



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de  
**Master en Electrotechnique**

Présenté par :  
**BENZIADA Mohamed Abdelghani**

**Intitulé**

---

**Etude comparative des  
différentes topologies du  
convertisseur Z-source**

---

Soutenu le 17 juin 2015 à l'ENP

**Membres du Jury d'examen**

|             |               |                    |
|-------------|---------------|--------------------|
| Président   | R. Ibtouen    | Professeur à l'ENP |
| Rapporteurs | M.O. Mahmoudi | Professeur à l'ENP |
|             | E. M. Berkouk | Professeur à l'ENP |
| Examineurs  | S.Mekhtoub    | Professeur à l'ENP |
|             | O. Touhami    | Professeur à l'ENP |

**ENP 2015**

## ملخص

الغرض الرئيسي من هذا المشروع هو دراسة المحول  $Z$ -source في نظام الطاقة الكهروضوئية. ولدراسة هذا الموضوع تطرقنا إلى تقديم عرض الحالة في مجال الطاقة الكهروضوئية والمحول  $Z$ -source. في هذا القسم قدمنا بعض البحوث على الخلايا الكهروضوئية والمحول  $Z$ -source. ثم قدمنا عدة مخططات لهذا المحول المستخدمة في الأنظمة الضوئية. وتشمل هذه: المحول  $Z$ -source ذو مستويين وثلاثة مستويات، المحول  $Z$ -source المتضمن في مستويين وثلاثة مستويات والمحول  $Z$ -source DC على مستويين وثلاثة مستويات. وأظهرت نتائج المحاكاة في MATLAB مزايا وعيوب كل من المحولات.

الكلمات المفتاحية: محول  $Z$ -source , الطاقة الكهروضوئية ، الموصل المستمر.

## Résumé

Le but principal de ce projet est d'étudier les différentes topologies du convertisseur  $Z$ -source dans les systèmes photovoltaïques. Pour ce faire, on a introduit l'étude par l'état de l'art sur l'énergie photovoltaïque et le convertisseur  $Z$ -source. Dans cette partie nous avons exposé quelques travaux de recherche sur l'énergie photovoltaïque et le convertisseur  $Z$ -source avec sa commande. Ensuite, on a présenté plusieurs topologies du convertisseur  $Z$ -source utilisées pour les systèmes photovoltaïques. On peut citer l'onduleur  $Z$ -source à deux niveaux et trois niveaux, l'onduleur  $Z$ -source embarqué à deux niveaux et trois niveaux et l'onduleur  $Z$ -source embarqué au bus DC à deux niveaux et trois niveaux. Les résultats de simulation sous MATLAB peuvent indiquer les avantages et les inconvénients de chacun de ses convertisseurs.

**Mots Clés :**  $Z$ -source, système PV, bus DC.

## Abstract

The main purpose of this project is to study the different topologies of  $Z$ -source inverter in photovoltaic systems. To this, we were added the study by the state of the art on photovoltaics and the  $Z$ -source converter. In this section, we presented some research on photovoltaics and the  $Z$ -source converter with his order. Then we presented several topologies  $Z$ -source inverter used for photovoltaic systems. These include the  $Z$ -source inverter with two levels and three levels, the  $Z$ -source inverter embedded with two levels and three levels and the  $Z$ -source inverter embedded to the DC bus with two levels and three levels. The MATLAB simulation results may indicate the advantages and disadvantages of each of the converters.

**Key words:**  $Z$ -source, PV system, DC bus.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciements

*Nous remercions Allah de nous avoir accordé la patience, le courage, la volonté et la motivation qui nous ont permis d'achever ce travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude, notre grand respect et notre sincère reconnaissance à nos promoteurs le **PR M.O.MAHMOUDI** et **PR EM.BERKOUK** pour avoir assumé la lourde responsabilité de nous encadrer, de nous avoir orienté et conseillé tout au long de ce travail, pour leurs disponibilité ainsi pour la confiance qu'ils nous ont accordée sans oublier **Mlle A.BEHLLOULI** pour son intérêt et sa disponibilité.*

*Nous remercions chaleureusement messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous accordent d'avoir accepté d'évaluer notre projet.*

*Nous souhaitons aussi remercier tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, et en particulier, Nos professeurs d'Electrotechnique qui nous ont encadrés auparavant et tous nos enseignants pour les connaissances qu'ils nous ont transmis, leur disponibilité et leurs efforts.*

*Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mon père, mon premier encadrant, depuis ma naissance.*

*À ma très chère mère, qu'elle trouve ici l'hommage de ma gratitude, qui si grande qu'elle puisse être, ne sera à la hauteur de ses sacrifices et ses prière pour moi.*

*À Mon oncle Seddik en termes de reconnaissance pour tout l'encouragement, le soutien moral et financier et en témoignage de gratitude et d'attachement.*

*À Mes frères Abderrezak, Oussama, Lokmane et Bilel à qui je souhaite beaucoup de réussite et de bonheur.*

*À Mes grands-parents.*

*À mes oncles et leurs femmes, mes tantes et leurs maris, mes cousins, mes cousines et à toute ma famille de loin ou de proche.*

*À Mon binôme Mohamed et à toute sa famille.*

*À mes amis et mes camarades.*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

*À Tous ceux qui m'aiment et tous ceux que j'aime.*

*Mohamed Abdelghani*

# Table des matières

|  |    |
|--|----|
| <b>Introduction générale</b> .....   | 1  |
| <b>Chapitre1 : Etat de l'art</b>   |    |
| 1.1. Introduction.....   | 3  |
| 1.2. Energie photovoltaïque .....  | 3  |
| 1.3. Le convertisseur Z-source.....  | 4  |
| 1.3.1. Généralités .....   | 4  |
| 1.3.2. Historique.....   | 5  |
| 1.3.3. La commande du convertisseur Z-source .....   | 7  |
| 1.3.4. Onduleur Z-source et hacheur Z-source .....   | 8  |
| 1.4. Conclusion .....  | 9  |
| <b>Chapitre2 : Evaluation comparative des topologies existantes de l'onduleur Z-source pour les systèmes photovoltaïques</b> |    |
| 2.1. Introduction.....   | 10 |
| 2.2. Analyse des topologies existantes de l'onduleur Z-source .....  | 10 |
| 2.2.1. Introduction.....   | 10 |
| 2.2.2. Onduleur Z-source à deux niveaux.....   | 12 |
| 2.2.3. Onduleur Z-source à trois niveaux .....   | 13 |
| 2.2.4. Onduleur Z-source embarqué .....  | 15 |
| 2.2.4.1. Onduleur Z-source embarqué à deux niveaux .....   | 16 |
| 2.2.4.2. Onduleur Z-source embarqué à trois niveaux .....  | 17 |
| 2.2.4.3. Onduleur Z-source embarqué au bus dc à deux niveaux .....   | 19 |
| 2.2.4.4. Onduleur Z-source embarqué au bus dc à trois niveaux .....  | 20 |
| 2.3. Simulation et validation des différents systèmes .....  | 20 |
| 2.3.1. Onduleur Z-source à deux niveaux .....  | 20 |
| 2.3.2. Onduleur Z-source embarqué à deux niveaux .....   | 23 |
| 2.3.3. Onduleur Z-source embarqué au bus dc à deux niveaux .....   | 25 |
| 2.4. Interprétation.....   | 27 |
| 2.5. Conclusion .....  | 27 |
| <b>Conclusion générale</b> .....   | 29 |
| <b>Bibliographie</b> .....   | 30 |

# Tables de figures

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Onduleur Z-source à deux niveaux.....                                       | 12 |
| 2.2  | Onduleur Z-source à trois niveaux .....                                     | 13 |
| 2.3  | Onduleur Z-source embarqué à deux niveaux .....                             | 16 |
| 2.4  | Onduleur Z-source embarqué à trois niveaux.....                             | 17 |
| 2.5  | Onduleur Z-source embarqué au bus dc à deux niveaux .....                   | 19 |
| 2.6  | Onduleur Z-source embarqué au bus dc à trois niveaux.....                   | 20 |
| 2.7  | Architecture de l'onduleur Z-source à deux niveaux.....                     | 21 |
| 2.8  | Principe de fonctionnement de la MLI triangulo-sinusoidale .....            | 22 |
| 2.9  | Courant passant par l'inductance .....                                      | 22 |
| 2.10 | Tension aux bornes du condensateur .....                                    | 22 |
| 2.11 | Tension de bus continu .....  | 23 |
| 2.12 | Tension de bus continu filtrée .....  | 23 |
| 2.13 | Courant de la charge.....   | 23 |
| 2.14 | Tension de la charge .....  | 23 |
| 2.15 | Architecture de l'onduleur Z-source embarqué à deux niveaux.....            | 24 |
| 2.16 | Courant passant par l'inductance.....                                       | 24 |
| 2.17 | Tension aux bornes du condensateur .....                                    | 24 |
| 2.18 | Tension de bus continu .....  | 25 |
| 2.19 | Tension de bus continu filtrée .....  | 25 |
| 2.20 | Courant de la charge.....   | 25 |
| 2.21 | Tension de la charge .....  | 25 |
| 2.22 | Architecture de l'onduleur Z-source embarqué au bus dc à deux niveaux ..... | 26 |
| 2.23 | Courant passant par l'inductance .....                                      | 26 |
| 2.24 | Tension aux bornes du condensateur .....                                    | 26 |
| 2.25 | Tension de bus continu .....  | 27 |
| 2.26 | Tension de bus continu filtrée.....   | 27 |
| 2.27 | Courant de la charge.....   | 27 |
| 2.28 | Tension de la charge .....  | 27 |

# Abréviations et symboles

|                          |   |          |
|--------------------------|---|----------|
| SCP                      | Système de conditionnement de puissance         |          |
| PV                       | Photovoltaïque                                  |          |
| ZS                       | Z-source  |          |
| $U_{dc}$                 | Tension de bus continu                          | V        |
| MPPT                     | Recherche du Point de Puissance Maximum         |          |
| $i_L$                    | Courant de l'inductance L                       | A        |
| $V_{aN}, V_{bN}, V_{cN}$ | Tensions simples à la sortie de l'onduleur      | V        |
| $i_a, i_b, i_c$          | Courants fondamentaux à la sortie de l'onduleur | A        |
| $L_f$                    | Inductance du filtre                            | H        |
| $R_f$                    | Résistance de fuite de l'inductance $L_f$       | $\Omega$ |
| $C_f$                    | Capacité du filtre                              | F        |
| ZSC                      | Hacheur à Z-source                              |          |
| ZSI                      | Onduleur à Z-source                             |          |
| MLI                      | Modulation de largeur d'impulsion               |          |
| ST                       | Shoot-Through                                   |          |
| $L_1$                    | Inductance du réseau ZS                         | H        |
| $i_{L1}$                 | Courant de l'inductance $L_1$                   | A        |
| $L_2$                    | Inductance du réseau ZS                         | H        |
| $i_{L2}$                 | Courant de l'inductance $L_2$                   | A        |
| $C_1$                    | Capacité du premier condensateur du ZS          | F        |
| $v_{c1}$                 | Tension du premier condensateur du réseau ZS    | V        |
| $C_2$                    | Capacité du deuxième condensateur du ZS         | F        |
| $v_{c2}$                 | Tension du deuxième condensateur du réseau Z    | V        |
| $V_g$                    | Tension de la source                            | V        |

|           |                                      |          |
|-----------|--------------------------------------|----------|
| $i_g$     | Courant de la source                 | V        |
| $R_l$     | Résistance de la charge              | $\Omega$ |
| $L_l$     | Inductance de la charge              | H        |
| $i_l$     | Courant de charge                    | A        |
| $S_1$     | Interrupteur $S_1$                   |          |
| $S_2$     | Interrupteur $S_2$                   |          |
| $T_0$     | Durée de Shoot-Through               | s        |
| $T$       | Période de commutation               | s        |
| $D$       | Rapport cyclique de Shoot-Through    |          |
| $B$       | Facteur de survoltage                |          |
| $M$       | Indice de modulation                 |          |
| $f_p$     | Fréquence de la porteuse             | Hz       |
| $V_p$     | Amplitude de la porteuse             | V        |
| $f$       | Fréquence de la tension de référence | Hz       |
| $V_{ref}$ | Amplitude de la tension de référence | V        |
| $n$       | Nombre de niveaux                    |          |
| VSI       | Onduleur à source de tension         |          |
| CSI       | Onduleur à source de courant         |          |
| $G$       | Gain de survoltage                   |          |
| SB        | Simple boost                         |          |

# Introduction générale

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production d'électricité est assurée par des ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et tant dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole.

Le prix du pétrole, du charbon et du gaz augmente et le réchauffement climatique de plus en plus sévère en raison de la pollution de l'environnement.

Par conséquent, les pays sont maintenant à la recherche de sources d'énergie alternatives pour remplacer en partie les combustibles fossiles. En raison de préoccupations environnementales, davantage d'efforts sont actuellement mises en sources d'énergie verte comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, piles à combustible, etc. Les cellules solaires ou photovoltaïques utilisent directement l'énergie du soleil pour produire de l'électricité.

Les systèmes photovoltaïques fournissent des moyens prometteurs pour produire de l'énergie électrique propre, à répondre à la demande croissante d'énergie et d'atténuer le réchauffement climatique. Un avantage important des systèmes PV est l'utilisation de l'énergie abondante et gratuite du soleil, et d'être sans danger pour l'environnement et renouvelable. Toutefois, ces systèmes font toujours face à des obstacles majeurs en raison de leur coût d'installation élevé et faible efficacité. En outre, les fluctuations de la puissance de sortie dues aux variations présentes dans l'atmosphère entraînent une performance insatisfaisante, et réduire la fiabilité de l'installation photovoltaïque.

Une adaptation de puissance entre la source et la charge s'avère importante pour un meilleur fonctionnement et afin d'assurer la fiabilité du système. Avec le développement d'une électronique de puissance spécifique dédiée aux applications photovoltaïques, beaucoup de systèmes de conversion innovants ont été conçus, notamment des onduleurs ayant des étages d'adaptation en entrée. En effet, ces dispositifs permettent d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance DC-DC insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur.

Bien que ces convertisseurs soient largement utilisés, ils ne sont pas dénués d'inconvénients :

- ◆ Encombrement du système de conditionnement de puissance.
- ◆ Augmentation du cout de construction du SCP.
- ◆ Et la réduction d'efficacité.

Une nouvelle structure a été proposée en 2002 par Fang Z. Peng, permet de résoudre les problèmes cités auparavant, c'est le **convertisseur *Z-source***.

### **Organisation de mémoire**

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en deux principaux chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique sur les travaux de recherches effectués sur l'énergie photovoltaïque et le convertisseur *Z-source* a été faite.

Le deuxième chapitre est dédié à l'exposition des différentes topologies des convertisseurs *Z-source* utilisées dans les systèmes photovoltaïques.

Les résultats de simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink permet de déduire la différence entre ces convertisseurs ainsi que les avantages de chacun d'eux.

Nous terminerons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude.

# Chapitre 1 : Etat de l'art

## 1.1. Introduction

Avant d'entamer notre étude comparative entre les différentes topologies des convertisseurs Z-source dans les systèmes photovoltaïques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques travaux de recherche sur l'énergie photovoltaïque, ainsi la présentation du convertisseur Z-source et les différents travaux de recherche sur ce convertisseur et sa commande.

## 1.2. Energie photovoltaïque

Une approche est faite par Sera et autres (2007) pour démontrer la construction du modèle de panneau PV utilisant le modèle d'une seule diode avec cinq paramètres, exclusivement basé sur les paramètres de la feuille de données pour prédire le comportement du panneau dans différentes conditions de température et de l'éclairement [1].

Patel et Agarwal (2008) ont présenté un simulateur à base de MATLAB " cum learning tool ", pour accroître la compréhension et prédire les caractéristiques des grands tableaux de PV dans des conditions d'ombrage partielles [2].

Un modèle de circuit a été proposé par Marcelo Gradella Villalva et autres chercheurs (2009) pour une utilisation dans des simulations de photovoltaïque (PV) pour obtenir les caractéristiques de performance des modules photovoltaïques [3].

Abir Chatterjee et autres (2011) ont présenté une méthode d'estimation de modèle de PV à partir des données de modules photovoltaïques basés sur un modèle d'une seule diode d'une cellule photovoltaïque pour estimer les paramètres de tableaux avec changement de température et l'éclairement [4].

L'effet d'ombrage partiel sur les modules photovoltaïques de silicium multi-cristallin (mc-Si) a été étudié grâce à un modèle de simulation P-Spice par Evagelia Paraskevadaki et autres chercheurs (2011) pour quantifier l'effet

d'ombrage partiel sur la courbe I-V et le point de puissance maximale (MPP) de tension et de puissance et validé le modèle via les résultats expérimentaux [5].

### 1.3. Le convertisseur "Z-source"

#### 1.3.1. Généralités

Les convertisseurs "Z-source" sont des topologies de convertisseurs récents qui peuvent effectuer deux fonctions à la fois l'amplification et l'abaissement comme une seule unité [6]. Une caractéristique unique des convertisseurs "Z-source" est l'état "shoot through" par lequel les deux interrupteurs à semi-conducteurs de la même branche de phase peuvent être activés simultanément. Par conséquent, aucun temps mort n'est nécessaire et la distorsion de sortie est fortement réduite et donc la fiabilité est considérablement améliorée. Cette fonctionnalité n'est pas disponible dans les sources de tension et de courant traditionnelles.

Les convertisseurs "Z-source" sont principalement appliqués pour les charges qui exigent un gain à haute tension tels que les entraînements des moteurs et comme une unité de conditionnement de puissance pour les sources d'énergie renouvelables comme les cellules solaires, les piles à combustible, etc pour faire correspondre les différences de tension de la source d'entrée [7].

Le développement des topologies des convertisseurs "Z-source" fournit une amélioration importante du gain de la tension et des signaux de sortie. Un compromis entre l'augmentation de la capacité et le nombre de composants est toujours un problème majeur pour maintenir le coût constant.

Il est à noter que cette augmentation dans les composants passifs avec des modifications appropriées peut améliorer la performance de ces types de convertisseurs. L'accroissement topologique a été en termes d'ajout ou de la réduction de la composante passif, l'inclusion des interrupteurs à semi-conducteurs supplémentaires, la modification ou l'inclusion de sources de courant continu et aussi des changements de schémas de modulation, etc [7].

La possibilité d'inversion de faibles tensions est également fournie pour les applications qui ont besoin de tensions alternatives faibles [8].

Il est également à noter que cette croissance topologique a conduit à l'amélioration des caractéristiques de sortie fiables pour diverses opérations. Il y a aussi des cas où une topologie spécifique est modifiée pour une application unique. Cette croissance durable a attiré des chercheurs d'introduire certains modèles uniques de convertisseurs Z- source.

Toutes les topologies des convertisseurs Z-source proposées sont conçues pour les systèmes photovoltaïques, contrôlées par des schémas de commutation à savoir, la " sinusoidal PWM ", " space vector PWM " et " simple boost PWM".

### 1.3.2. Historique

Fang Zheng Peng et autres (2005) ont démontré le système de convertisseur Z-source pour les variateurs de vitesse pour avoir la capacité " ride through " dans le cadre des chutes de tension, réduire les harmoniques de ligne, et étendre la plage de tension de sortie avec simulation et les résultats expérimentaux [9].

La conception d'un convertisseur Z-source double utilisé soit avec une source de courant continu unique ou deux sources de courant continu isolées a été proposée par Feng Gao et autres (2007) [10].

Les résultats théoriques, ainsi que l'aspect pratique du convertisseur Z-source double a été confirmée dans les simulations à la fois en utilisant PSIM avec MATLAB / Simulink coupleur et expérimentalement en utilisant un laboratoire mis en œuvre le prototype inverseur.

Le fonctionnement du système d'entraînement de moteur à induction monophasé en utilisant le convertisseur Z-source a été démontré par Rajaei et autres (2010) par des simulations et vérifications expérimentales [11].

Un nouveau convertisseur Z-source à commutation de bobine d'inductance a été présenté par Miao Zhu et autres (2010) pour améliorer le convertisseur Z-source classique existant contrôlé en utilisant comme schéma de commutation " simple boost " et " maximum boost " [12].

Minh-Khai et autres (2011) ont proposé un nouveau convertisseur quasi Z-source à commutation de bobine d'inductance en réduisant le nombre de

composants passifs et a également réduit la contrainte de tension sur les condensateurs, et la contrainte de courant faible sur les inductances et les diodes [13].

Un convertisseur Z-source avec un type de tension à deux niveaux amélioré a été proposé par Yu Tang et autres (2011) pour les systèmes photovoltaïques autonomes utilisant la commande " simple boost " comme système de commutation [14].

La performance du convertisseur quasi Z-source alimenté en courant a été étudiée par Yang et autres chercheurs (2011) à travers la méthode de la modulation avec largeur d'impulsion de vecteur spatial modifié en blocage inverse, le convertisseur quasi Z-source alimenté en courant à base du transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) avec le prototype de laboratoire à échelle réduite [15].

Anderson et autres (2008) ont développé quatre convertisseurs quasi Z-source qui ont des avantages tels que la réduction de l'évaluation de composants, la diminution de la contrainte de la source, diminution du nombre de composants et des stratégies de contrôle simplifiées adaptées pour les contrôleurs de moteur ou les applications des énergies renouvelables [16].

Le convertisseur quasi Z-source pour les systèmes photovoltaïques de production d'électricité a été démontrée par Yuan Li et autres chercheurs (2009) avec la conception directrice par des simulations et des expériences [17].

Un convertisseur Z-source AC-DC-AC à trois niveaux avec une possibilité " buck boost " de la tension de sortie a été présenté par Poh Chiang Loh et autres (2009), en connectant un redresseur à diodes à faible coût à l'extrémité avant à un onduleur en blocage avec point neutre par un seul de réseau d'impédance LC en forme X. Pour confirmer les performances du convertisseur, des essais expérimentaux en utilisant un prototype de laboratoire construit a été effectuée [18].

Un nouveau convertisseur Z-source à neuf interrupteurs qui permet de commander l'amplitude, la fréquence et la phase des deux sorties à courant alternatif et aussi contrôler le courant des deux entrées à courant continu a été présenté par Dehghan et autres (2010).

Les performances du convertisseur proposé ont été vérifiées par la simulation et les résultats expérimentaux [19].

La méthode d'amélioration de la performance pour l'alimentation en tension du convertisseur Z-source quasi impédance a été proposé par Vinnikov et autres (2010) avec l'introduction du réseau de quasi Z-source en deux étapes par la simulation et l'installation expérimentale [20].

Zakis et autres (2011) ont présenté la simulation et les résultats expérimentaux d'un convertisseur quasi Z-source à base d'un convertisseur bidirectionnel DC/DC pour un interfaçage super condensateur. Les hypothèses théoriques ont été prouvées par les résultats de simulation de PSIM et vérifiées expérimentalement [21].

Le concept du convertisseur quasi Z-source à base des convertisseurs DC/DC isolés pour la génération de puissance distribuée a été démontrée avec les principes de fonctionnement par Vinnikov et autres (2011) grâce à des résultats expérimentaux [22].

Yu Tang et autres (2011) ont proposé une nouvelle topologie des convertisseurs Z-source monophasés avec l'entrée et la sortie qui partagent la même terre, qui était une structure simple et n'utilise que deux interrupteurs tout en gardant le rapport de transfert de tension, la même que pour l'onduleur en pont complet adoptant une stratégie de contrôle du cycle [23].

Un convertisseur Z-source modifié avec des techniques de modulation spécifiques pour réduire les courants de fuite dans les transformateurs photovoltaïques (PV) triphasés a été proposé par Fabricio Bradaschia et autres (2011). Les résultats expérimentaux des courants de fuite dans les trois phases

des convertisseurs Z-source connectés à une charge RL ont été obtenus pour valider les modèles théoriques et de simulation [24].

### 1.3.3. La commande du convertisseur Z-source

La commande " Maximum boost " a été employé pour le convertisseur Z-source pour produire la surélévation de tension maximale avec un indice de modulation donné et ses différents paramètres associés ont été analysés par Fang Zheng Peng et autres (2005) par des simulations et des vérifications expérimentales [25].

Miaosen Shen et autres (2006) ont proposé deux méthodes de contrôle de " Constant boost " pour le convertisseur Z-Source, pour obtenir un gain de tension maximale à n'importe quel indice de modulation donnée sans produire d'ondulation de basse fréquence, vérifié par la simulation et validation expérimentale [26].

Des études comparatives de simulation pour trois topologies différentes de convertisseur Z-source de type deux niveaux de tension sous quatre régimes différents de commutation à savoir, simple boost, maximum boost, maximum constant boost, et le contrôle à MLI du vecteur spatial modifié ont été effectuées par Omar Ellabban et autres (2009) avec un exemple de conception pour les véhicules électriques hybrides [27].

### 1.3.4. Onduleur "Z-source" et Hacheur "Z-source"

Généralement quand on parle d'un convertisseur "Z-source", on veut dire un onduleur "Z-source", car le but de la première utilisation c'était de booster la tension d'entrée d'un onduleur tout en éliminant l'étage du convertisseur DC/DC (Figure 1.1).

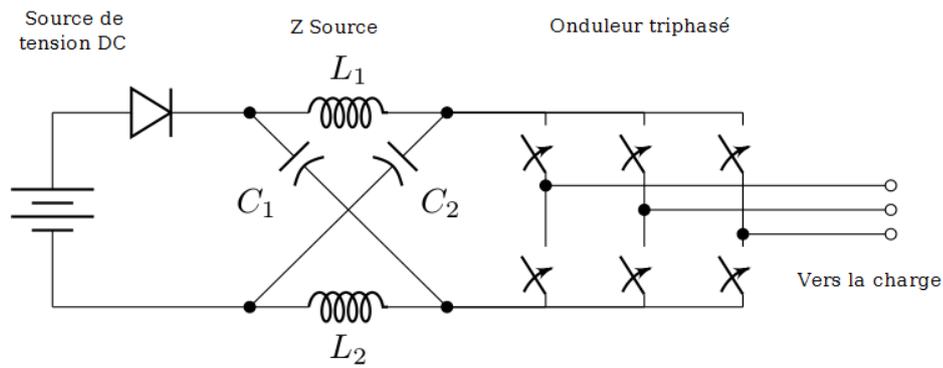


Figure 1.1 Onduleur à ZS.

Cependant, il suffit de remplacer les bras de l'onduleur par un seul interrupteur parallèle pour avoir une structure d'un hacheur boost ou buck en même temps : C'est le Hacheur "Z-source" (Figure 1.2).

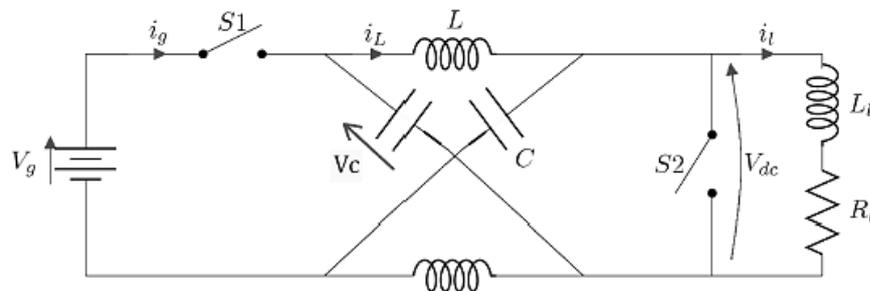


Figure 1.2 Hacheur à ZS.

#### 1.4. Conclusion

A travers la présentation de l'état de l'art, il est à constater que ce domaine intéresse de plus en plus les laboratoires de recherche afin de produire une énergie propre et durable.

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques travaux de recherches sur l'énergie solaire photovoltaïque et les convertisseurs Z-source.

Nous allons dans ce qui suit nous intéresser à l'étude des différentes topologies des convertisseurs Z-source pour les systèmes photovoltaïques.

# Chapitre 2 : Evaluation comparative des topologies existantes de l'onduleur Z-source pour les systèmes photovoltaïques

## 2.1. Introduction

Dans les systèmes solaires photovoltaïques, la variation de la tension d'entrée est due à des changements dans l'ensoleillement et la température et les topologies des onduleurs classiques de tension (VSI) connectés à ces réseaux photovoltaïques souffrent pendant les opérations de « bucking » et « boosting ». Pour remédier à cette limitation, les topologies d'onduleurs comme les onduleurs Z-source (ZSI) classiques et embarqués sont abordés dans ce chapitre.

## 2.2. Analyse de topologies existantes de l'onduleur Z-source

### 2.2.1. Introduction

L'onduleur Z-source (ZSI) utilise le réseau d'impédance (Z), la combinaison d'une paire d'éléments L & C connectés entre la source de courant continu et le circuit de l'onduleur pour obtenir un fonctionnement buck-boost. Étant donné que la source solaire photovoltaïque est une source de tension variable, le réseau d'impédance ajoutée modifie la configuration du circuit d'une source de tension à une source d'impédance. Le réseau Z-source est l'élément de stockage / de filtrage d'énergie pour ZSI et le but de 'L' est de limiter l'ondulation du courant à travers les dispositifs en mode boost avec l'état shoot-through et 'C' est utilisée pour absorber l'ondulation du courant et de maintenir une tension relativement constante, pour maintenir la tension sinusoïdale de sortie.

Quand le réseau Z est ajouté à l'onduleur, il permet aux interrupteurs de toute branche d'une phase d'activer simultanément avec la diode D naturellement polarisée en inverse. L'onduleur Z-source utilise l'état shoot-through pour survolter la tension continue d'entrée des interrupteurs de l'onduleur, lorsque les deux interrupteurs d'une même branche de phase sont

activés pour effectuer un court-circuit au bus dc. L'état shoot-through de l'onduleur ne se traduit pas par un courant élevé en raison de l'action de limitation introduite par l'inductance fondue du circuit Z-source, et donc il ne sera pas causer des dommages aux interrupteurs à semi-conducteurs.

L'onduleur ZSI a 9 états de commutation. Dont, 6 sont des états actifs, lorsque la tension DC est connectée à la charge en trois phases et 2 états zéro, lorsque les bornes de charge sont court-circuitées par le biais soit inférieur ou supérieur des trois dispositifs de commutation, respectivement. Le neuvième état, l'état shoot-through (ST) se produit, lorsque les bornes de la charge sont court-circuitées par les deux dispositifs de commutation supérieure et inférieure de toute branche de phase. Etat ST peut aussi être appelé comme "troisième état zéro" qui peut être obtenu par l'un quelconque des 7 façons.

1. ST via toute phase.
2. Combinaisons de deux branches de phase.
3. Tous les trois branches de phase.

ZSI est responsable à l'élévation de la tension et aussi le suivi de la MPP. ZSI peut augmenter la tension d'entrée par un facteur pratique de 1,5 à 2, sans sacrifier le rendement, réduire les coûts et le nombre de composants.

Les topologies de l'onduleur Z-source peuvent être classées en fonction de l'emplacement des sources à courant continu, et le nombre d'interrupteurs qu'il emploie. Fondamentalement, il est classé en 3 types comme suit :

1. Dans les topologies traditionnelles comme nous le verrons dans les sections 2.2.2 et 2.2.3, où la source de courant continu d'entrée est en série avec la diode, de sorte que le courant prélevé il peut être haché, et il faut un filtre LC externe pour le lissage.
2. Les topologies embarquées comme discuté dans les sections 2.2.4.1 et 2.2.4.2, où les courants tirés à partir des sources d'entrée DC sont lissées implicitement, et également présentant les caractéristiques comme moindre contrainte de tension aux bornes de C1 et C2. Si l'une des sources

est retirée, elle conduit à des contraintes de tension asymétrique et le partage du courant entre L & C.

3. Les topologies embarquées avec des tensions au bus continu comme on le verra dans les sections 2.2.4.3 et 2.2.4.4, où les sources de courant continu sont en série avec le pont de l'onduleur ce qui rend le courant consommé par eux haché naturellement. Il présente de faibles contraintes de tension aux bornes de C1 et C2.

### 2.2.2. Onduleur Z-source à deux niveaux

Un onduleur Z-source à deux niveaux est représenté sur la figure 2.1, avec six interrupteurs qui peuvent abaisser / élever la tension d'entrée en courant continu introduite dans le réseau Z- source constitué de valeurs égales de L et C à travers une diode en série. N'importe quelle méthode de commande comme la MLI classique, la commande simple boost, la MLI vectorielle peuvent être adoptées pour contrôler les six interrupteurs de l'onduleur. Ici, un circuit de filtrage serait ajoutée si nécessaire entre la source et le réseau d'impédance pour fournir une puissance en courant continu lisse au réseau afin d'obtenir de meilleures caractéristiques du système avant la charge.

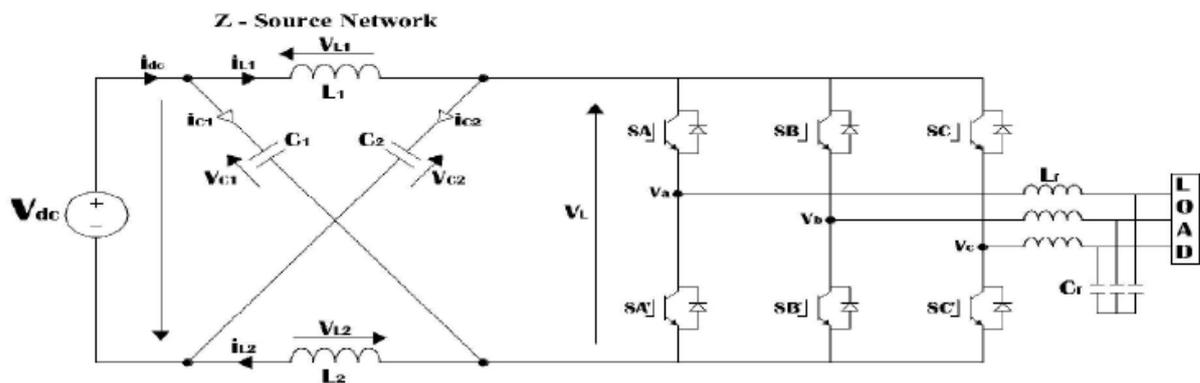


Figure 2.1 Onduleur Z-source à deux niveaux [28].

Les expressions de gain obtenues sous différents états de commutation par Poh Chiang Loh et autres [28] sont les suivants :

- ◆ Shoot-through ( $S_x = S_x'$  ON,  $x = A, B, \text{ ou } C; D$  OFF)

$$v_L = V_C; v_i = 0; v_d = 2V_C; v_D = V_{dc} - 2V_C \quad (2.1)$$

$$i_L = -i_C ; i_i = i_L - i_C ; i_{dc} = 0 \quad (2.2)$$

- ◆ Non shoot-through ( $Sx \neq Sx'$ ,  $x = A, B$ , ou  $C$ ;  $D$  ON)

$$v_L = V_{dc} - V_C ; v_i = 2V_C - V_{dc} ; v_d = V_{dc} ; v_D = 0 \quad (2.3)$$

$$i_{dc} = i_L + i_C ; i_i = i_L - i_C ; i_{dc} \neq 0 \quad (2.4)$$

L'espace d'état en moyenne sur (Équation 2.1) et (Équation 2.3) donne :

- ◆ La tension aux bornes du condensateur  $V_C = \frac{1-D}{1-2D} V_{dc}$
- ◆ Le pic de la tension de bus dc :  $\hat{v}_l = \frac{V_{dc}}{1-2D} = BV_{dc}$  (2.5)
- ◆ Le pic de la tension alternative de sortie :  $\hat{v}_x = M \frac{\hat{v}_l}{2} = BM \left( \frac{V_{dc}}{2} \right)$

Avec  $D = \frac{T_0}{T}$  se réfère au rapport de shoot-through,  $M$  est le taux de modulation et  $B$  est le facteur de survoltage.

- ◆ La tension de blocage de la diode est donnée par :  $V_D = -\frac{V_{dc}}{1-2D}$
- ◆ La tension de bus dc est donnée par :
  1.  $V_L = \frac{1-D}{1-2D} V_{dc}$  durant le shoot-through.
  2.  $V_L = -\frac{D}{1-2D} V_{dc}$  durant le non shoot-through.

### 2.2.3. Onduleur Z-source à trois niveaux

Un onduleur Z-source à trois niveaux est formé en connectant un réseau LC à un onduleur de blocage à point neutre comme représenté sur la figure 2.2. Ce fonctionnement est le même que celle de l'onduleur NPC conventionnel, mais une tension supplémentaire d'amplification est obtenue grâce à la présence du réseau Z-source. L'inclusion d'interrupteurs supplémentaires a ajouté des avantages par rapport à la ZSI à deux niveaux comme l'augmentation de l'efficacité et la source d'entrée double qui favoriserait l'onduleur pour les applications photovoltaïques.

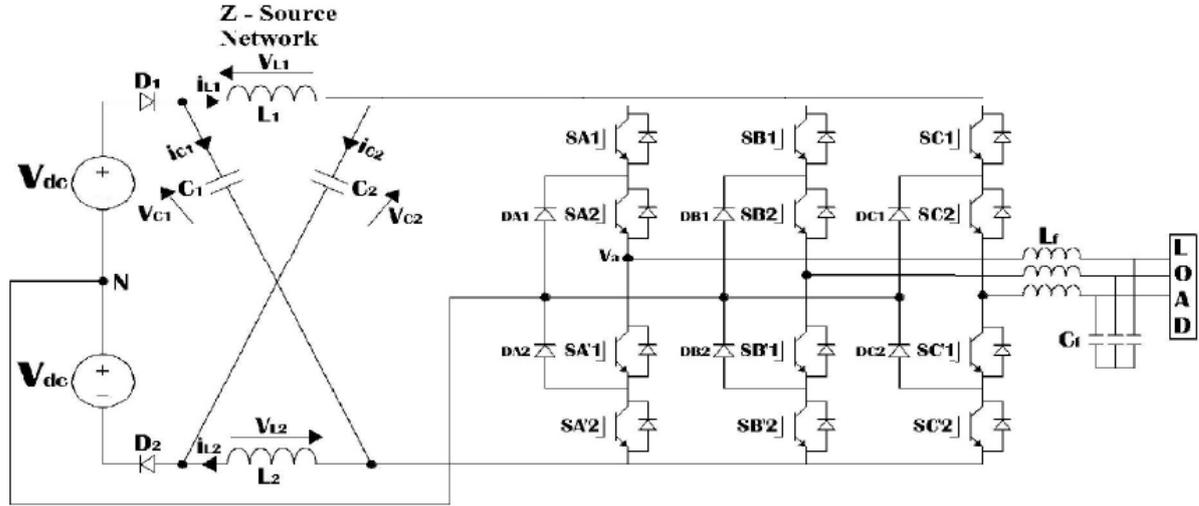


Figure 2.2 Onduleur Z-source à trois niveaux [28].

De même, les équations de cet onduleur peuvent être déduites de [28] :

◆ Shoot-through complète (FST)

( $S_{x1} = S_{x2} = S_{x'1} = S_{x'2}$  ON,  $x = A, B,$  ou  $C$ ;  $D1=D2$  OFF)

$$v_L = V_C; v_i = 0; v_D = V_{dc} - V_C \quad (2.6)$$

$$i_L = -i_C; i_i = i_L - i_C; i_{dc} = 0 \quad (2.7)$$

◆ Shoot-through supérieur (UST)

( $S_{x1} = S_{x2} = S_{x'1} = D_{x2}$  ON,  $x = A, B,$  ou  $C$ ;  $D1$  ON  $D2$  OFF)

$$v_L = V_{dc}; v_i = V_C - V_{dc}; v_D = V_{dc} - V_C \quad (2.8)$$

◆ Shoot-through inférieur (LST)

( $S_{x2} = S_{x'1} = S_{x'2} = D_{x1}$  ON,  $x = A, B,$  ou  $C$ ;  $D1$  OFF  $D2$  ON)

$$v_L = V_{dc}; v_i = V_C - V_{dc}; v_D = V_{dc} - V_C \quad (2.9)$$

◆ Non shoot-through

( $S_{x1} \neq S_{x'1}, S_{x2} \neq S_{x'2}$  ON,  $x = A, B,$  ou  $C$  ;  $D1=D2$  ON)

$$v_L = 2V_{dc} - V_C; v_i = 2V_C - 2V_{dc}; v_D = 0 \quad (2.10)$$

$$i_{dc} = i_L + i_C; i_i = i_L - i_C; i_{dc} \neq 0 \quad (2.11)$$

Donc les relations entre les différentes tensions pour l'état FST sont données comme suit :

$$\begin{aligned}
\blacklozenge \quad V_C &= \frac{1-D}{1-2D} 2V_{dc} \\
\blacklozenge \quad \hat{v}_i &= \frac{2V_{dc}}{1-2D} = 2BV_{dc} \\
\blacklozenge \quad \hat{v}_x &= M \frac{\hat{v}_i}{2} = B(MV_{dc}) \\
\blacklozenge \quad V_D &= -\frac{V_{dc}}{1-2D} \\
\blacklozenge \quad V_L &= \frac{1-D}{1-2D} 2V_{dc} \quad \text{durant le shoot-through.} \\
\blacklozenge \quad V_L &= -\frac{D}{1-2D} 2V_{dc} \quad \text{durant le non shoot-through.}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Les relations entre les différentes tensions pour l'état ULST sont données comme suit :

$$\begin{aligned}
\blacklozenge \quad V_C &= \frac{1-D'}{1-D'} 2V_{dc} \\
\blacklozenge \quad \hat{v}_i &= \frac{2V_{dc}}{1-2D'} = 2B'V_{dc} \\
\blacklozenge \quad \hat{v}_x &= M \frac{\hat{v}_i}{2} = MB'V_{dc} \\
\blacklozenge \quad V_D &= -\frac{V_{dc}}{1-D'} \\
\blacklozenge \quad V_L &= V_{dc} \quad \text{durant le shoot-through supérieur ou inférieur.} \\
\blacklozenge \quad V_L &= -\frac{D'}{1-D'} V_{dc} \quad \text{durant le non shoot-through supérieur ou inférieur.}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Avec  $D' = \frac{T'_0}{T}$

L'ondulation du courant inductif dans le réseau d'impédance est inférieure à celle obtenue à partir de ses tranches pour les deux régimes durant l'intervalle du shoot-through est donnée par :

$$\frac{\Delta I_L(ULST)}{\Delta I_L(FST)} = \frac{T'_0(1 - 2\frac{T_0}{T})}{2(1 - \frac{T_0}{T})T_0} \times \frac{1 - 2\frac{T_0}{T}}{1 - \frac{T_0}{T}} \leq 1$$

$$\text{Pour } \frac{T_0}{T} = \frac{T'_0}{2T} \leq 0.5$$

Les onduleurs Z-source à deux niveaux et à trois niveaux ont une forme d'onde moins lisse. Cependant, l'onduleur NPC présente de nombreux avantages et peut

également donner une forme d'onde lisse en raison de l'augmentation du nombre d'interrupteurs. En outre, il est à noter qu'il y a une présence de la puissance de sortie même quand une entrée tombe en panne.

#### **2.2.4. Onduleur Z-source embarqué**

Les perspectives dans les topologies d'onduleur Z-source ont conduit au développement d'une nouvelle famille de ZSI appelé onduleurs Z-source embarqués qui peuvent produire le même gain en tension des onduleurs Z-source classiques. Il peut en outre être classé en onduleurs Z-source embarqué et embarqué au bus dc pour avoir de meilleures caractéristiques. Les différences dans ces topologies se situent dans la localisation et l'amplitude des sources de courant continu appliquées en entrée à ces onduleurs. La description de l'onduleur Z-source embarqué et embarqué au bus dc à deux niveaux et à trois niveaux est présentée avec leurs expressions de tension correspondantes.

##### **2.2.4.1. Onduleur Z-source embarqué à deux niveaux**

Un onduleur Z-source embarqué à deux niveaux, comme indiqué sur la figure (2.3) où les sources de courant continu sont embarquées dans le réseau d'impédance LC en forme de X avec ses éléments inductifs L1 et L2. Les sources isolées peuvent simplement être obtenues en redirigeant les panneaux photovoltaïques existants ou unités de cellules déjà nécessaires dans la production de la tension requise et les courants nominaux.

Même si l'une des sources ne parvient pas à alimenter l'énergie au système pendant les périodes de coupures ou des conditions de défaut, le fonctionnement continu est possible par injection de courant à partir de l'autre source.

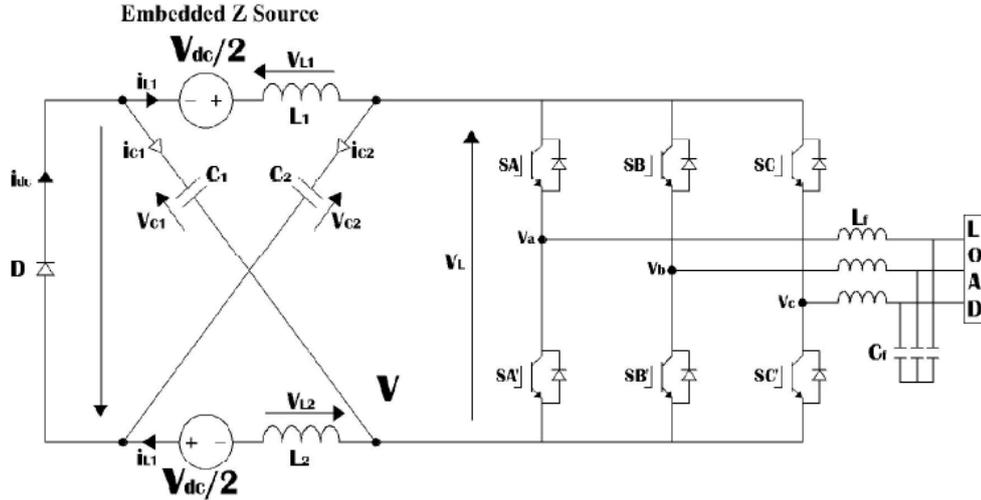


Figure 2.3 Onduleur Z-source embarqué à deux niveaux [28].

L'analyse de cet onduleur donne les équations suivantes à partir de [28] :

- ◆ Shoot-through ( $S_x = S_x'$  ON,  $x=A, B, \text{ ou } C$ ;  $D$  OFF)

$$v_L = V_C + \frac{V_{dc}}{2}; v_i = 0; v_d = V_D - 2V_C \quad (2.14)$$

$$i_L = -i_C; i_i = i_L - i_C; i_{dc} = 0 \quad (2.15)$$

- ◆ Non shoot-through ( $S_x \neq S_x'$ ,  $x=A, B, \text{ ou } C$ ;  $D$  ON)

$$v_L = \frac{V_{dc}}{2} - V_C; v_i = 2V_C; v_d = V_D = 0 \quad (2.16)$$

$$i_{dc} = i_L + i_C; i_i = i_L - i_C; i_{dc} \neq 0 \quad (2.17)$$

Donc les relations entre les différentes tensions sont données comme suit :

- ◆  $V_C = \frac{V_{dc}/2}{1-2D}$
- ◆  $\hat{v}_i = \frac{V_{dc}}{1-2D} = BV_{dc}$
- ◆  $\hat{v}_x = M \frac{\hat{v}_i}{2} = B(M \frac{V_{dc}}{2}) \quad (2.18)$
- ◆  $V_D = -\frac{V_{dc}}{1-2D}$
- ◆  $V_L = \frac{1-D}{1-2D} V_{dc}$  durant le shoot-through.
- ◆  $V_L = -\frac{D}{1-2D} V_{dc}$  durant le non shoot-through.

### 2.2.4.2. Onduleur Z-source embarqué à trois niveaux

Un onduleur Z-source embarqué à trois niveaux avec 12 interrupteurs d'un onduleur de blocage à point neutre est un meilleur choix pour gérer deux sources comme le montre la Figure 2.4, qui ont le même fonctionnement que celui de l'onduleur Z-source à trois niveaux, comme décrit dans la section 2.1.2.

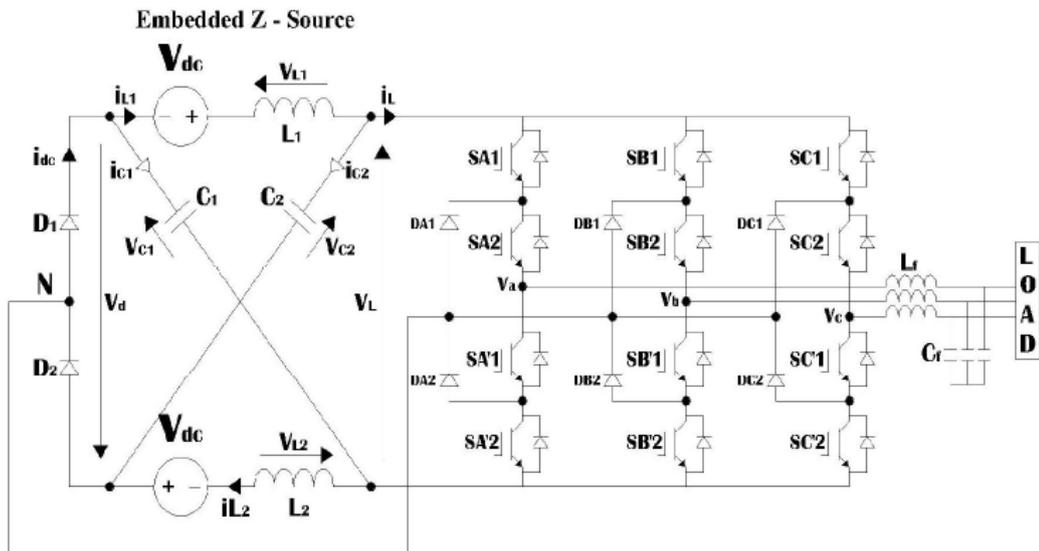


Figure 2.4 Onduleur Z-source embarqué à trois niveaux [28].

Les équations de performance de ce type de ZSI sont les suivantes [28] :

- ◆ Shoot-through complète (FST)

( $S_{x1} = S_{x2} = S_{x'1} = S_{x'2}$  ON,  $x = A, B, \text{ ou } C$ ;  $D1=D2$  OFF)

$$v_L = V_C + V_{dc}; v_i = 0; v_d = 2V_D - 2V_C \quad (2.19)$$

$$i_L = i_C; i_i = i_L - i_C; i_{dc} = 0 \quad (2.20)$$

- ◆ Shoot-through supérieur (UST)

( $S_{x1} = S_{x2} = S_{x'1} = D_{x2}$  ON,  $x = A, B, \text{ ou } C$ ;  $D1$  ON  $D2$  OFF)

$$v_L = V_{dc}; v_i = V_C; v_d = V_D - V_C \quad (2.21)$$

- ◆ Shoot-through inférieur (LST)

( $S_{x2} = S_{x'1} = S_{x'2} = D_{x1}$  ON,  $x = A, B, \text{ ou } C$ ;  $D1$  OFF  $D2$  ON)

$$v_L = V_{dc}; v_i = V_C; v_d = V_D - V_C \quad (2.22)$$

◆ Non shoot-through

( $S_{x1} \neq S_{x'1}$ ,  $S_{x2} \neq S_{x'2}$  ON,  $x = A, B$ , ou  $C$  ;  $D_1 = D_2$  ON)

$$v_L = V_{dc} - V_C; v_i = 2V_C; v_D = 0 \quad (2.23)$$

$$i_{dc} = i_L + i_C; i_i = i_L + i_C; i_{dc} \neq 0 \quad (2.24)$$

Donc les relations entre les différentes tensions pour l'état FST sont données comme suit :

$$\begin{aligned} \diamond V_C &= \frac{1}{1-2D} V_{dc} \\ \diamond \hat{v}_i &= \frac{2V_{dc}}{1-2D} = 2BV_{dc} \\ \diamond \hat{v}_x &= M \frac{\hat{v}_i}{2} = BMV_{dc} \\ \diamond V_D &= -\frac{V_{dc}}{1-2D} \\ \diamond V_L &= \frac{1-D}{1-2D} 2V_{dc} \quad \text{durant le shoot-through.} \\ \diamond V_L &= -\frac{D}{1-2D} 2V_{dc} \quad \text{durant le non shoot-through.} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Les relations entre les différentes tensions pour l'état ULST sont données comme suit :

$$\begin{aligned} \diamond V_C &= \frac{1}{1-D'} V_{dc} \\ \diamond \hat{v}_i &= \frac{2V_{dc}}{1-2D'} = 2B'V_{dc} \\ \diamond \hat{v}_x &= M \frac{\hat{v}_i}{2} = MB'V_{dc} \\ \diamond V_D &= -\frac{V_{dc}}{1-D'} \\ \diamond V_L &= V_{dc} \quad \text{durant le shoot-through supérieur ou inférieur.} \\ \diamond V_L &= -\frac{D'}{1-D'} V_{dc} \quad \text{durant le non shoot-through supérieur ou inférieur.} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Avec  $D' = \frac{T'_{0}}{T}$ .

### 2.2.4.3. Onduleur Z-source embarqué au bus dc à deux niveaux

Les sources de courant continu sont maintenant embarqués dans le bus dc de l'onduleur comme le montre la figure 2.5, dite onduleur Z-source embarqué au bus dc.

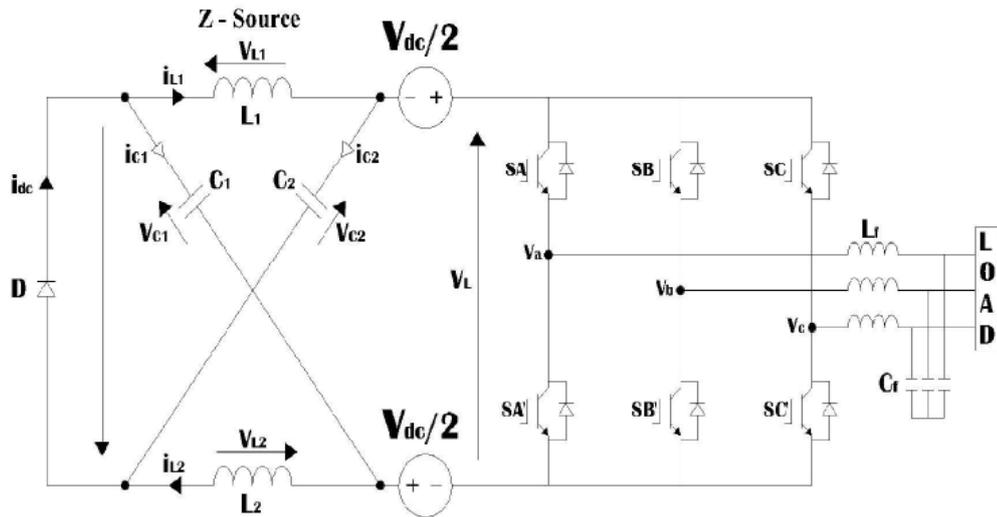


Figure 2.5 Onduleur Z-source embarqué au bus dc à deux niveaux [28].

Le fonctionnement de ces onduleurs est basé sur le principe que celui de l'onduleur Z-source embarqué, comme expliqué dans la section 2.2.

La tension du condensateur de cet onduleur est donnée par :

$$V_C = \frac{D}{1-2D} V_{dc} \tag{2.27}$$

#### 2.2.4.4. Onduleur Z-source embarqué au bus dc à trois niveaux

Cet onduleur ne distingue pas largement de l'onduleur Z-source embarqué au bus dc à deux niveaux sauf l'inclusion d'interrupteurs supplémentaires dans le circuit comme représenté sur la figure 2.6.

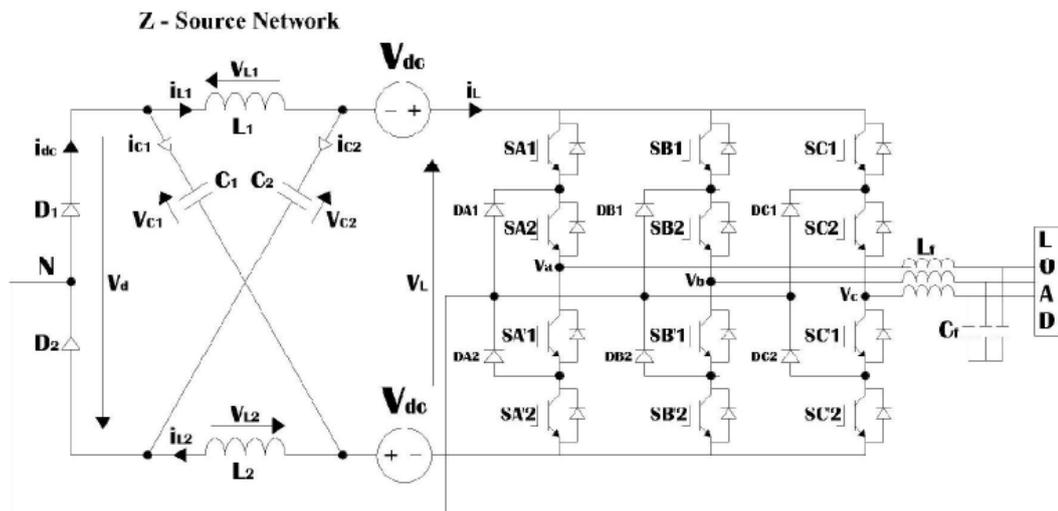


Figure 2.6 Onduleur Z-source embarqué au bus dc à trois niveaux [28].

La tension de condensateur pour différents états est donnée comme suit :

$$V_{C(FST)} = \frac{D}{1-2D} 2V_{dc} \quad \text{et} \quad V_{C(ULST)} = \frac{D'}{1-D'} V_{dc} \quad (2.28)$$

### 2.3. Simulation et validation des différents systèmes

La commande utilisée pour la simulation est la commande simple boost.

Le tableau (2.1) résume les paramètres du système choisis pour la simulation.

| $V_g$ (V) | L (mH) | C (mF) | $f_{ref}$ (Hz) | $f_p$ (Hz) | $V_p$ | M   | B   | $R_{ch}$ ( $\Omega$ ) |
|-----------|--------|--------|----------------|------------|-------|-----|-----|-----------------------|
| 100       | 1.5    | 1      | 50             | 5000       | 0.7   | 0.7 | 2.5 | 200                   |

Table 2.1 Données de simulation en boucle ouverte.

| $L_f$ (mH) | $C_f$ (mF) | $f_{coupure}$ (Hz) |
|------------|------------|--------------------|
| 3          | 0.5        | 130                |

Table 2.2 Caractéristiques du filtre.

#### 2.3.1. Onduleur Z-source à deux niveaux

Nous illustrons l'architecture du système étudié sur la figure (2.7).

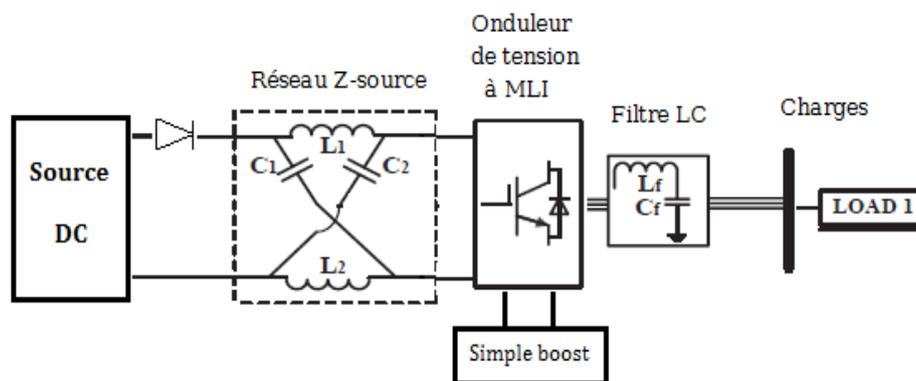


Figure 2.7 Architecture de l'onduleur Z-source à deux niveaux.

#### ◆ Résultats de simulation

La figure (2.8) montre la modulation, les signaux d'attaque pour les six commutateurs et les signaux ST du procédé de commande simple boost.

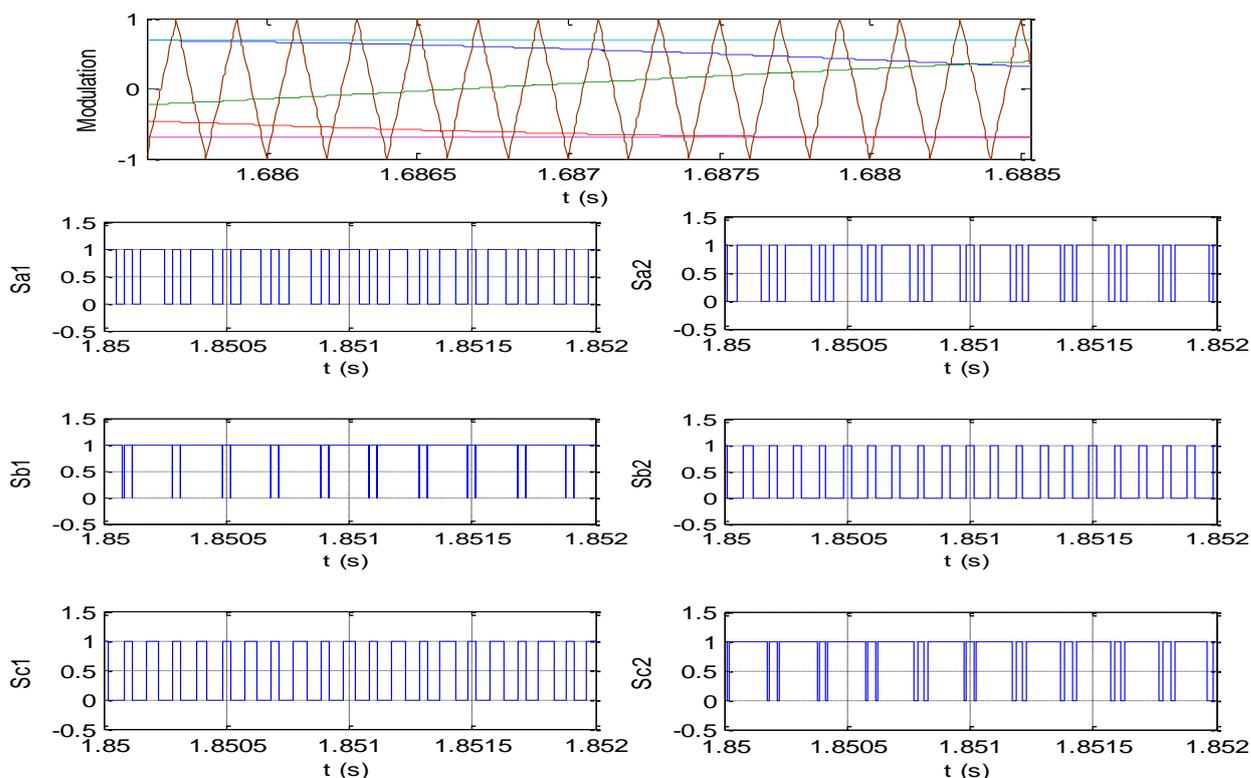


Figure 2.8 Principe de fonctionnement de la MLI triangulo-sinusoidale.

Les résultats de simulation de la commande simple boost du système de conversion d'énergie sont représentés aux figures (2.9) à (2.14).

Ces résultats ont été obtenus en imposant la valeur max  $D=0.3$  qui donne une tension simple à la sortie de l'onduleur de valeur maximale calculée comme suit :

$$V_{an} = M * B * \frac{V_g}{2} = 0.7 * 2.5 * \frac{100}{2} = 87.5 V$$

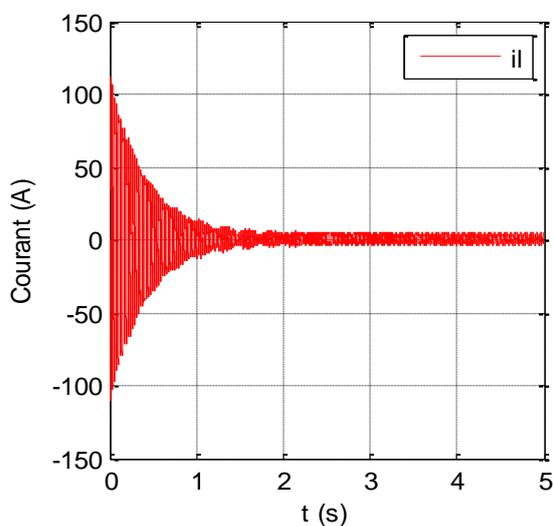


Figure 2.9 Courant passant par l'inductance.

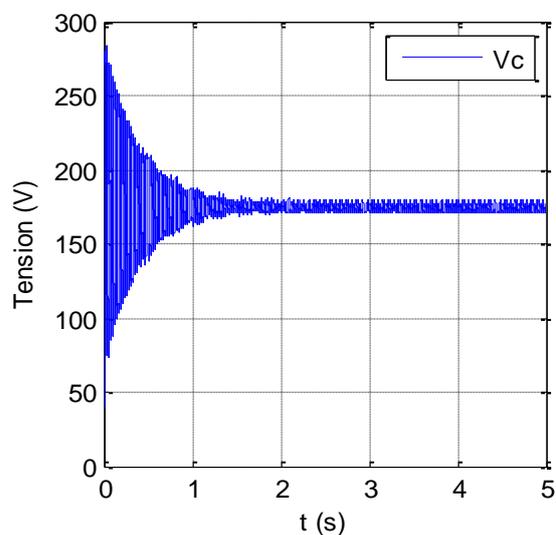


Figure 2.10 Tension aux bornes du condensateur.

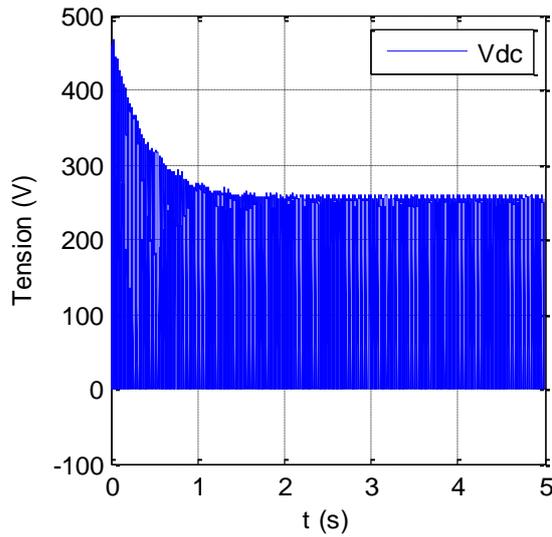


Figure 2.11 Tension de bus continu.

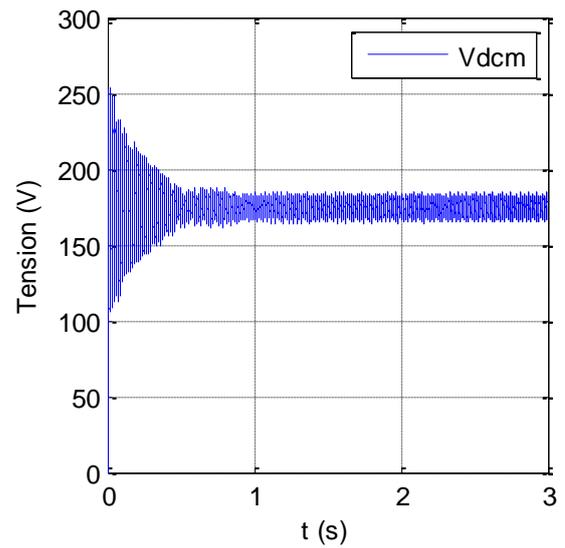


Figure 2.12 Tension moyenne de bus continu.

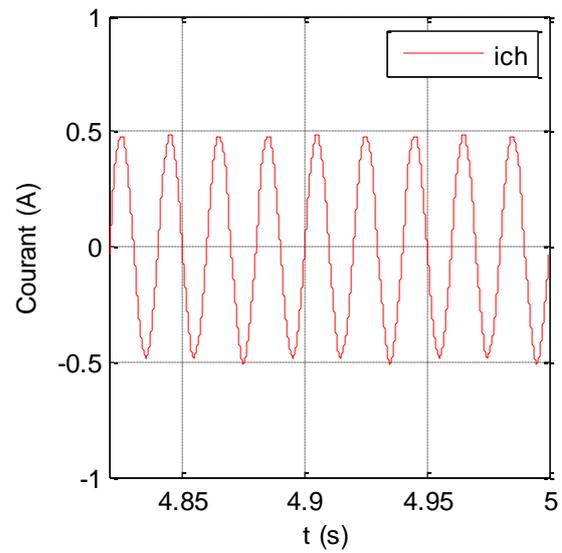
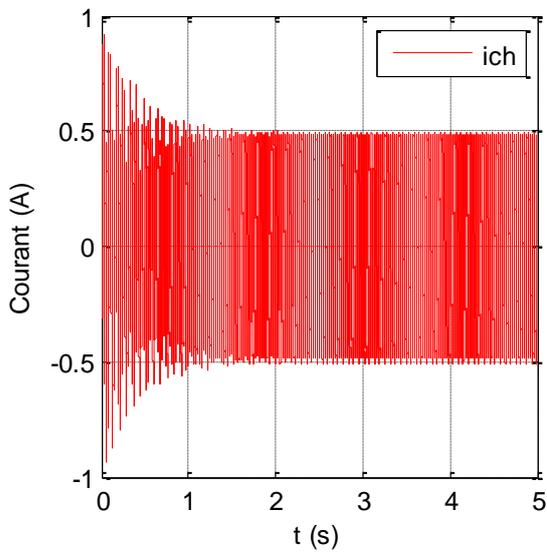


Figure 2.13 Courant de la charge et son zoom.

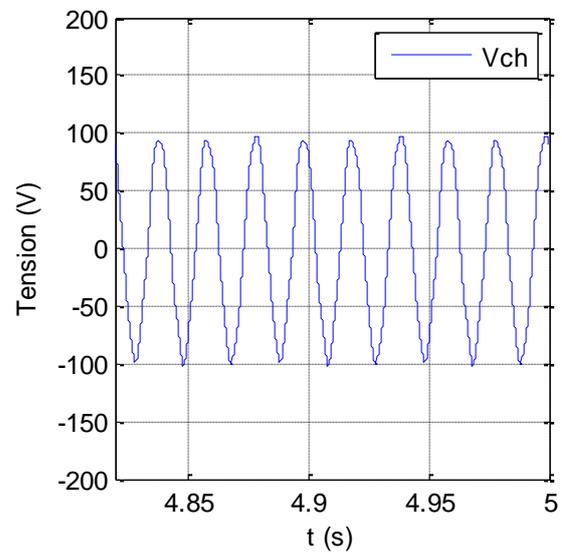
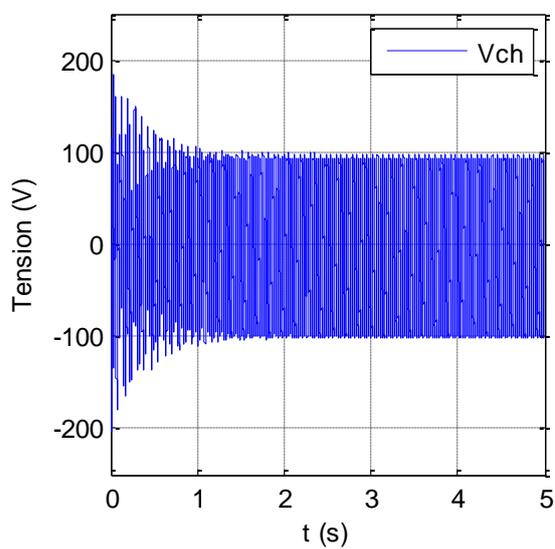


Figure 2.14 Tension de la charge et son zoom.

Dans la figure (2.13), les courants de ligne ont une valeur maximale de 0.44 A, ce qui peut être calculée comme suit :  $I = \frac{V}{Z} = \frac{87.5}{200} = 0.44 \text{ A}$ .

### 2.3.2. Onduleur Z-source embarqué à deux niveaux

Nous illustrons l'architecture du système étudié sur la figure (2.15).

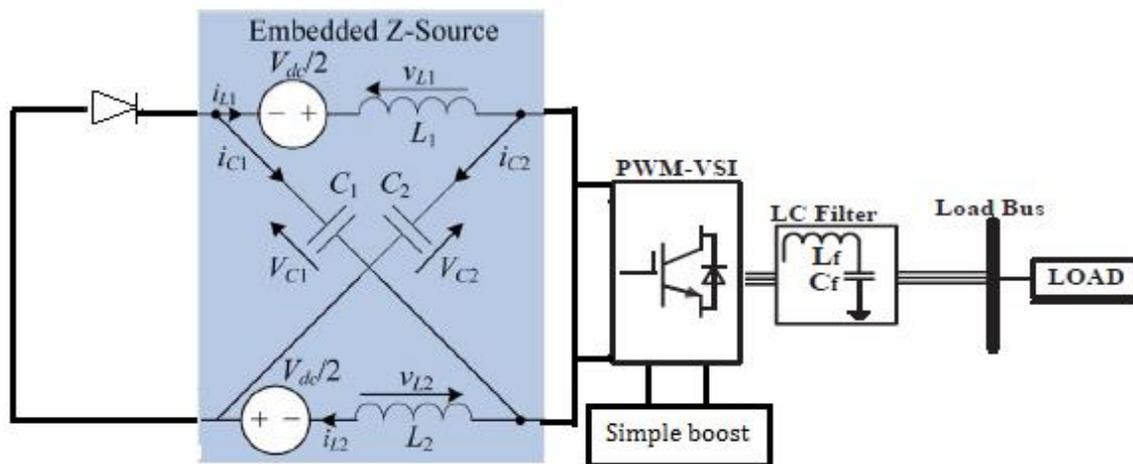


Figure 2.15 Architecture de l'onduleur Z-source embarqué à deux niveaux.

#### ◆ Résultats de simulation

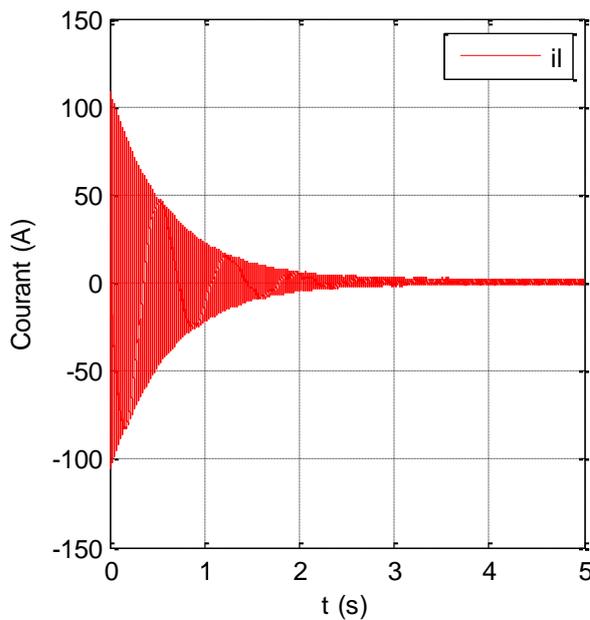


Figure 2.16 Courant passant par l'inductance.

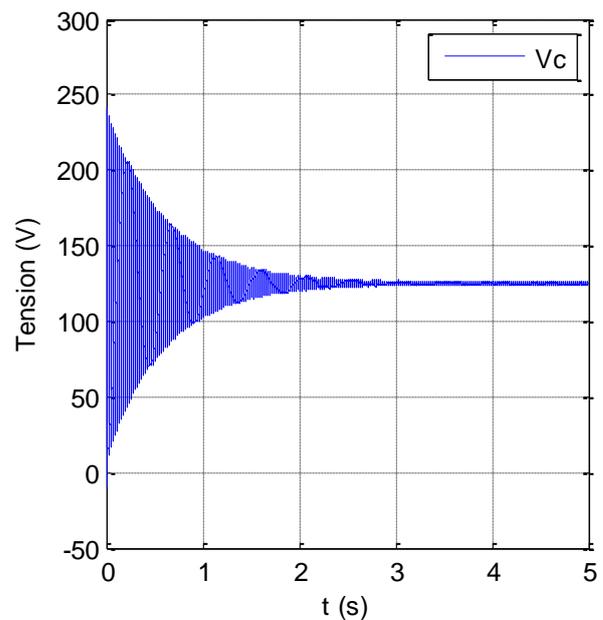


Figure 2.17 Tension aux bornes du condensateur.

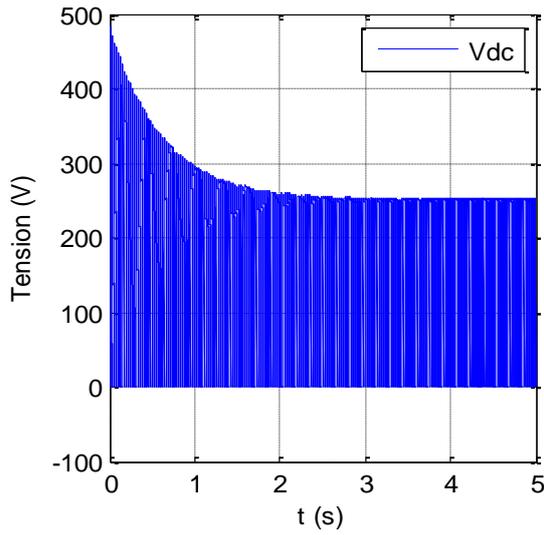


Figure 2.18 Tension de bus continu.

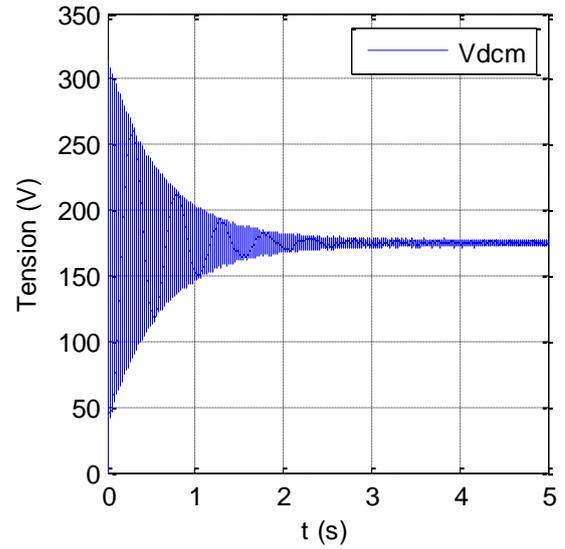


Figure 2.19 Tension moyenne de bus continu.

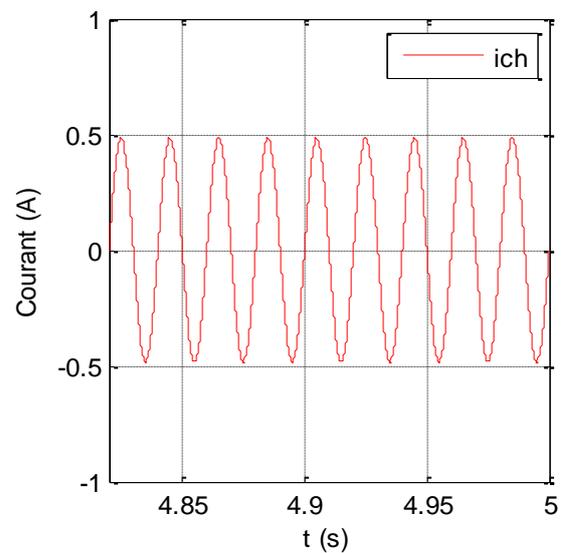
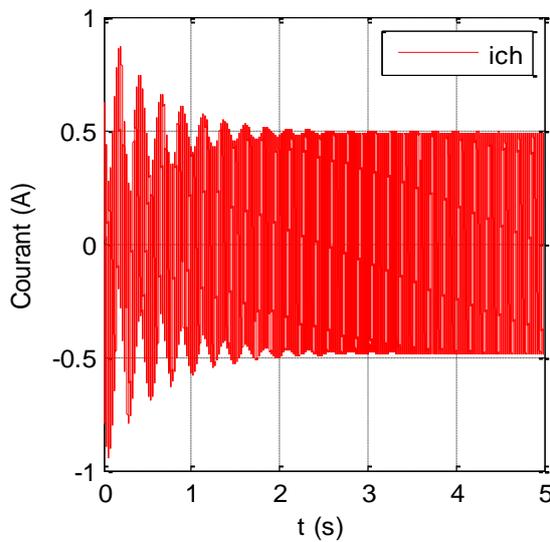


Figure 2.20 Courant de la charge et son zoom.

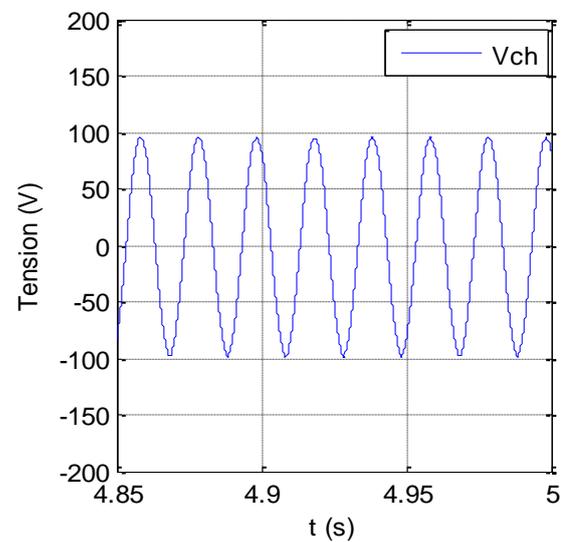
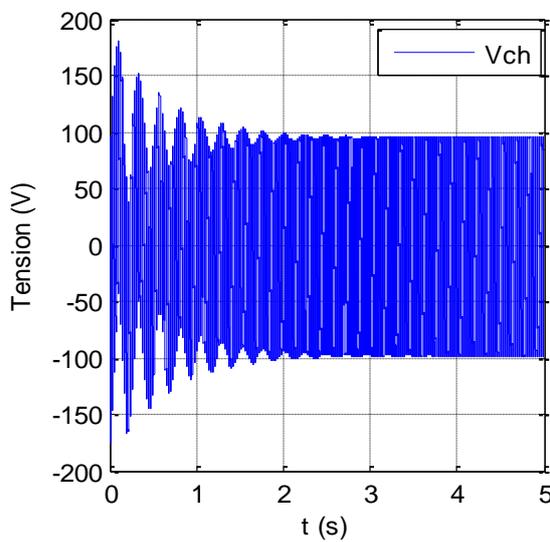


Figure 2.21 Tension de la charge et son zoom.

### 2.3.3. Onduleur Z-source embarqué au bus dc à deux niveaux

Nous illustrons l'architecture du système étudié sur la figure (2.22).

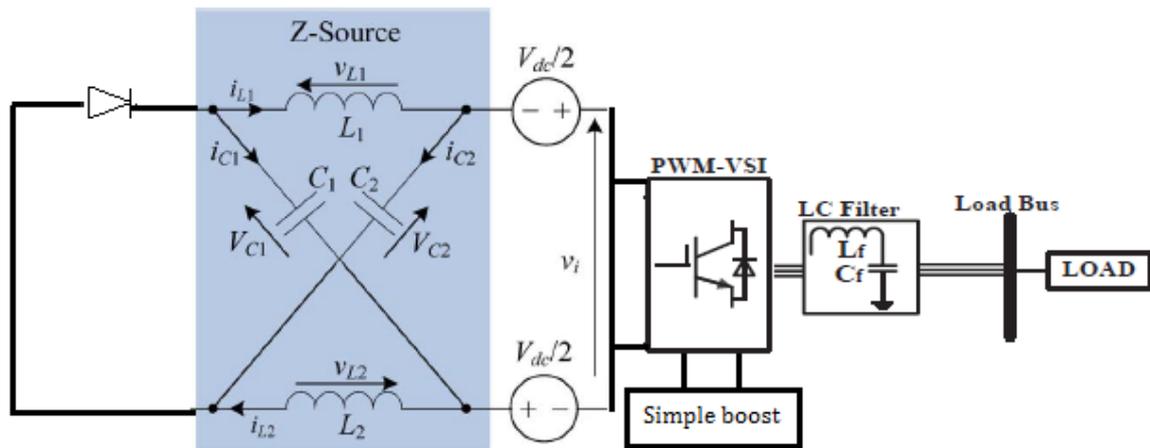


Figure 2.22 Architecture de l'onduleur Z-source embarqué au bus dc à deux niveaux.

#### ◆ Résultats de simulation

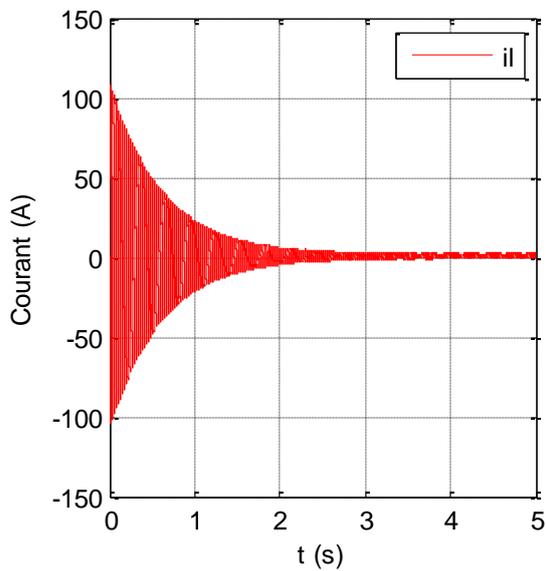


Figure 2.23 Courant passant par l'inductance.

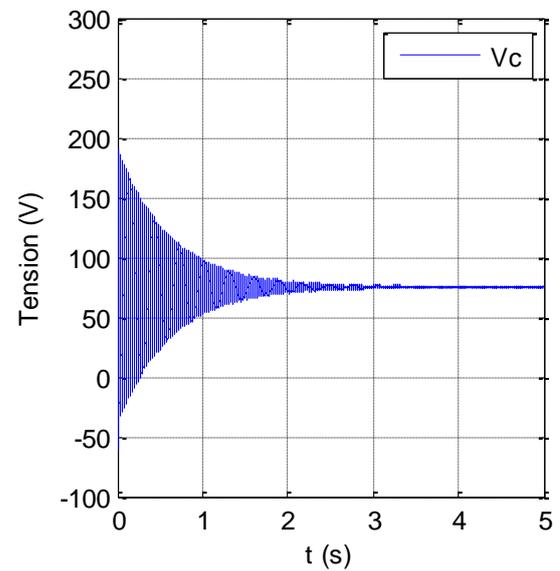


Figure 2.24 Tension aux bornes du condensateur.

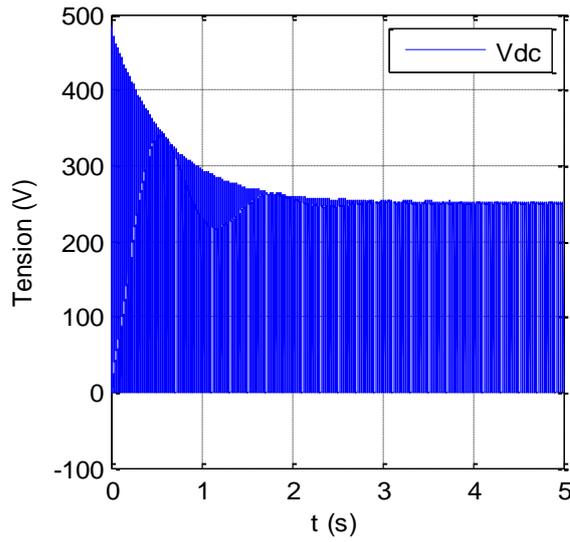


Figure 2.25 Tension de bus continu.

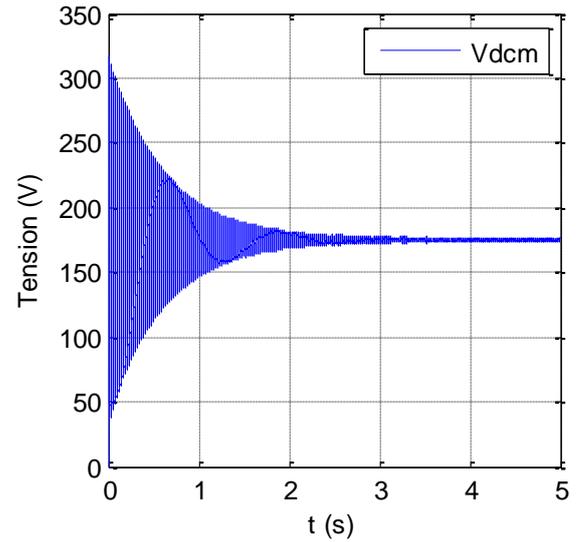


Figure 2.26 Tension moyenne de bus continu.

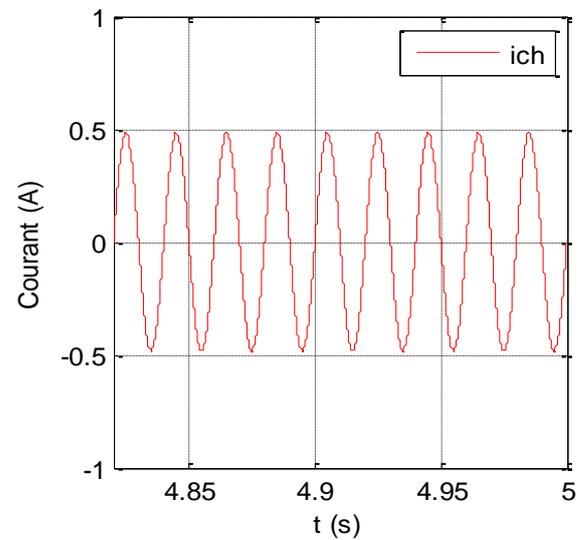
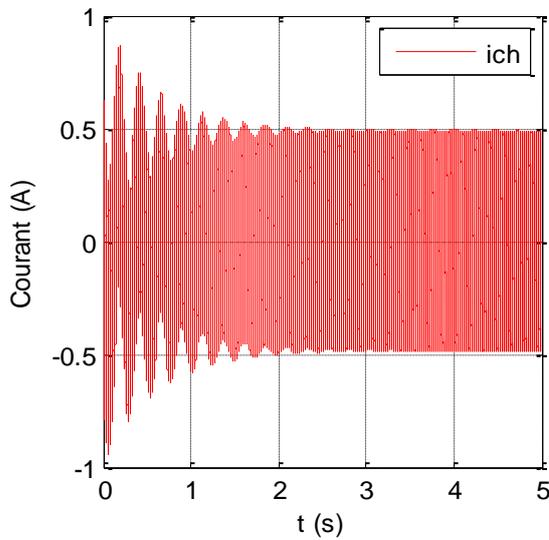


Figure 2.27 Courant de la charge et son zoom.

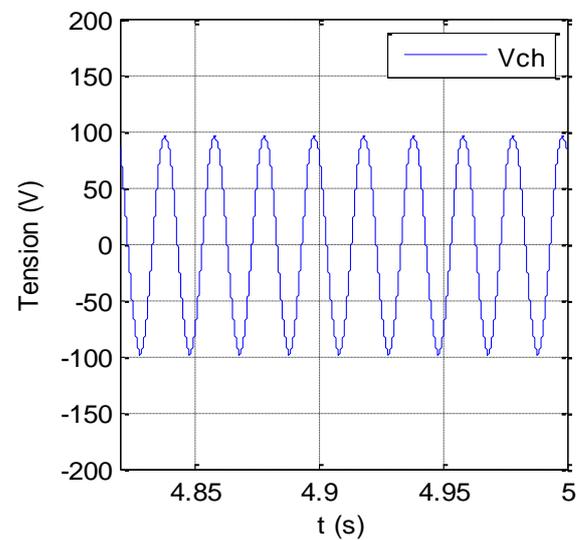
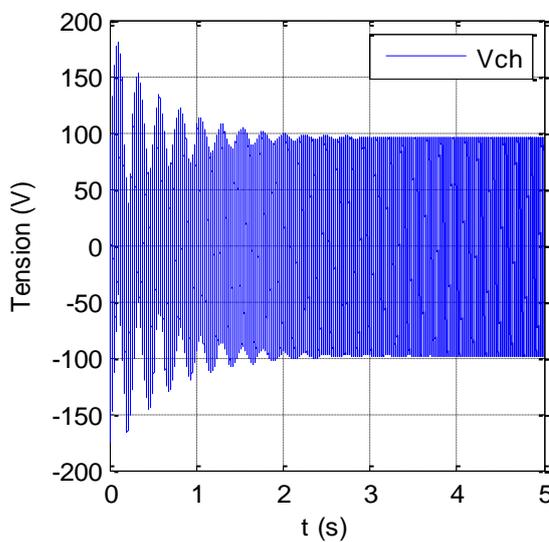


Figure 2.28 Tension de la charge et son zoom.

## 2.4. Interprétations

Plus précisément, les simulations effectuées révèlent ce qui suit :

- ◆ L'onduleur Z-source embarqué a une meilleure capacité d'amplification de tension avec une forme d'onde lisse en comparaison avec les onduleurs de tension classiques.
- ◆ Le choix de l'inductance  $L$  et la capacité  $C$  est important la possibilité de survoltage de l'onduleur Z-source.
- ◆ L'onduleur Z-source peut recevoir les entrées de différentes valeurs de l'installation PV donnée et produisent la même sortie avec moins de distorsion harmonique totale.
- ◆ Les topologies récentes des onduleurs Z-source manipulés deux ou plusieurs sources de façon indépendante et envoi de l'énergie à la charge, même en défaillance de l'une des sources.

## 2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé brièvement quelques topologies des onduleurs Z-source utilisées dans les systèmes photovoltaïques.

Ensuite, on a simulé trois topologies des onduleurs Z-source à deux niveaux qui sont l'onduleur Z-source, l'onduleur Z-source embarqué et l'onduleur Z-source embarqué au bus dc pour voir la différence entre les trois onduleurs et extraire les avantages et les inconvénients de chacun des trois.

# Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une tentative pour arriver à des topologies de convertisseurs Z-source les plus appropriées.

On a donc, commencé par une présentation de l'état de l'art sur les travaux de recherches du système photovoltaïque et du convertisseur Z-source.

Dans le chapitre 2, les différentes topologies de l'onduleur Z-source utilisées dans les systèmes photovoltaïques sont détaillées :

- ◆ Onduleur Z-source à deux niveaux.
- ◆ Onduleur Z-source à trois niveaux.
- ◆ Onduleur Z-source embarqué à deux niveaux.
- ◆ Onduleur Z-source embarqué à trois niveaux.
- ◆ Onduleur Z-source embarqué au bus dc à deux niveaux.
- ◆ Onduleur Z-source embarqué au bus dc à trois niveaux.

On a terminé par la simulation des différents systèmes d'onduleur Z-source à deux niveaux pour conclure les avantages de chaque convertisseur par rapport à les autres.

Ce travail non exhaustif offre quelques perspectives que nous présentons ci-dessous :

- ◆ L'utilisation des différentes topologies d'onduleurs comme les onduleurs multi-niveaux.
- ◆ L'utilisation des techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous pour la commande des convertisseurs.

# Bibliographie

- [1] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "*PV panel model based on datasheet values*", IN Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE), pp. 2392-2396, 2007.
- [2] H. Patel, and V. Agarwal, "*MATLAB-based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array characteristics*", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, No. 1, pp. 302-310, 2008.
- [3] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli and Ernesto Ruppert Filho, "*Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 5, pp. 1198-1208, 2009.
- [4] Abir Chatterjee, Ali Keyhani and Dhruv Kapoor, "*Identification of Photovoltaic Source Models*", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, No. 3, pp. 883- 889, 2011.
- [5] Evagelia Paraskevadaki, V. and Stavros Papathanassiou, A. "*Evaluation of MPP Voltage and Power of mc-Si PV Modules in Partial Shading Conditions*", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, No. 3, pp. 923-932, 2011.
- [6] Fang Zheng Peng, "*Z-Source inverter*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 2, pp. 504-510, 2003.
- [7] N. Amala Sri, K.Ravi Shankar, "*Grid Connected Photovoltaic Power Generation Controller Z-Source Inverter with Single Stage Power Conversion*", IJMETMR, ISSN No. 2348-4845, Vol. 1, No. 11, pp. 66-71, 2014.
- [8] Miao Zhu, Kun Yu and Fang Lin Luo, "*Switched Inductor Z-Source Inverter*", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 8, pp. 2150-2158, 2010.
- [9] Fang Zheng Peng, Joseph, A., Jin Wang, Miaosen Shen, Lihua Chen, Zhiguo Pan, Ortiz Rivera, E. and Yi Huang, "*Z-Source Inverter For Motor Drives*", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 4, pp. 857-863, 2005.

- 
- [10] Feng Gao, Poh Chiang Loh, Blaabjerg, F. and Vilathgamuwa, D. M. “*Dual Z-Source Inverter With Three-Level Reduced Common-Mode Switching*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No. 6, pp. 1597-1608, 2007.
- [11] Rajaei, A. H, Mohamadian, M, Dehghan, S. M. and Yazdian, A. “*Single-phase induction motor drive system using Z-source inverter*”, IET Electric Power Applications, Vol. 4 , No. 1, pp. 17-25, 2010.
- [12] Miao Zhu, Kun Yu and Fang Lin Luo “*Switched Inductor Z-Source Inverter*”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 8, pp. 2150-2158, 2010.
- [13] Minh-Khai Nguyen, Young-Cheol Lim and Geum-Bae Cho, “*Switched Inductor Quasi Z-Source Inverter*”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No.11, pp. 3183-3191, 2011.
- [14] Yu Tang, Shaojun Xie and Chaohua Zhang, “*An Improved Z Source Inverter*”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 12, pp. 3865-3868, 2011.
- [15] Yang, S., Peng, F.Z., Lei, Q., Inoshita, R. and Qian, Z. “*Current Fed Quasi-Z Source Inverter With Voltage Buck–Boost and Regeneration Capability*”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No.2, pp. 882-892, 2011.
- [16] Anderson, J. and Peng, F.Z. “*Four quasi-Z-Source inverters*”, In Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 2743-2749, 2008.
- [17] Yuan Li, Anderson J., Peng F.Z. and Dichen Liu, “*Quasi-Z-Source Inverter for Photovoltaic Power Generation Systems*”, Twenty Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 918-924, 2009.
- [18] Poh Chiang Loh, Feng Gao, Pee-Chin Tan and Blaabjerg F. “*Three- Level AC–DC–AC Z-Source Converter Using Reduced Passive Component Count*”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 7, pp. 1671-1681, 2009.
- [19] Dehghan, S.M., Mohamadian, M. and Varjani, A.Y. “*A New Variable- Speed Wind Energy Conversion System Using Permanent-Magnet Synchronous Generator and Z-Source Inverter*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 24, No. 3, pp. 714-724 , 2009.
- [20] Vinnikov, D., Roasto, I., Strzelecki, R. and Adamowicz, M. “*Performance Improvement Method for the Voltage-fed qZSI with Continuous Input*”

- Current*", 15th IEEE Mediterranean Electro technical Conference, pp. 1459-1464, 2010.
- [21] Zakis, J., Vinnikov, D., Roasto, I. and Ribickis, L. "*Quasi Z Source Inverter Based Bi-Directional DC/DC Converter: Analysis of Experimental Results*", IEEE Conference Proceedings, pp. 394-399, 2011.
- [22] Vinnikov, D. and Roasto, I. "*Quasi Z Source Based Isolated DC/DC Converters for Distributed Power Generation*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58 , No.1, pp. 192-201, 2011.
- [23] Yu Tang, Shaojun Xie and Chaohua Zhang, "*Single Phase Z Source Inverter*", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 26, No. 12, pp. 3869-3873, 2011.
- [24] Fabricio Bradaschia, Marcelo Cavalcanti, C. Pedro Ferraz, E. P., Francisco Neves, A. S., Euzeli dos Santos, C. and João da Silva, H.G.M. "*Modulation for Three-Phase Transformerless Z-Source Inverter to Reduce Leakage Currents in Photovoltaic Systems*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 12, pp. 5385-5395, 2011.
- [25] Fang Zheng Peng, Miaosen Shen and Zhaoming Qian, "*Maximum Boost Control of the Z-source Inverter*", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 4, pp. 833-838, 2005.
- [26] Miaosen Shen, Jin Wang Joseph, A., Fang Zheng Peng, Tolbert, L. M. and Adams, D. J. "*Constant boost control of the Z-source inverter to minimize current ripple and voltage stress*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42 , No. 3, pp. 770-778, 2006.
- [27] Omar Ellabban, Joeri Van Mierlo and Philippe Lataire "*Comparison Between Different PWM Control Methods For Different Z-Source Inverter Topologies*", 13<sup>th</sup>, IEEE European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-11, 2009.
- [28] Poh Chiang Loh, Feng Gao and Frede Blaabjerg, "*Embedded EZ-Source Inverters*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 1, pp.256-267, 2010.