui, malgré l'absence, continuent de vivre dans nos cœurs et nos souvenirs.
Que Le Très-Haut fasse de leur repos une lumière,
de leur tombe un jardin de paix,
et de nos efforts ici-bas, une invocation silencieuse en leur nom.

Youcef.M

Dédicace

À ma très chère maman, à mon père et à ma grand-mère, que je remercie infiniment pour leur soutien et leurs conseils tout au long de mes études.

À ma sœur et à mes frères, avec tous mes vœux de succès dans leur vie.

À toute ma famille, de près ou de loin.

À tous mes amis, en leur souhaitant plein de réussite.

À toutes les personnes qui me sont chères, je dédie ce modeste travail.

Que la paix d'Allah soit avec vous tous.

Nacef

Remerciement

Tout d'abord, nous rendons gloire à Allah, Le Tout-Puissant, qui nous a guidés tout au long de notre parcours. C'est par Ses bénédictions, Sa foi et la patience qu'Il nous a accordées que nous avons pu atteindre ce stade de notre cheminement.

Nous adressons notre profonde reconnaissance à nos encadrants, Messieurs Tarek MESIKH et Mohamed ROUAMEL, pour leur accompagnement éclairé, leur patience et la richesse de leurs conseils, qui ont largement contribué à la réussite de ce projet.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département EEA de l'ENSTI, notamment aux membres du prestigieux jury, dont l'exigence et la passion ont nourri notre curiosité et renforcé nos connaissances.

Enfin, nous exprimons toute notre gratitude à nos proches, dont le soutien discret mais constant a été un pilier essentiel tout au long de ce parcours.

Résumé

L'objectif principal de ce projet est d'étudier le comportement d'un système photovoltaïque commandé par un onduleur à structure Z-source, et d'évaluer ses performances à l'aide de simulations. Après une présentation de l'état de l'art sur les énergies renouvelables et les systèmes de conversion associés, une chaîne de conversion PV a été simulée en intégrant un algorithme MPPT de type Incrémental Conductance (IC), afin d'optimiser l'extraction de puissance.

La commande de l'onduleur Z-source a ensuite été étudiée, notamment par l'introduction de l'état shoot-through dans la modulation MLI. Les méthodes d'injection de cet état et les techniques de survoltage ont été mises en œuvre pour exploiter pleinement les caractéristiques de la topologie Z-source.

Enfin, une comparaison des performances a été réalisée entre la structure Z-source et un système photovoltaïque conventionnel, sur la base des résultats obtenus par simulation.

Mots-clés : Z-source, système photovoltaïque, Incrémental Conductance (IC), MPPT, shoot-through, survoltage.

المخلص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو دراسة سلوك نظام كهروضوئي يتم التحكم فيه بواسطة عاكس من نوع Z-Source، وتقييم أدائه من خلال المحاكاة. تم تقديم لمحة عن الحالة الراهنة للتقنيات الحديثة في مجال الطاقات المتجددة وأنظمة التحويل المرتبطة بها. بعد ذلك، تم محاكاة سلسلة التحويل الكهروضوئية باستخدام خوارزمية MPPT من نوع التوصيلية التزايدية (IC) بهدف تحسين استخراج الطاقة.

تمت دراسة التحكم في العاكس Z-Source، لا سيما من خلال إدخال حالة "Shoot-Through" في تضمين عرض النبضة التقليدي (PWM). وقد تم تطبيق تقنيات إدراج هذه الحالة وأساليب الرفع للاستفادة الكاملة من خصائص هذه البنية.

وفي النهاية، تم إجراء مقارنة في الأداء بين بنية Z-Source والنظام الكهروضوئي التقليدي، وذلك بالاعتماد على نتائج المحاكاة.

الكلمات المفتاحية: Z-Source، النظام الكهروضوئي، التوصيلية التزايدية، Shoot-through، MPPT، تقنيات الرفع.

Abstract

The main objective of this project is to study the behavior of a photovoltaic system controlled by a Z-source inverter, and to evaluate its performance through simulation. After presenting the state of the art on renewable energies and associated power conversion systems, a PV conversion chain was simulated using the Incremental Conductance (IC) MPPT algorithm to optimize power extraction.

The control of the Z-source inverter was then addressed, focusing on the implementation of the shoot-through state in PWM modulation. Techniques for inserting this state and applying boosting methods were used to exploit the full potential of the Z-source topology.

Finally, a performance comparison was carried out between the Z-source structure and a conventional PV system, based on simulation results.

Keywords: Z-source, photovoltaic system, Incremental Conductance (IC), MPPT, shoot-through, boosting method.

Table des matières

Dédicace	ii
Remerciement	iv
Resumé	v
Table des figures	ix
Liste des tableaux	xi
1 Motivation et Problématique	1
1.1 Les énergies renouvelables	1
1.2 Solaire photovoltaïque	1
1.3 Problèmes liés à la conversion de puissance dans les systèmes photovoltaïques	2
1.4 Motivation	2
1.5 Problématique	2
2 Etat de l’art	4
2.1 Principe de conversion photovoltaïque	4
2.2 Comportement électrique des panneaux photovoltaïques	5
2.3 Technique de suivi MPPT	6
2.3.1 Définition	6
2.3.2 Méthode de poursuite du point de puissance maximale	6
2.4 Les convertisseurs traditionnels	7
2.4.1 Hacheur dévolteur (buck)	7
2.4.2 Hacheur survolteur (hacheur BOOST)	8
2.4.3 Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)	8

2.5	Un onduleur à deux étage	8
2.6	Convertisseur Z source	9
2.7	Topologies de convertisseur Z source	9
2.7.1	Z-Source Inverter (ZSI)	9
2.7.2	Quasi Z-Source Inverter (qZSI)	10
2.7.3	Switched-Inductor ZSI (SL-ZSI)	10
2.7.4	T-Source Inverter (TSI)	10
2.7.5	Onduleur Trans-Z-Source	10
2.7.6	Onduleur Multilevel Z-Source	10
2.8	Avantages du convertisseur Z-Source PV	10
2.9	Tableau comparatif des convertisseurs PV :	11
2.10	Application des convertisseurs Z-Source PV	11
2.10.1	Système autonome	11
2.10.2	Systèmes raccordés au réseau	12
3	Simulation d'un système photovoltaïque raccordé aux réseau	13
3.1	Simulation par onduleur Z-source	14
3.1.1	L'étage Boost	16
3.1.1.1	La puissance P_{dc}	16
3.1.1.2	La tension continu du Boost $V_{dc_{boost}}$	17
3.1.1.3	Le rapport cyclique	18
3.1.1.4	Le rendement	18
3.1.1.5	La tension de sortie V_{ac}	19
3.2	Simulation par onduleur conventionnel	20
3.2.1	Relation entre la tension de sortie et l'indice de modulation	20
3.2.2	L'étage Boost	21
3.2.2.1	La puissance P_{dc}	21
3.2.2.2	La tension continu du Boost $V_{dc_{boost}}$	22
3.2.2.3	Le rendement	22
3.2.2.4	La tension de sortie V_{ac}	22
3.2.3	Conclusion	23
3.3	CONCLUSION GENERALE	25

Bibliographie

28

Table des figures

2.1	Principe de Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [15]	5
2.2	Caractéristique I-U et P-U [14]	5
2.3	Chaîne de conversion solaire Comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur Boost, Une commande MPPT et une charge	6
2.4	Schéma d'un convertisseur dévolteur [3]	7
2.5	Schéma d'un convertisseur survolteur [1]	8
2.6	Schéma d'un convertisseur dévolteur-survolteur [1]	8
2.7	Schéma simple de l'onduleur Z-source [1]	9
3.1	Schéma bloc simulation MATLAB	13
3.2	Vdc à l'entrée de l'onduleur	14
3.3	Vpv et Ipv	14
3.4	Vac et Iac	15
3.5	Irradiance perturbée	15
3.6	Vdc à l'entrée de l'onduleur	16
3.7	Boost ZSI	16
3.8	Ipv et Vpv ZSI	17
3.9	Temps de réponse ZSI	18
3.10	Vac ZSI avant filtre	19
3.11	Vac ZSI après filtre	20
3.12	Vdc à l'entrée de l'onduleur	20
3.13	Boost Onduleur	21
3.14	Ipv et Vpv Onduleur	22
3.15	Temps de réponse Onduleur	22
3.16	Vac Onduleur avant filtre	23

3.17 Vac Onduleur après filtre	23
--	----

Liste des tableaux

2.1	Tableau comparatif des convertisseurs PV	11
-----	--	----

Chapitre 1

Motivation et Problématique

1.1 Les énergies renouvelables

L'utilisation d'énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique) remonte à l'Antiquité avant de régresser en lien avec le faible coût des énergies fossiles au moment de la Révolution industrielle. Mais, face à l'augmentation du prix des fossiles et des problèmes environnementaux, ces sources d'énergies connaissent aujourd'hui un regain d'intérêt. Ces énergies renouvelables sont en effet inépuisables, propres et peuvent être exploitées localement, tout en s'associant selon les conditions climatiques.

1.2 Solaire photovoltaïque

La méthode de production de l'énergie solaire la plus simple est la conversion photovoltaïque qui consiste, au sein de cellules photovoltaïques intégrées dans des modules photovoltaïques à silicium dopé, à transformer la lumière du soleil en courant photovoltaïque. Les intensités comprises entre 2 et 4 A à une tension de 0,46 à 0,48 V de chaque cellule permettent de créer un courant en utilisant les rayonnements directs comme diffus, expliquant ainsi son bon fonctionnement même en cas de temps nuageux. Les cellules, câblées en série à l'intérieur de panneaux solaires, ont pour but de réaliser une tension suffisante liée ensuite à un courant continu, qui est par ailleurs stocké dans des accumulateurs pour consommation ultérieure [4].

1.3 Problèmes liés à la conversion de puissance dans les systèmes photovoltaïques

La conversion de l'énergie électrique dans les systèmes de photovoltaïques génère des défis technologiques importants, entre autres, le rendement total, la gestion des variations de l'ensoleillement, le maximum power point tracking (MPPT) et la qualité de l'énergie fournie au réseau. Les convertisseurs devront s'adapter rapidement aux changements de l'irradiance solaire, tout en conservant une bonne efficacité, parfois entachée par le découpage, la température des composants, ou les harmoniques, qui peuvent nuire à la pérennité du système [6].

1.4 Motivation

L'emploi de convertisseurs Z-Source au sein de systèmes photovoltaïques raccordés au réseau s'apparente par là même à une alternative innovante et performante à celle des convertisseurs classiques qu'ils soient buck ou boost ou buck-boost. En effet, alors que le fonctionnement des structures conventionnelles requiert un convertisseur pour élever la tension d'entrée et un autre pour la diminuer, le convertisseur Z-Source lui, permet d'élever soit de diminuer soit de stabiliser la tension à l'aide d'une seule topologie. En outre, cette topologie présente l'avantage de tolérer les situations de court-circuit (shoot-through) sans dommages pour ses composants, réduisant ainsi le besoin en étages de conversion multiples, en simplifiant la structure globale et en augmentant la fiabilité de l'ensemble. En effet, cet ensemble de caractéristiques permettant d'atteindre d'une meilleure efficacité énergétique ainsi qu'une meilleure immunité contre les perturbations est idéal pour réduire les coûts de composants connexes, en plus de sa capacité à s'adapter aux variations d'ensoleillement. Par conséquent, les convertisseurs Z-Source apparaissent comme les plus adaptés pour l'alimentation des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, pour lesquelles stabilités et performance sont des facteurs essentiels.

1.5 Problématique

Les systèmes photovoltaïques qui sont raccordés au réseau électrique ou au réseau de distribution électrique doivent être équipés de convertisseurs assurant la fois l'adaptation de la tension et la conversion du courant continu en courant alternatif. Les convertisseurs traditionnels

sous forme de structures à deux étages, de type boost + onduleur, sont limités en termes de rendement, de complexité de commande, de coût. . . Le convertisseur Z-Source est régulièrement cité dans la littérature comme une alternative capable de réaliser l'élévation de tension et l'inversion en une seule étape, de bénéficier d'une immunité au court-circuit shoot-through, etc. Cet outil novateur pourrait encourager le développement des applications d'injection d'énergie solaire en réseau, compte tenu de sa structure plus compacte, de sa fiabilité, de sa capacité à assurer la qualité de puissance exigée par la norme, etc. De quelle manière l'intégration des convertisseurs Z-Source dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau peut-elle améliorer la performance énergétique, la fiabilité et la simplification de l'architecture, tout en répondant aux exigences de qualité de l'énergie injectée au réseau électrique ?

Chapitre 2

Etat de l'art

2.1 Principe de conversion photovoltaïque

Le principe de conversion photovoltaïque utilise l'effet photoélectrique qui désigne la faculté de certains matériaux dits semi-conducteurs (tels que le silicium) de convertir en électricité une partie de l'énergie lumineuse qu'ils reçoivent. Lorsqu'un photon ayant une certaine énergie émise par le rayonnement solaire vient frapper la surface d'une cellule photovoltaïque, il peut transmettre son énergie à un électron dans la bande de valence du semi-conducteur ; si l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite (gap) du matériau, l'électron est excité dans la bande de conduction, laissant derrière lui un « trou » dans la bande de valence. Ce couple électron-trou peut ensuite être séparé par le champ électrique présent dans la jonction PN de la cellule, produisant ainsi un courant (si un circuit extérieur est établi). Le rendement de cette conversion (mesuré comme une fraction de l'énergie reçue par rapport à l'énergie fournie par le circuit extérieur) dépend de plusieurs paramètres : la nature du matériau, l'intensité et la longueur d'onde du rayonnement, la température, et les pertes dues à la réflexion ou à la recombinaison. Le rendement des cellules classiques en silicium cristallin est généralement compris entre 15 % et 22 des nouvelles techniques telles que les cellules à hétérojonction, les cellules multi-jonctions et les cellules pérovskites offrent sans cesse de meilleures performances. Il est le fondement du développement des énergies renouvelables et de la transition énergétique présente [7] [9] [11].

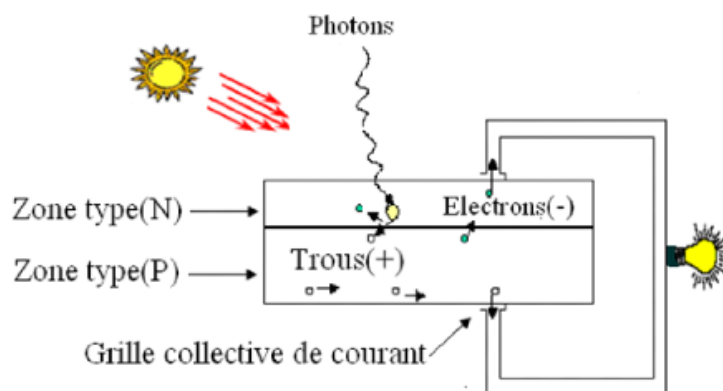


FIGURE 2.1 – Principe de Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [15]

2.2 Comportement électrique des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques sont des dispositifs de conversion de la lumière en électricité, permettant de transformer la lumière en électricité sous la forme de l'effet photovoltaïque via des cellules au silicium. Chaque cellule produit une tension d'environ 0,5 à 0,6 V. Les cellules photovoltaïques sont rarement utilisées individuellement mais plutôt interconnectées en série et/ou en parallèle afin de se placer au besoin, à la tension et au courant requis. Le courant de sortie des cellules photovoltaïques dépend d'un côté de l'irradiation lumineuse, de la température de la cellule, de la charge. La courbe I-V (courant-tension) d'un panneau est manifestement non linéaire, avec notamment un point de puissance maximale (MPP) optimisé par un régulateur MPPT. Ce comportement est modélisé par une équation diode incluant également des pertes internes [9].

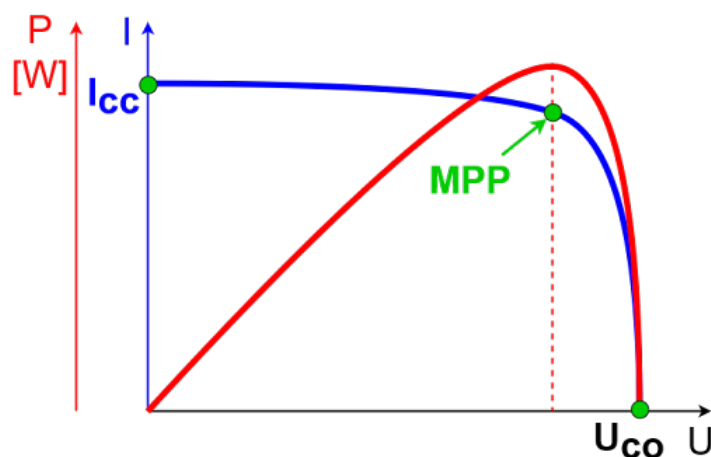


FIGURE 2.2 – Caractéristique I-U et P-U [14]

L'équation qui modélise le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque (modèle à une diode) est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

2.3 Technique de suivi MPPT

2.3.1 Définition La commande MPPT à l'aide d'un convertisseur d'adaptation permet de faire fonctionner le générateur photovoltaïque (GPV) en permanence à son point de puissance maximale (V_{ppm}, I_{ppm}) quelles que soient les conditions climatiques. Elle contribue à l'optimisation de la production énergétique, à l'aide d'un convertisseur statique piloté grâce à l'algorithme MPPT. Méthode mise en œuvre depuis 1968 pour le secteur spatial, la MPPT a donné lieu à de nombreuses méthodes différentes en termes de complexité, rapidité, coût, fiabilité et capteurs [14].

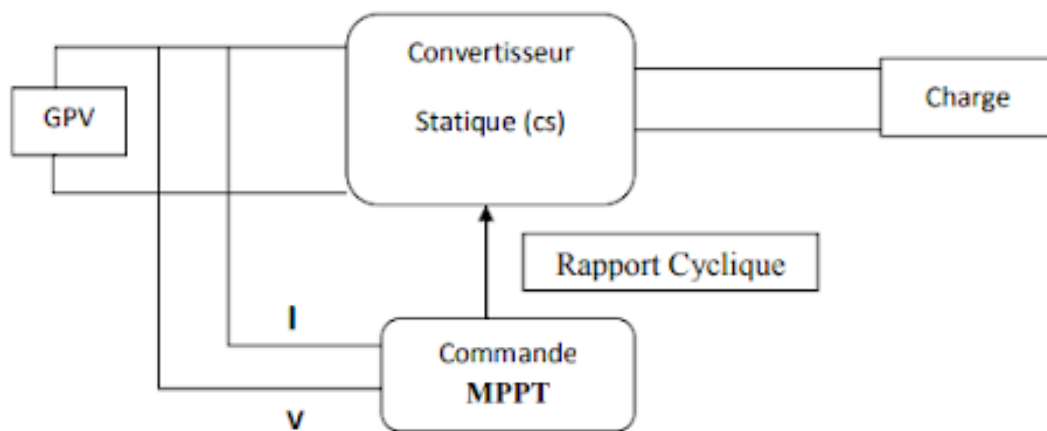


FIGURE 2.3 – Chaîne de conversion solaire Comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur Boost, Une commande MPPT et une charge

2.3.2 Méthode de poursuite du point de puissance maximale Il existe plusieurs types de méthodes classiques et modernes du suivi du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque, parmi lesquelles on peut citer :

- la méthode de Perturbation et Observation (P&O) : Le principe de cet algorithme est de provoquer une perturbation en agissant (diminution ou augmentation) sur le rapport cyclique de la commande MLI et l'observation de l'effet sur la puissance de système PV. Si la puissance

augmente, on poursuit dans le même sens ; sinon, on inverse la perturbation dans le sens opposé et ainsi de suite. Elles sont efficaces mais peuvent entraîner des oscillations autour du point optimal [2].

- la méthode de Conductance Incrémentale (IC) : La technique de la conductance incrémentale consiste à rechercher le point de puissance maximale (MPP) d'un panneau photovoltaïque par la comparaison entre la conductance instantanée

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (2.2)$$

et la conductance incrémentale

$$G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (2.3)$$

Le point de puissance maximale est atteint lorsque la somme des deux est nulle $G+G=0$ [8].

- la méthode de Logique Floue (FL) : Récemment, des régulateurs à logique floue ont été mis en œuvre pour exploiter le point de puissance maximale (PPM) dans les systèmes photovoltaïques. Ils ont l'avantage d'être robustes et demandent peu d'efforts de conception puisqu'un modèle mathématique agréé du système n'est pas nécessaire. Cependant, leur efficacité repose sur la bonne connaissance qu'a le concepteur du fonctionnement du système PV. En règle générale, la conception d'un tel régulateur se déroule en trois étapes principales : Fuzzification, Méthode d'inférence, Défuzzification [2].

2.4 Les convertisseurs traditionnels

2.4.1 Hacheur dévolteur (buck) Un convertisseur dévolteur, appelé également hacheur buck dans la littérature, ou hacheur série en général, est le convertisseur qui permet de réduire la valeur d'une tension continue. Son rôle consiste à abaisser la tension d'entrée pour obtenir une tension de sortie réduite [3].

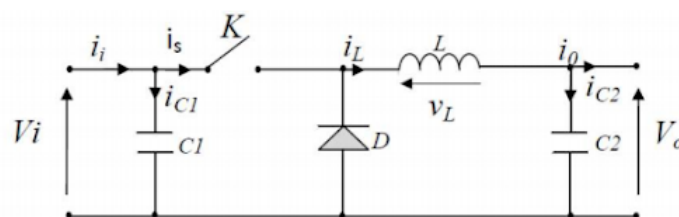


FIGURE 2.4 – Schéma d'un convertisseur dévolteur [3]

2.4.2 Hacheur survolteur (hacheur BOOST) On utilise un hacheur survolteur (ou hacheur BOOST) lorsque l'on souhaite élever la tension d'une source d'énergie continue. Ce convertisseur continu-continu de l'électronique de puissance est composé d'un ou plusieurs interrupteurs commandés à une fréquence suffisamment élevée pour générer une tension de sortie moyenne plus élevée que la tension d'entrée [1]

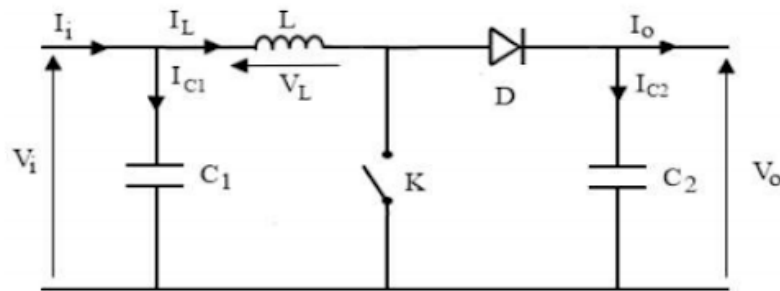


FIGURE 2.5 – Schéma d'un convertisseur survolteur [1]

2.4.3 Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) Est un convertisseur qui combine les fonctions du convertisseur Buck et de celui du convertisseur Boost pour fournir en sortie soit une tension inférieure soit une tension supérieure à la tension d'entrée selon le besoin [3].

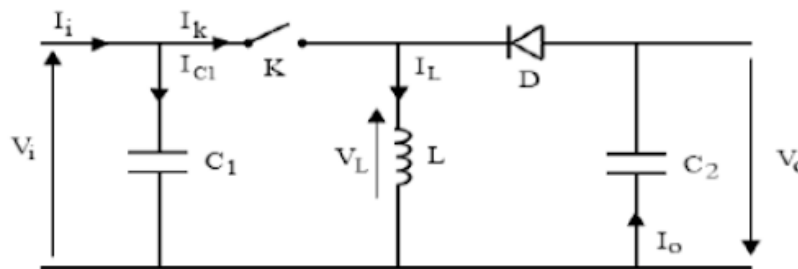


FIGURE 2.6 – Schéma d'un convertisseur dévolteur-survolteur [1]

2.5 Un onduleur à deux étage

(ou « two-stage inverter » en anglais) constitue une architecture de conversion de puissance à deux étapes. Le premier étage est un convertisseur continu-continu (DC-DC) qui lève ou abaisse la tension d'entrée afin de la faire correspondre à un niveau de tension d'une valeur nominale que l'on souhaiterait stabiliser. Le second étage est un convertisseur continu-alternatif (DC-AC), nommé onduleur, qui transforme la tension continue régulée en tension

alternative sinusoïdale. Cette configuration permet de mieux réguler la tension de sortie, avec un maximum de capacité de rendement, au service des conversions dans de nombreux systèmes tels que, par exemple, les installations photovoltaïques, les véhicules électriques ou encore les alimentations de secours (ASI) [5]

2.6 Convertisseur Z source

Le Z-source PV est une topologie de conversion de puissance avec un réseau d'impédance de type Z entre la source photovoltaïque (PV) et l'onduleur. Contrairement aux convertisseurs classiques de type Buck, Boost ou Buck-Boost, cette configuration permet à la fois de monter et de descendre la tension dans un seul étage de conversion et présente une meilleure immunité aux défauts de court-circuit, touchant les interrupteurs. Le réseau Z est constitué de deux inductances et deux condensateurs croisés, son architecture symétrique permet une fonction boost sans le besoin d'un convertisseur DC-DC dédié. En fonctionnement, le Z-source PV est en mode shoot-through, c'est-à-dire que les interrupteurs de l'onduleur sont temporairement court-circuités de façon contrôlée, ce qui serait fatal dans les onduleurs classiques. Ce mode permet d'accumuler l'énergie dans les éléments passifs du réseau Z et puis la restituer sous la forme d'une tension élevée suffisante pour alimenter la charge ou injecter l'énergie dans le réseau [12]

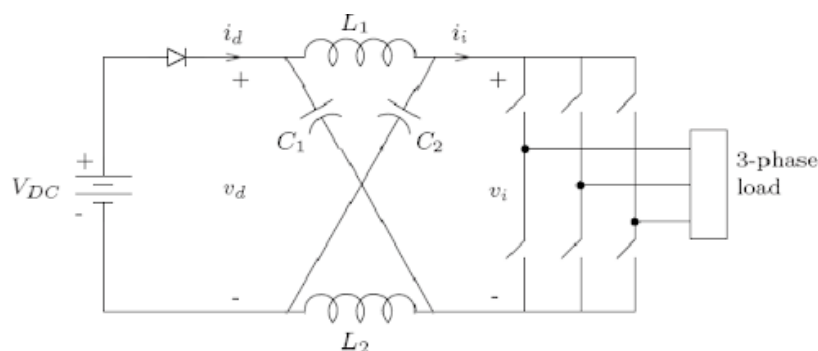


FIGURE 2.7 – Schéma simple de l'onduleur Z-source [1]

2.7 Topologies de convertisseur Z source

2.7.1 Z-Source Inverter (ZSI) Topologie de base utilisant un réseau d'impédance en « Z » (deux inductances et deux condensateurs croisés) permettant d'augmenter mais éga-

lement de réduire la tension dans un même étage de conversion et tolérant le mode shoot-through [10].

2.7.2 Quasi Z-Source Inverter (qZSI) Variante améliorée du ZSI avec une configuration apportant un chemin de courant continu reliant la source PV et l'onduleur, augmentant la fiabilité, réduisant l'ondulation de courant et assurant un démarrage progressif [10].

2.7.3 Switched-Inductor ZSI (SL-ZSI) Intègre des interrupteurs électroniques supplémentaires dans les branches inductives du réseau Z pour augmenter le gain de tension, cette topologie permet une élévation de tension supérieure, requise pour les systèmes PV à faible tension [10].

2.7.4 T-Source Inverter (TSI) Reconfigurant le réseau d'impédance en forme de « T », cette topologie réduit la taille des inductances utilisées et améliore la compacité du système tout en conservant les avantages du ZSI avec une structure allégée [10].

2.7.5 Onduleur Trans-Z-Source Ajoute au réseau Z un transformateur haute fréquence, apportant ainsi isolation galvanique et possibilité de conversion à haute tension. Utilisé pour des applications sous tension de réseau mais aussi pour les systèmes nécessitant une sécurité accrue [10].

2.7.6 Onduleur Multilevel Z-Source Allie le principe ZSI aux structures multi-niveaux (NPC, flying capacitors, etc.) pour améliorer la qualité de la tension de sortie, diminuer les pertes de commutation et mieux s'adapter aux systèmes PV de forte puissance [10].

2.8 Avantages du convertisseur Z-Source PV

Augmentation ou diminution de la tension après conversion dans une seule étape (sans convertisseur DC-DC séparé).

Tolérance au phénomène de shoot-through permettant un onduleur plus fiable.

Réduction du nombre de composants pour diminuer coût, encombrement et pertes.

Démarrage à basse tension utile en cas de faible luminosité.

Souplesse d'adaptation de la source PV pour garantir la production d'énergie même avec une source instable [12]

2.9 Tableau comparatif des convertisseurs PV :

Critère	Z-source Inverter	Onduleur à deux étages	Onduleur en pont complet
Nombre d'étages de conversions	Un seul	Deux	Un seul
Fonction boost intégrée	Oui (Via réseau Z)	Oui (Boost DC-DC)	Non
Mode shoot-through supporté	Oui	Non	Non
Complexité de commande	Moyenne	Elevée	Faible
Efficacité globale	Élevée	Moyenne (pertes sur deux étages)	Moyenne
Tolérance aux défauts de commutation	Bonne	Faible	Faible
Adaptabilité aux variations PV	Très Bonne	Moyenne	Excellente
Nombre de composants	Réduit	Plus élevé (DC-DC + Onduleur)	Faible

TABLE 2.1 – Tableau comparatif des convertisseurs PV

2.10 Application des convertisseurs Z-Source PV

2.10.1 Système autonome Les convertisseurs Z-Source PV sont parfaitement adaptés aux systèmes de type autonome par leur capacité à fixer la tension malgré les variations d'ensoleillement ; ils se distinguent par une structure simple capable d'élever ou d'abaisser la tension par une façon unique, assurant un bon fonctionnement même à faible irradiance, ce qui en fait un composant de choix pour des applications comme l'électrification rurale ou encore le pompage solaire [13]

2.10.2 Systèmes raccordés au réseau les convertisseurs Z-Source présentent une architecture plus simple, car ils intègrent directement la fonction d'élévation de tension dans l'onduleur, ce qui permet de réduire le nombre de composants, tout en favorisant l'injection de l'énergie solaire dans le réseau électrique. Avec leur fonctionnement tolérant au shoot-through, leur fiabilité est renforcée et leur capacité à gérer les transitoires contribue à une meilleure qualité de la puissance injectée [13]

Chapitre 3

Simulation d'un système photovoltaïque raccordé aux réseau

INTRODUCTION

Notre système photovoltaïque est composé de 66 string en parallèle chacun porte 5 panneaux en série et chaque panneau génère 305 Wc équipé d'un hacheur Boost et contrôlé par une technologie MPPT utilisant l'algorithme de la conductance incrémentale (IC).

Il est renforcé par un système de stockage et raccordé à un réseau électrique de distribution.

On va insérer un échantillon d'irradiance perturbé pour analyser le comportement des deux types des onduleurs le premier et conventionnel et le deuxième Z-Source fac aux changements et perturbation inhabituels qui peuvent survenir en cas d'ombrage ou n'importe quelle condition entravant de l'exploitation de l'énergie solaire vers nos panneaux.

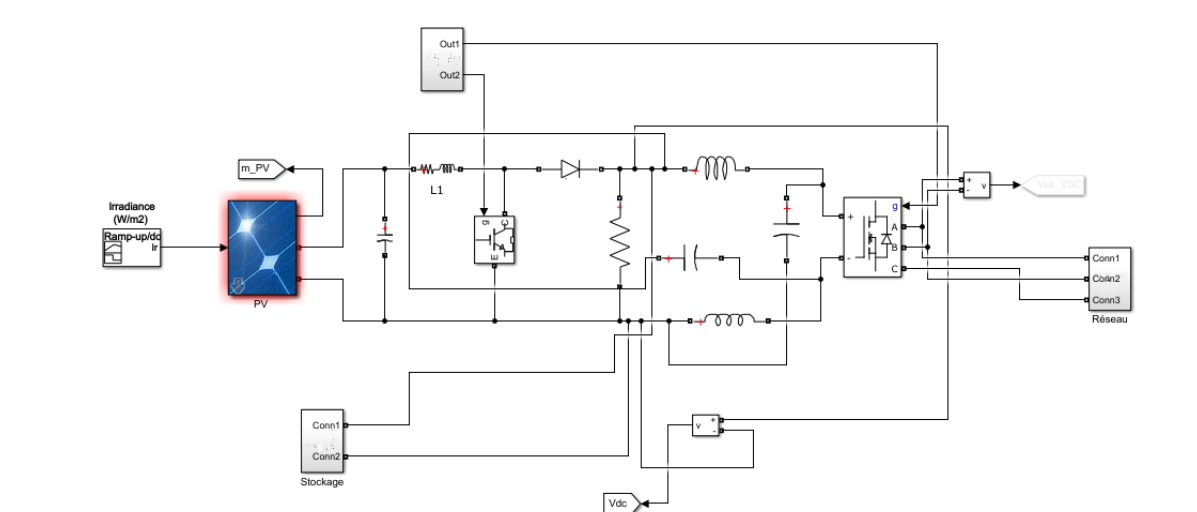


FIGURE 3.1 – Schéma bloc simulation MATLAB

3.1 Simulation par onduleur Z-source

En appliquant une irradiance fixe on obtient les résultats suivants au coté DC :

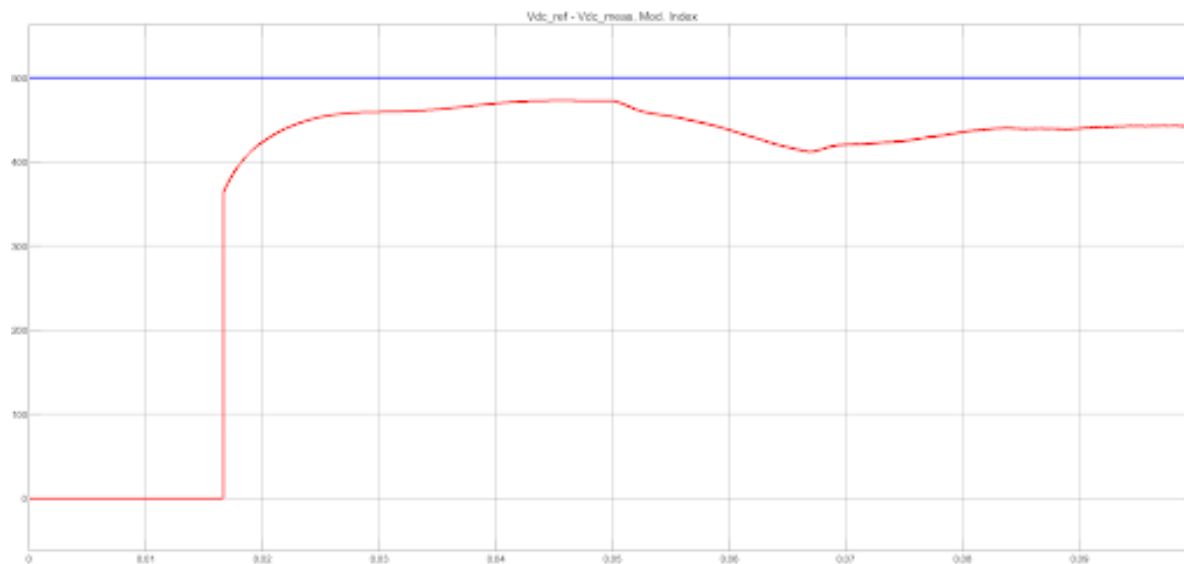


FIGURE 3.2 – Vdc à l'entrée de l'onduleur

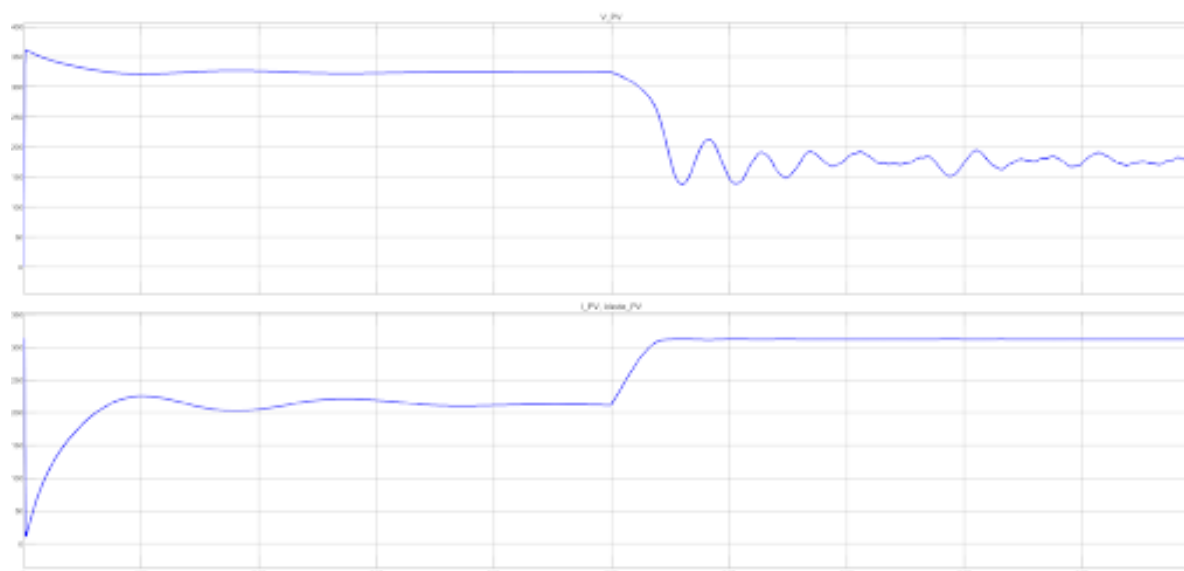


FIGURE 3.3 – Vpv et Ipv

Au coté AC on obtient les résultats suivants :

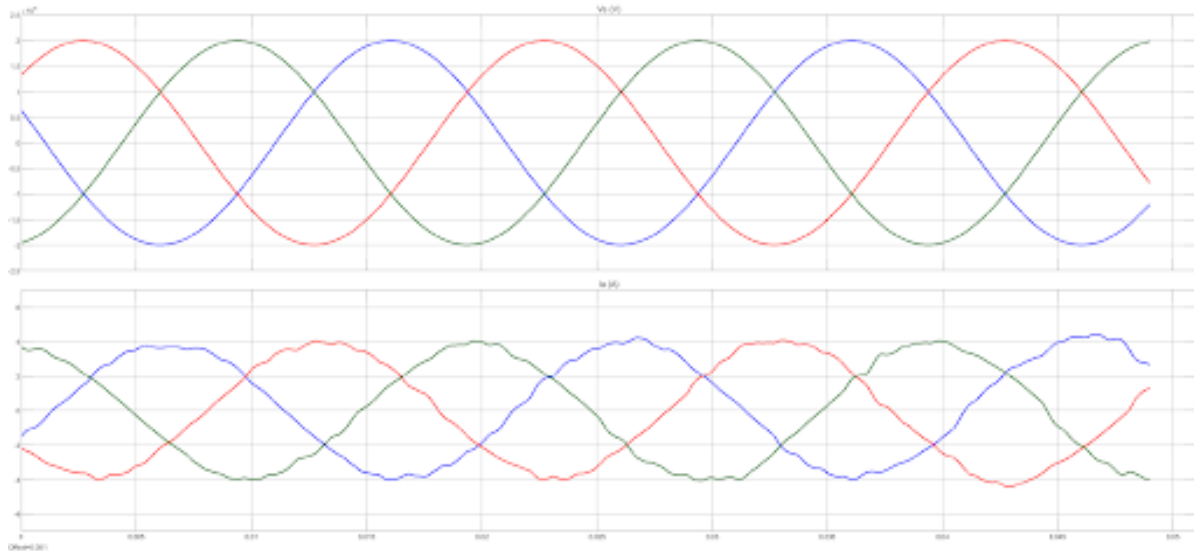


FIGURE 3.4 – Vac et Iac

En appliquant une irradiance perturbée on cherche à examiner l'efficacité de ce type d'onduleur

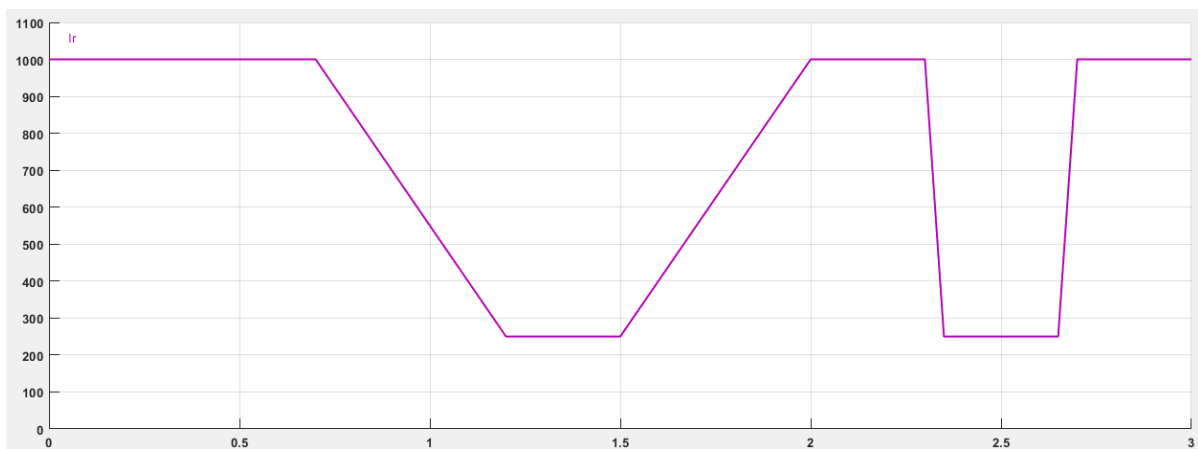


FIGURE 3.5 – Irradiance perturbée

La tension continue Vdc La valeur théorique :

$$V_{dc} = N_s \cdot V_{pv} \quad (3.1)$$

$$V_{dc} = 5 \cdot 64.2 = 321 \text{ V}$$

La valeur moyenne mesurée :

$$V_{dc} = 316.83 \text{ V}$$

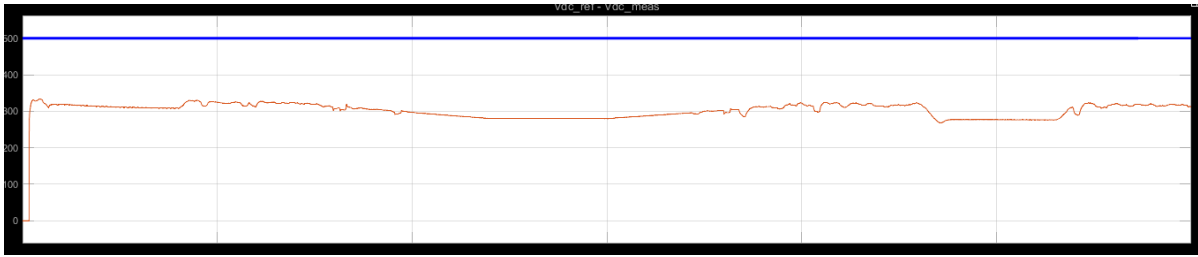


FIGURE 3.6 – Vdc à l'entrée de l'onduleur

On remarque que l'indice de modulation est presque le même que dans le premier cas ce qui signifie la bonne conversion DC/AC dans l'utilisation du ZSI.

3.1.1 L'étage Boost Après le passage par l'étage du boost et la recherche des meilleurs combinaison (I_{pv}/V_{pv}) on a obtenue ces resultats :

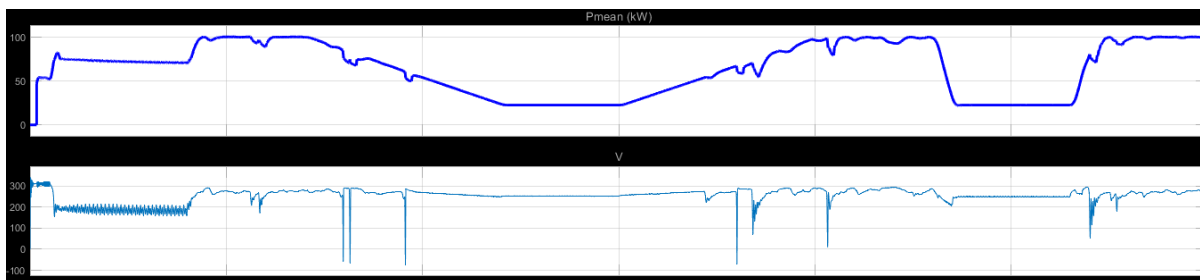


FIGURE 3.7 – Boost ZSI

3.1.1.1 La puissance Pdc le premier graphe dans 3.7 représente la puissance fournis à l'onduleur.

Sa valeur moyenne est mesurée à 99.85 kW.

Sa valeur est legerement supérieure au première qui signifie une meilleure ce qui signifie une meilleure exploitation de l'énergie absorbée par les panneaux car l'onduleur conventionnel ne peut fonctionner de manière performante que sous certaines conditions. En effet, la tension d'entrée doit être égale ou supérieure à la tension nécessaire à la sortie AC, le concernant déjà davantage aux conditions de la source pour une efficacité optimale, en particulier dans les systèmes photovoltaïques où la tension peut varier en fonction du rayonnement solaire ou de la température. Dès qu'elle tombe sous un certain seuil, le VSI cesse d'assurer une tension de sortie adéquate, réduisant considérablement son domaine de fonctionnement. À l'opposé, le Z-Source Inverter (ZSI) échappe à cette limitation de par sa topologie qui intègre un réseau en impédance permettant de conduire un mode shoot-through, ce dernier notamment permettant de rehausser la tension du bus DC de manière dynamique en jouant sur le duty cycle du

shoot-through tout en permettant de maintenir le mode actif de conversion lorsque la tension d'entrée est faible. Ainsi, le ZSI est capable de maintenir une tension AC de sortie correcte malgré une tension d'entrée variable ou faible, permettant donc une utilisation optimisée de la source d'énergie exploitée au moins dans le cas des systèmes solaires. voici les formes de courant et tension :

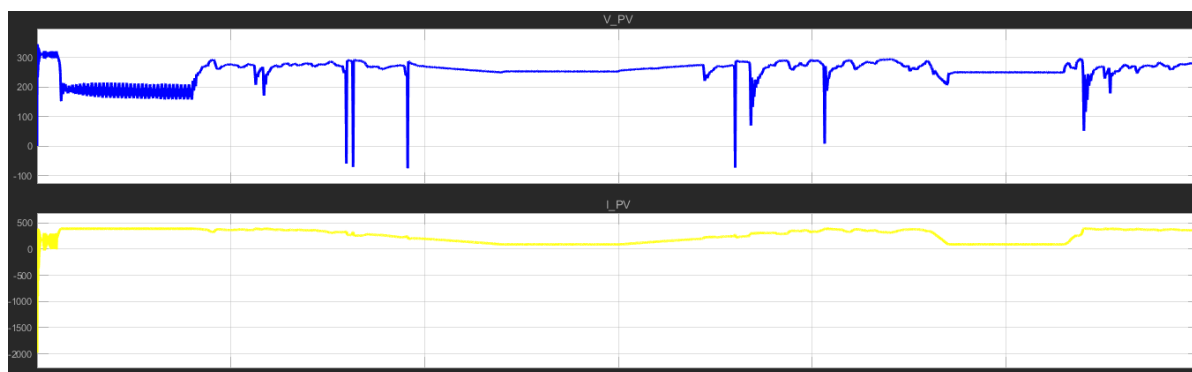


FIGURE 3.8 – I_{pv} et V_{pv} ZSI

3.1.1.2 La tension continu du Boost $V_{dc_{boost}}$ Le deuxième graphe dans 3.7 présente l'avancement de la tension continu suivant les variations de l'énergie solaire à la sortie des panneaux et son adaptation au changements brusques.

on remarque que lorsque une variations survienne le niveau de tension chute brusquement puis retrouve une valeur proche dans l'intervalle du fonctionnement optimale pour éviter les pertes énergétiques.

ainsi que lors du zoom dans les pics on remarque que le temps de réponse est plus petit qu'au premier onduleur grâce à sa structure singulière intégrant un réseau en impédance en amont du pont de conversion. Grâce à cette configuration, le ZSI peut fonctionner en mode « shoot-through », état prohibé dans les onduleurs dits "classiques" et qui, dans son cas, est d'une importance capitale car il permet de stocker de l'énergie dans les inductances et de la transférer rapidement vers la sortie. Conséquence importante, le ZSI peut élever la tension d'entrée sans avoir besoin d'un étage boost séparé, simplifiant du concourt à l'architecture d'ensemble et réduisant les délais de commutation. Cet agencement rend le système plus sensible aux variations des paramètres tels que la tension d'entrée ou le début d'une variation de la charge. D'autre part, en n'imposant pas de fortes contraintes sur les temps morts, mais en intégrant la gestion de l'énergie directement dans le réseau Z, l'application des diverses lois de contrôle favorisera une meilleure rapidité de réponse. Le ZSI contrôlera donc de manière plus rapide, plus

précise et plus efficace que l'onduleur traditionnel, les domaines d'application des types onduleurs ayant trait à, entre autres, des points de fonctionnement variant souvent sont préférables à la mise en œuvre d'appareillages utilisant des structures pour la commande de systèmes électriques nécessitant une souplesse de réglage de la loi de contrôle bien supérieure. Il est environ 2ms.

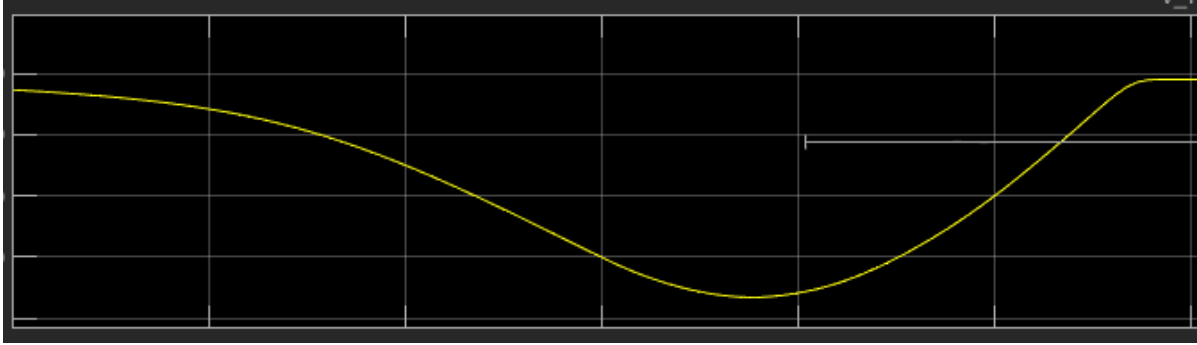


FIGURE 3.9 – Temps de réponse ZSI

3.1.1.3 Le rapport cyclique Initialisé à 0.5

Le gain de tension (ou boost factor) B dépend directement du duty cycle du shoot-through

$$B = \frac{1}{1 - 2D_{ST}}$$

où D_{ST} est le rapport cyclique du shoot-through, avec $0 < D_{ST} < 0,5$.

Le gain de tension total (tension AC en sortie par rapport à la tension d'entrée DC) est donc donné par :

$$M_{ZSI} = B \cdot M = \frac{M}{1 - 2D_{ST}}$$

avec M l'indice de modulation pour l'onduleur conventionnel

On cherche à garder la valeur D_{ST} le plus faible possible pour augmenter les deux autres paramètres (boost factor et l'indice de modulation).

3.1.1.4 Le rendement En calculant le rapport entre la puissance théoriquement fournie par le champ photovoltaïque et la puissance à l'entrée de l'onduleur (sortie Boost)

$$\eta_{\text{boost}} = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}}$$

$$P_{\text{entrée}} = P_{\text{PV}} = V_{\text{PV}} \cdot I_{\text{PV}}$$

où :

- V_{PV} est la tension aux bornes du panneau solaire, - I_{PV} est le courant fourni par le panneau.

Le rendement du mode boost dans le ZSI devient alors :

$$\eta_{\text{boost}} = \frac{P_{\text{réseau Z}}}{P_{\text{PV}}} = \frac{V_{\text{boost}} \cdot I_{\text{boost}}}{V_{\text{PV}} \cdot I_{\text{PV}}}$$

$$\eta_{\text{boost}} = \frac{P_{\text{réseau Z}}}{N_s \cdot V_{\text{PV}} \cdot N_p I_{\text{PV}}}$$

$$= \frac{99,85 \cdot 10^3}{54,7 \cdot 5 \cdot 5,58 \cdot 66} = 99,13\%$$

où :

- V_{boost} est la tension après surélévation ,

- I_{boost} est le courant transmis après le réseau en Z.

Ce rendement est meilleur que le premier donc la puissance transmise à la charge sera également supérieure $P_{\text{charge}} = 146,3 \text{ kW}$

3.1.1.5 La tension de sortie Vac Voici la tension alternative à la sortie de l'onduleur z-source :

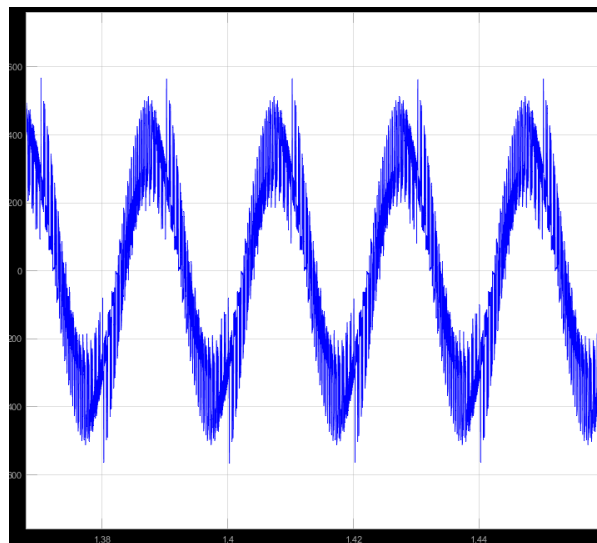


FIGURE 3.10 – Vac ZSI avant filtre

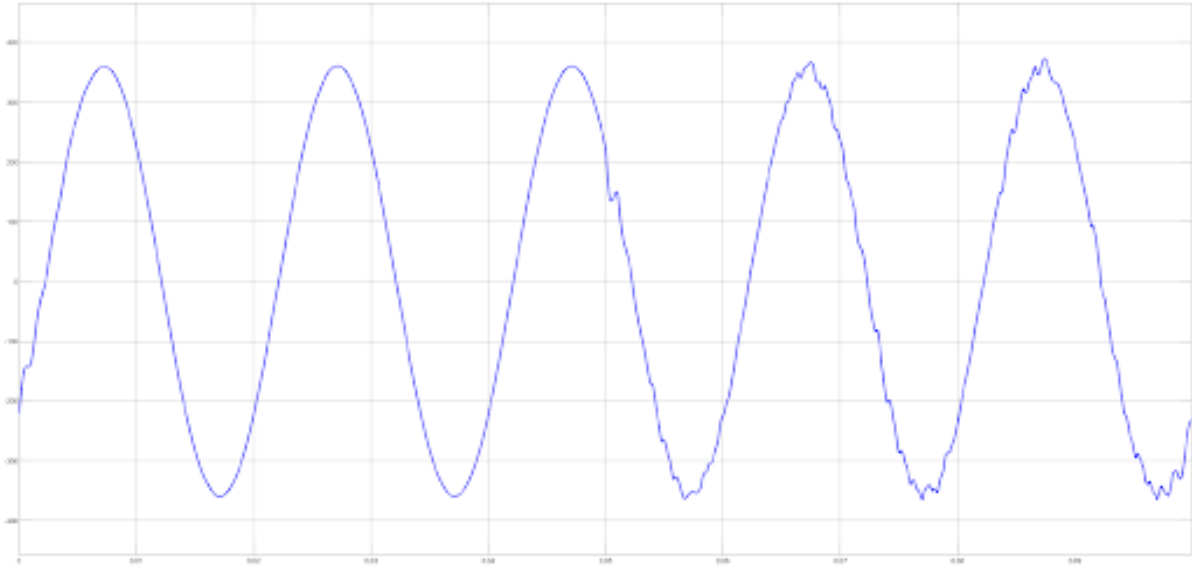


FIGURE 3.11 – Vac ZSI après filtre

3.2 Simulation par onduleur conventionnel

La tension continue Vdc : La valeur théorique :

$$V_{dc} = N_s \cdot V_{pv} \quad (3.2)$$

$$V_{dc} = 5 \cdot 64.2 = 321 \text{ V}$$

La valeur moyenne mesurée :

$$V_{dc} = 309.51 \text{ v}$$

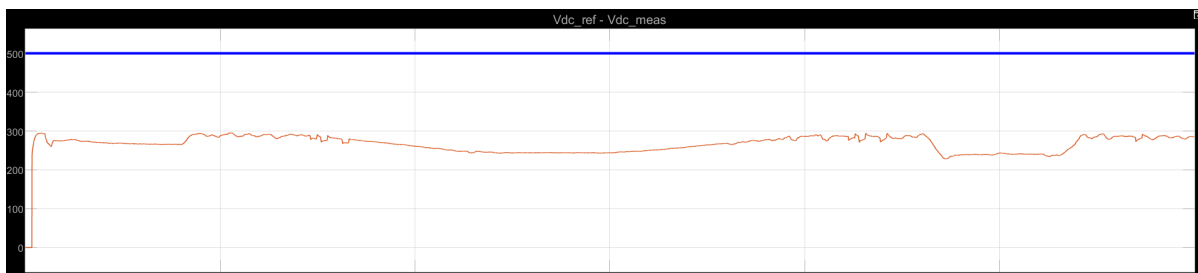


FIGURE 3.12 – Vdc à l'entrée de l'onduleur

3.2.1 Relation entre la tension de sortie et l'indice de modulation La tension de sortie fondamentale d'un onduleur est proportionnelle à l'indice de modulation M_d . En modulation sinusoïdale, on a :

$$V_{AC}^{\max} = M_a \cdot V_{DC} \quad (3.3)$$

La tension efficace correspondante est :

$$V_{AC}^{\text{rms}} = \frac{M_a \cdot V_{DC}}{2\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

où :

- V_{DC} : tension continue d'entrée de l'onduleur ,
- $M_a \in [0, 1]$: indice de modulation en zone linéaire.

Lorsque $M_a > 1$, l'onduleur entre en de surmodulation, ce qui entraîne une augmentation de la distorsion harmonique et une perte de linéarité de la sortie.

L'indice de modulation est vers 0.9 ce qui rend la tension de sortie proche de linéarité maximale (lorsque $M_a = 1$).

3.2.2 L'étage Boost Après le passage par l'étage du boost et la recherche des meilleurs combinaison (I_{pv}/V_{pv}) on a obtenue ces résultats :

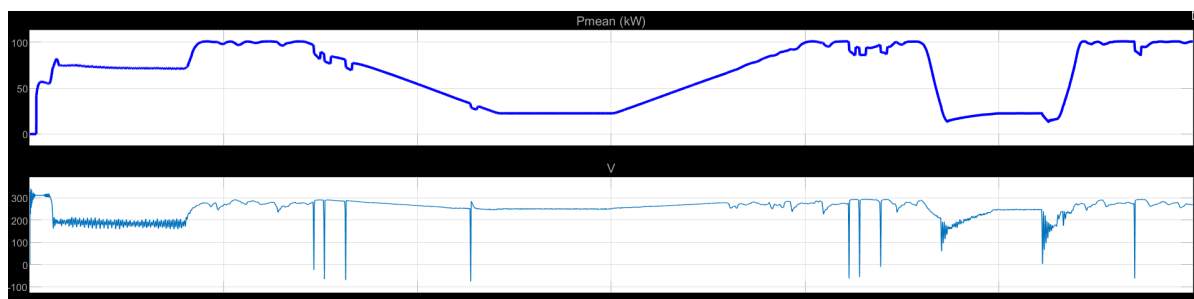
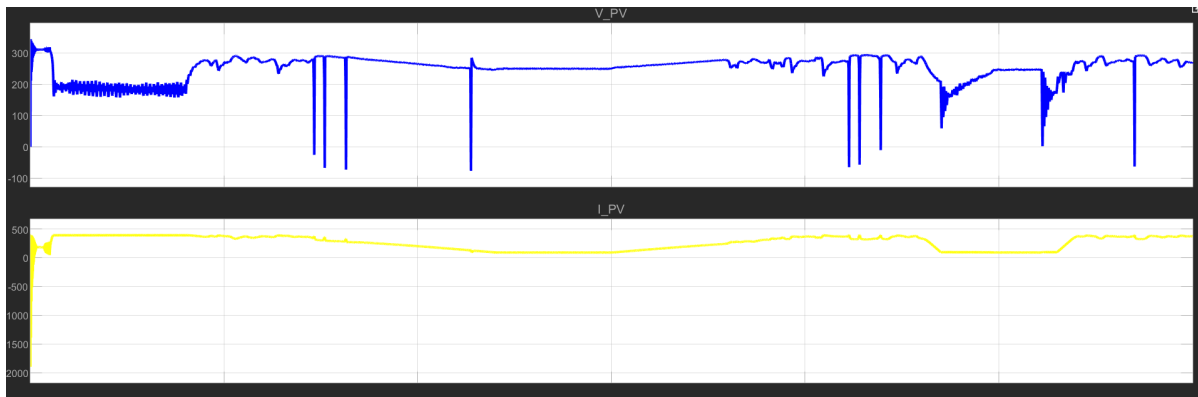


FIGURE 3.13 – Boost Onduleur

3.2.2.1 La puissance Pdc le premier graphe dans 3.13 représente la puissance fournis à l'onduleur.

Sa valeur moyenne est mesurée à 96.55 kW.

Voici les formes de courants et tension :

FIGURE 3.14 – I_{pv} et V_{pv} Onduleur

3.2.2.2 La tension continu du Boost V_{dc_{boost}} Le deuxième graphe dans 3.13 présente l'avancement de la tension continu suivant les variations de l'énergie solaire à la sortie des panneaux et son adaptation au changements brusques.

on remarque que lorsque une variations survienne le niveau de tension chute brusquement puis retrouve une valeur proche dans l'intervalle du fonctionnement optimale pour éviter les pertes énergétiques.

Par contre la fonction boost séparée provoque un retard dans la réponse au variations de quelques milli-secondes mais lorsqu'il agit la tension revienne rapidement à l'intervalle souhaité .

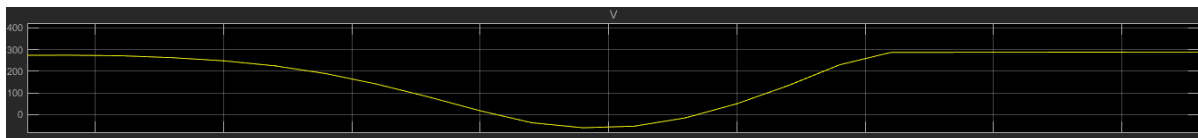


FIGURE 3.15 – Temps de réponse Onduleur

On remarque qu'il prend vers 3 ms pour la surélévation de la tension

3.2.2.3 Le rendement

$$\eta_{\text{boost}} = \frac{P_{\text{mesurée}}}{P_{\text{théorique}}}$$

$$\eta_{\text{boost}} = 96\%$$

Voici la puissance absorbée par la charge :

Sa valeur moyenne mesurée à 145.4 kW

3.2.2.4 La tension de sortie Vac Voici la tension alternative à la sortie de l'onduleur :

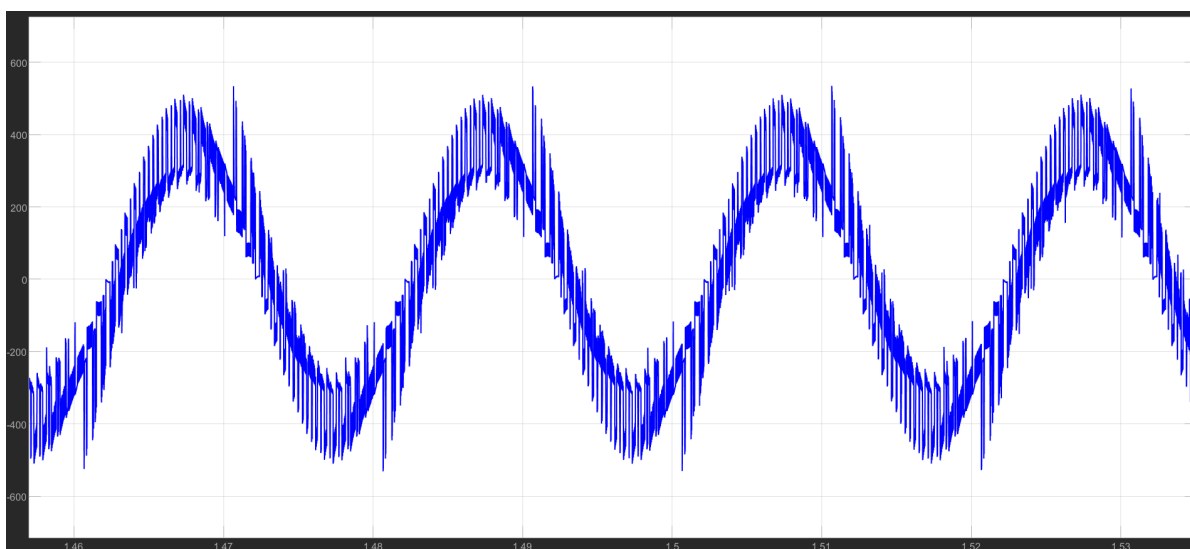


FIGURE 3.16 – Vac Onduleur avant filtre

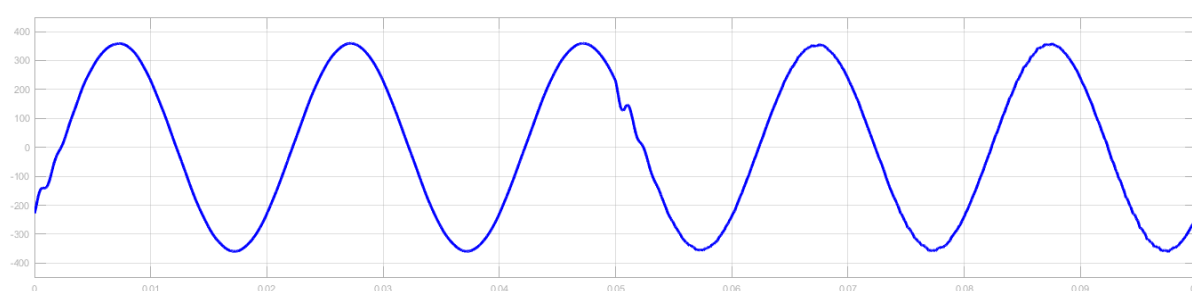


FIGURE 3.17 – Vac Onduleur après filtre

3.2.3 Conclusion Dans ce chapitre on a pu retenir que le ZSI est plus efficace qu'un onduleur conventionnel pour l'intégration des systèmes photovoltaïque au réseau électrique . Il délivre une puissance supérieure parce que la fonction boost qui surélève la tension continue est intégrer dans sa structure grâce au mode shoot-through et elle n'est pas séparé contrairement aux onduleurs , cela offre aussi une réponse plus rapide au variations ce qui la rend plus adaptée à l'utilisation avec une source variable.

Tout le précédent se conclut dans un rendement plus élevé pour l'étage de conversion ce qui engendre un meilleur rendement total pour le système .

Malgré ses nombreux avantages, le Z-Source Inverter présente aussi certaines limites qu'il convient de souligner. L'une des principales difficultés rencontrées concerne le temps de simulation, souvent plus long que pour un onduleur classique. Cela s'explique par la complexité du modèle, notamment lorsqu'on cherche à représenter fidèlement les phases de shoot-through et les transitions rapides entre les différents états. Cette lourdeur rend parfois difficile l'ex-

ploration de plusieurs scénarios ou ralentit les études d'optimisation lors de la conception du système. Par ailleurs, la commande du ZSI demande une régulation plus fine et plus avancée pour bien gérer l'équilibre entre le niveau de boost, la stabilité du système et le rendement, ce qui peut poser des défis dans un environnement réel.

Pour améliorer ces aspects, plusieurs pistes peuvent être envisagées. D'abord, le développement de stratégies de commande plus intelligentes, comme les contrôles prédictifs ou adaptatifs, permettrait de mieux anticiper les variations et de réduire les pertes. Ensuite, coupler plus étroitement le ZSI à un système de stockage pourrait offrir une plus grande souplesse, notamment dans des configurations en autoconsommation ou dans les micro-réseaux. Enfin, optimiser les outils de simulation afin d'en réduire le temps de calcul tout en gardant une bonne précision serait un vrai atout pour accélérer la mise en œuvre du ZSI dans des systèmes énergétiques complexes.

3.3 CONCLUSION GENERALE

Dans le contexte actuel de transition énergétique, l'intégration efficace des énergies renouvelables, notamment le photovoltaïque, dans les réseaux électriques impose des exigences de plus en plus strictes en matière de stabilité, de qualité de l'énergie et de performance dynamique. Les systèmes d'onduleurs jouent un rôle central dans cette chaîne de conversion, car ils assurent le lien entre la source d'énergie continue (comme les panneaux photovoltaïques) et le réseau alternatif. À travers cette étude, nous avons exploré et comparé deux types d'onduleurs : l'onduleur conventionnel (VSI) et l'onduleur Z-Source (ZSI), en les soumettant à des conditions réalistes de fonctionnement perturbé afin d'évaluer leur robustesse, leur efficacité énergétique et leur réactivité.

Le système photovoltaïque étudié est composé de 66 strings en parallèle, chacun contenant 5 panneaux en série. Chaque panneau délivrant une puissance nominale de 305 Wc, la configuration permet d'obtenir une puissance totale significative, exploitée via un hacheur Boost commandé par un algorithme MPPT de type conductance incrémentale (IC). Ce système est également renforcé par une solution de stockage et raccordé au réseau électrique de distribution. Afin d'évaluer la performance dynamique des deux types d'onduleurs, un profil d'irradiance perturbé a été introduit, simulant des phénomènes d'ombrage partiel ou des variations rapides d'ensoleillement. Cette approche a permis de mettre en évidence les différences fondamentales entre les deux architectures d'onduleurs, en particulier face aux conditions extrêmes ou imprévues.

L'onduleur conventionnel (VSI) repose sur une architecture classique à source de tension, où le fonctionnement stable dépend fortement de la qualité de la tension d'entrée. Ce type d'onduleur ne dispose pas de capacité intégrée de surélévation de la tension, ce qui le rend inapte à fonctionner lorsque la tension d'entrée est inférieure à la valeur requise pour générer la tension de sortie AC nominale. Cette limitation est particulièrement pénalisante dans un système photovoltaïque, où la tension varie en fonction de l'irradiance, de la température et d'autres facteurs environnementaux. En cas de baisse brutale de l'ensoleillement, le VSI perd sa capacité de conversion, interrompant l'alimentation de la charge ou du réseau, ce qui nuit à la stabilité et à la continuité du service.

À l'inverse, le Z-Source Inverter (ZSI) propose une solution innovante et robuste, grâce à sa topologie unique intégrant un réseau en impédance composé de deux inductances et de

deux condensateurs. Cette structure permet un fonctionnement en mode shoot-through, dans lequel les interrupteurs d'un même bras peuvent être conduits simultanément sans provoquer de court-circuit. Ce mode de fonctionnement autorise le stockage temporaire d'énergie dans les inductances, suivi d'une libération sous forme de tension boostée, permettant ainsi au ZSI d'augmenter dynamiquement la tension du bus DC. Grâce à ce mécanisme, le ZSI peut fonctionner efficacement même lorsque la tension d'entrée est faible ou fluctuante, assurant une continuité de conversion et une exploitation maximale de l'énergie photovoltaïque.

D'un point de vue dynamique, le ZSI présente également un temps de réponse plus court que le VSI. Cette réactivité accrue provient de l'intégration directe de la fonction boost au sein de l'onduleur, ce qui élimine la latence associée à un étage de conversion séparé. En adaptant en temps réel le duty cycle du shoot-through, le ZSI ajuste immédiatement la tension du bus en fonction des variations de la source ou de la charge. Ce comportement dynamique est particulièrement avantageux dans les systèmes soumis à des conditions changeantes, car il permet de stabiliser rapidement la tension de sortie et de limiter les perturbations transmises au réseau.

Sur le plan énergétique, la modélisation mathématique du ZSI montre que le gain de tension (boost factor) dépend directement du duty cycle du shoot-through. Ce gain permet au ZSI de produire une tension de sortie plus élevée que la tension d'entrée, ce qui n'est pas possible avec un VSI classique sans ajouter un convertisseur DC-DC supplémentaire. Cette capacité à générer une tension AC nominale même à partir d'une tension d'entrée faible est un atout majeur pour le rendement global du système. Toutefois, il convient de noter que l'augmentation du duty cycle entraîne une augmentation des pertes (dans les inductances, la diode et les condensateurs), ce qui impose un compromis entre performance énergétique et efficacité.

En ce qui concerne le rendement du mode boost, il est défini comme le rapport entre la puissance transmise à la sortie (réseau ou charge) et la puissance extraite de la source (panneaux photovoltaïques). Dans un ZSI, ce rendement est généralement bon, même si légèrement inférieur à celui d'un VSI en régime stable et non perturbé. Cependant, dans des situations de tension d'entrée faible ou instable, le ZSI maintient un rendement plus constant et évite les interruptions, ce qui le rend plus adapté aux environnements réels et variables.

En conclusion, cette étude comparative met clairement en évidence la supériorité fonctionnelle du Z-Source Inverter par rapport à l'onduleur conventionnel dans les applications photovoltaïques soumises à des conditions d'exploitation irrégulières. Le ZSI combine flexibi-

lité, robustesse et performance dynamique, en offrant une réponse rapide, un fonctionnement en basse tension, et une capacité à maintenir la conversion active même lors de perturbations importantes. Sa capacité d'adaptation en fait un choix pertinent pour les installations solaires modernes, notamment dans des contextes où la fiabilité, la continuité du service et l'efficacité énergétique sont primordiales. Dans une perspective de développement durable et d'intégration massive des énergies renouvelables, l'adoption de convertisseurs comme le ZSI représente une avancée technologique significative vers des systèmes plus intelligents, résilients et performants.

Bibliographie

- [1] Nabil Abouchabana. *Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT*. PhD thesis, Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2009.
- [2] Mohamed Salah Aït Cheikh, Cherif Larbes, Gul Filiz Tchoketch Kebir, and Ahmed Zergeras. Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme. *Journal of Renewable Energies*, 10(3) :387–395, 2007.
- [3] Wafa BENSACI. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande mppt. *Thème de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla*, 2012.
- [4] F. Benzineb. *Etude et commande d'un onduleur z-source : application aux systèmes photovoltaïques*. PhD thesis, Université Saad Dahlab de Blida, Blida, 12 2016. Thèse de doctorat.
- [5] Miguel F Escalante, J-C Vannier, and Amir Arzandé. Flying capacitor multilevel inverters and dtc motor drive applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(4) :809–815, 2002.
- [6] Trishan ESRAM and Patrick L Chapman. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on energy conversion*, 22(2) :439–449, 2007.
- [7] Martin A Green et al. Third generation photovoltaics. 2006.
- [8] KH Hussein, Itsuya Muta, Tsutomu Hoshino, and MI Osakada. Maximum photovoltaic power tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 142(1) :59–64, 1995.
- [9] Antonio Luque and Steven Hegedus. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons, 2011.

-
- [10] N Muntean, L Tutulea, and I Boldea. A modified carrier-based pwm modulation technique in z source inverters. In *2007 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*, pages 174–180. IEEE, 2007.
- [11] Jenny A Nelson. *The physics of solar cells*. World Scientific Publishing Company, 2003.
- [12] Fang Zheng Peng. Z-source inverter. *IEEE Transactions on industry applications*, 39(2) :504–510, 2003.
- [13] Miaosen Shen, Alan Joseph, Jin Wang, Fang Z Peng, and Donald J Adams. Comparison of traditional inverters and z-source inverter for fuel cell vehicles. *IEEE Transactions on power electronics*, 22(4) :1453–1463, 2007.
- [14] Mohamed TELDJOUNE, KADDOUR Benyoucef, et al. Commande d'un onduleur z source appliqué à un système photovoltaïque. 2020.
- [15] Souad Zaamta and Abderrahmane Dib. Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs. *Journal of Renewable Energies*, 12(1) :137–147, 2009.