REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : électrotechniques
Spécialité : Commande électrique

Commande vectorielle d'un onduleur Z - source alimenté par un système photovoltaïque

---

Présenté par :

Mr : AISSANI YOUCEF

Mr : ZAOUI MOHAMMED

Proposé et Dirigé par :

Dr : HENINI NOUREDDINE

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remercions ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à nos parents qui tout au long de ce travail, nous ont apporté leurs précieux soutien ainsi que leurs encouragements.

Nous tenons à remercier sincèrement notre encadreur **Dr : HENINI NOUREDDINE** pour sa disponibilité, son
aide et le temps consacré qui ont constitué un apport considérable grâce auquel ce travail a pu être mené à bon port.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepter d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos sincères reconnaissances à tous nos enseignants pour les efforts fournis durant toute la période d'étude.

Enn, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail



Dédicace

A nos parents, pour leurs sacrifices déployés à notre égard, pour leur patience, leur amour et leur confiance. Qu'ils trouvent dans ce modeste travail, le témoignage de mes profondes affections et de mon attachement indéfectible, nulle dédicace ne puisse exprimer ce que je leur doit.

A mes frères et sours pour chaque mot reçu, chaque geste, à chaque main tendue et pour toute attention témoignée.

Youcef

Dédicace

A mes parents, pour leurs sacrifices déployés à mon égard, pour leur patience, leur amour et leur confiance, ainsi que mon grand-père qui ma toujours encouragé dans mes études que la paix soie sur lui Qu'ils trouvent dans ce modeste travail, le témoignage de mes profondes affections et de mes attachements indéfectibles, nulle dédicace ne puisse exprimer ce que je leur doit.

A mes frères et sœurs pour chaque mot reçu, chaque geste, à chaque main tendue et pour toute attention témoignée.

Mohammed

Sommaire

Résumé .....
Liste des figures..... I
Liste des Tableaux..... III
Liste des abréviations..... IV
Introduction générale..... 1

Chapitre I : L'onduleur Z-source

I.1 INTRODUCTION 3
I.2 Onduleur 4
I.3 Inverseur traditionnel de source de tension (VSI) 4
I.4 Convertisseur de Z-source (ZSC) 6
I.4.1 Avantages et inconvénients de ZSI 6
I.4.2 Comparaison entre CSI, VSI et ZSI 7
I.5 Onduleur Z-source 8
I.5.1 Topologie d'un onduleur triphasé à structure Z-Source 8
I.5.2 Configurations d'un onduleur triphasé à structure z-source 9
I.5.3 Principe de fonctionnement et analyse de l'onduleur Z-source 10
I.5.3.1 Shoot-Through État 11
I.5.3.2 États actifs (État Non shoot-Through) 12
I.5.4 Calcul du facteur d'élévation β 12
I.6 Condition d'inducteur et de condensateur du réseau Z- source 13
I.7 Onduleur à Quasi Z-Source (qZSI) 14
I.8 Conclusion 16

Chapitre II : Stratégies de commande de l'onduleur Z-source

II.1 INTRODUCTION 18
II.2 Stratégies de commande de l'onduleur z-source 18
II.2.1 Modulation de Largeur d'impulsion Sinusoïdale (SPWM) 18
II.2.1.1 Simple Boost Control *(*SBC) 19
II.2.1.2 Maximum Boost Control (MBC) 19
II.2.1.3 Maximum Constant Boost Control (MCBC) 20
II.2.2 Commande de modulation de largeur d'impulsion à vecteur spatial (SVPWM) ... 21
II.2.2.1 MLI à vecteur spatial modifié (MSVPWM) 22

Sommaire

II.2.2.2 Transformation rotative 22
II.2.2.3 Principe de la MLI à vecteur spatial 23
II.3 Résultats de simulation 28
II.3.1 Résultats de simulation de MLI Sinusoïdale (SPWM) 28
II.3.1.1 Résultats de simulation SBC 28
II.3.1.2 Résultats de simulation MCBC 29
II.3.1.3 Résultats de simulation MBC 31
II.3.2 Résultats de simulation de MLI à vecteur spatial (SVPWM) 33
II.4 Conclusion : 36

Chapitre III : L'onduleur Z-source dans le système PV

III.1. Introduction 38
III.2 Générateur photovoltaïque 38
III.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque 38
III.3.1 La cellule photovoltaïque et ses caractéristiques électriques 38
III.3.2 Paramètre d'une cellule photovoltaïque 40
III.3.3 Facteurs affectant la caractéristique I-V du générateur 41
III.3.3 Technique de contrôle MPPT 43
III.3.3.1 Algorithme de perturbation et d'observation (P&O) 44
III.3.3.2 Algorithme de conductance incrémentale (Cond Inc) 44
III.3.3.3 Rendement du MPPT 45
III.4 Le module solaire photovoltaïque 45
III.4.1 Association en série 45
III.4.2 Association en parallèle 46
III.5 Protection dans les générateurs photovoltaïques 46
III.5.1 Diodes de passage (diodes parallèles) 46
III.5.2 Diodes de blocage (diode séries) 47
III.6 Résultats de simulation 48
III.7 Conclusion 52
Conclusion générale : 53
BIBLIOGRAPHIE i
Annexe. A iii
Annexe. B iv
Annexe. C x

Résumé :

Les contributions de ce travail sont les suivantes : la modélisation et la simulation de l'onduleur triphasé Z-source sont présentées dans l'environnement MATLAB-Simulink pour la vérification des paramètres de conception. Deux strategies de commande MLI sont proposées, comme MLI sinusoïdale et MLI vectoriel. L'ondulation de l'élément Z-source, la tension de sortie, le courant et leur profil harmonique varient avec l'indice de modulation et la fréquence de commutation. En outre, il se concentre sur l'effet de l'état de court-circuit (ST) sur le réseau Z-source pour atteindre la meilleure efficacité et réduire la distorsion harmonique totale (THD). L'article présente l'analyse des performances et la simulation d'un générateur photovoltaïque (GPV) basé sur un onduleur Z-source. Obtenir une efficacité énergétique optimale du générateur photovoltaïque (GPV) basé sur la technologie (MPPT). Ces méthodes sont décrites en détail et comparées sur la base de la simulation dans MATLAB/ Simulink.

Mots clés : Z-Source, court-circuit, Modulation large impulsion (MLI) , Générateur photovoltaïque (GPV), technique MPPT .

ملخص :

العمل المقدم في هذه المذكرة قدم نمذجة و محاكاة للمحول العكسي (Z-source) ثلاثي الطور في بيئة MATLAB-Simulink و ذلك للتحقق من معاملات التصميم. كما تم اقتراح استراتيجيتين للتحكم في تعديل عرض النبضة (PWM) و هما (SPWM) و (SVPWM). تموج المحول العكسي Z-source ، الجهد الناتج والتيار وملف التعريف التوافقي تختلف مع مؤشر التشكيل وتردد التبديل. بالإضافة إلى ذلك ، يركز على تأثير حالة قصر الدارة على شبكة Z-source لتحقيق أفضل كفاءة وتقليل التشوه التوافقي الكلي (THD). تقدم المقالة تحليل للأداء ومحاكاة المولد الكهروضوئي (GPV) على أساس العاكس Z-source. لتحقيق كفاءة الطاقة المثلى للمولد الكهروضوئي (GPV) القائم على تقنية تتبع الطاقة العظمى (MPPT) . تمت عمليات المحاكاة للعاكس بإستعمال برنامج MATLAB / Simulink.

الكلمات المفتاحية : المحول العكسي Z-SOURCE ، الدارة المستقصرة ، المولد الكهروضوئي ، إستراتيجيات التحكم (PWM) ، تقنية تتبع الطاقة العضمى (MPPT).

Abstract:

This work has the following contributions, the modeling and simulation of Z-source three-phase inverter are presented in MATLAB-Simulink environment for the verification of the design parameters. Two PWM control strategies are proposed, like SPWM and SVPWM. The ripple of the Z-source element, output voltage, current, and their harmonics profile is varied with modulation index and switching frequency. Also, it focuses on the effect of the shoot-through state on the Z-source network to achieve the best efficiency and reduce the Total Harmonic Distortion (THD). And presented based on performance and simulation analysis of photovoltaic generator (GPV) based on Z-source inverter. Gain optimal energy efficiency of the photovoltaic generator (GPV) Based on (MPPT) technology. These methods are described in detail and compared on the basis of simulation in MATLAB/ Simulink.

Keywords: Z-source inverter, PWM Control, Shoot through State, photovoltaic generator (GPV), MPPT technique.

Liste des figures :

Chapitre I : L'onduleur Z-source

Figure I.1 Schéma général du convertisseur DC-AC 4
Figure I.2 Inverseur de Source de Tension 5
Figure I.3 Conversion d'alimentation DC/AC à deux étages traditionnelle. 5
Figure I.4 Conversion d'alimentation DC/AC à un étage. 5
Figure I.5 Structure générale du convertisseur Z-source. 6
Figure I.6 Structure générale d'un onduleur Z-source. 8
Figure I.7 Topologie d'un onduleur triphasé à structure z-source 8
Figure I.8 Circuit équivalent de l'onduleur Z-source vu à partir du lien dc. 10
Figure I.9 Circuit équivalent shoot-through état zéro du ZSI vu à partir du lien dc. 11
Figure I.10 Circuit équivalent non shoot-through des états de commutation du ZSI vu du lien de DC. 12
Figure I.11 Simulation et configuration du système prototype. 14
Figure I.12 a) Tension alimentée ZSI et (b) Tension alimenté qZSI. 15
Figure I.13 Le circuit équivalent qZSI sous (a) état non-shoot- through 16

Chapitre II: Stratégies de commande de l'onduleur Z-source

Figure II.1 Le signal MLI sinusoïdale produit une tension de référence et une onde porteuse par rapport à la tension de sortie. 18
Figure II.2 Signaux de commande de la stratégie SBC 19
Figure II.3 Contrôle de la modulation de largeur d'impulsion du Boost maximum. 19
Figure II.4 Signaux de commande de la stratégie MCBC 20
Figure II.5 Maximum Constant Boost MLI Control avec injection harmonique de troisième 21
Figure II.6 La relation entre la trame de référence abc et l la trame de référence stationnaire dq 22
Figure II.7 Transformation de Park du système de coordonnées triphasé au système de coordonnées rotatif dq0 23
Figure II.8 Vecteur de tension à travers la MLI à vecteur spatial conventionnel du VSI. 24
Figure II.9 Modèles de commutation et placement des états ST dans tous les secteurs par MLI à vecteur spatial. 26
Figure II.10 Modelés de commutation MLI au secteur i. 27
Figure II.11 Illustration du Simple Boost Control 28
Figure II.12 Génération d'impulsions shoot-through par l'adaptation d'une technique de SBC. 28
Figure II.13 Génération d'impulsions pour les commutateurs à l'aide d'une technique SBC. 29
Figure II.14 Tension simple et courant élevées à différentes fréquences. 29
Figure II.15 Illustration du Maximum Constant Boost Control 30
Figure II.16 Génération d'impulsions de shoot-through en adaptant la technique de MCBC 30

Figure II.17 Tension composée 30
Figure II.18 courant de sortie. 31
Figure II.19 Illustration du Maximum Boost Control. 31
Figure II.20 Impulsion de déclenchement du MBC. 31
Figure II.21 Tension de sortie du redresseur à pont de diodes pour M=0.8. 32
Figure II.22 Tension à travers le condensateur pour M=0.8. 32
Figure II.23 Tension de charge triphasée à travers la charge pour M=0.8. 32
Figure II.24 Forme d'onde de la tension de ligne de sortie de la commutation ZSI (SVM) ... 33
Figure II.25 Formes d'onde de la tension de phase de sortie. 33
Figure II. 26 Formes d'onde du courant de charge 33
Figure II. 27 Spectre harmonique de la tension de phase de sortie. 34
Figure II.28 Spectre harmonique du courant de sortie. 34
Figure II.29 Profil du rapport cyclique avec MLI vectoriel. 35
Figure II.30 Signal Vtri en fonction du temps. 35

Chapitre III : L'onduleur Z-source dans le système PV

Figure III.1 Cellule photovoltaïque 38
Figure III.2 Schéma électrique équivalent d'une cellule PV 39
Figure III.3 Caractéristique I-V d'une cellule PV 39
Figure III.4 Effet de l'irradiation sur la caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque 42
Figure III.5 Exemple de la variation de la caractéristique I-V du générateur PV en faisant varier la température tout en maintenant l'irradiance constante. 42
Figure III.6 Algorithme type de la méthode P&O 44
Figure III.7 Signe de dP/dV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance 45
Figure III.8 (A) trois cellules solaires connectées en série, (B) connexion de trois cellules solaires en parallèle, (C) courbe I - V de la cellule solaire connectée en série et en parallèle. 46
Figure III.9 Diagramme de la mode de fonctionnement d'une diode à gradins. d'une diode de passage. 47
Figure III.10 diodes de blocage ou diode séries 47
Figure III.11 Commutateur S1 et S2et S3 et S 4et S5 et S6 48
Figure III.12 la tension de sortie de z-source. 48
Figure III.13 Allure des Secteurs. 49
Figure III.14 courant. 49
Figure III.15 Les périodes de t0, t1, t2. 49
Figure III.16 : Allure des séquences des temps commutation. 50
Figure III.17 courant (I) et tension (V) 50
Figure III.18 La forme d'onde de courant triphasé de l'onduler triphasé à traves la charge. 50
Figure III.19 la puissance (p). 51
Figure III.20 Résultats de simulation des formes d'onde de sortie du contrôle MPPT proposé. 51
Figure III.21 la tension V ab _V sc 51
Figure III.22 courant (I) et tension (V) 52

Liste des tableaux :

Chapitre I

Tableau I.1 Comparaison entre CSI, VSI et ZSI 7
Tableau I.2 États de commutation de l'onduleur triphasé à Z- source 9
Tableau I.3 Les états utilisés avec la commande Z-source 10

Chapitre II

Tableau II.1 Vecteurs spatiaux, états de commutation et commutateurs à l'état actif..... 24
Tableau II.2 La relation correspondante entre N et le secteur 25

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
AC	Courant Alternatif
DC	Courant Continu
GPV	Générateur Photovoltaïque
SBC	Simple Boost
MBC	Maximum Boost Control
MCBC	Maximum Constant Boost Control
MLI	Modulation de la Largeur d‟Impulsions
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
P&O	Perturbation et Observation
PV	Photovoltaïque

Notations et Symboles

h : Constante de Planck (6.62.10-34 j.s).
eg : Energie de la bande interdite (eV).
S : Surface du module photovoltaïque (m_2).
E : Eclairement (W/m2).
Iph : Le photo-courant (A).
I_{sat}: Courant de saturation (A).
Rp : Résistances parallèle shunt. (Ω)
Rsh: Résistance série (Ω).
Tc : Température de jonction (°K).
Es : L'éclairement de référence (1000 W/m2).
T_{ref}: La température de référence (298 °K).
α : Le coefficient de courant en fonction de température (A/°C).
Icc : Le courant de court-circuit (A).
Vco : La tension de circuit ouvert (V).
FF : Facteur de forme.
Ns : Nombre de modules dans le panneau en série.
Np : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.
Pmax : La puissance maximale produite PV (W).
Vmax : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
Imax: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
Vopt : Tension optimale (V).
Iopt : Courant optimum (A).
Vco : Tension à circuit ouvert (V).
Icc : Courant de court-circuit (A)
K : coefficient de Boltzman (1.38.10-23 J / K)
Ta : Température ambiante (C°)
Tc : Température de la cellule (C°)
Ts : période de commutation de l'hacheur(s)
D, α : rapport cyclique (s)
r : profondeur de modulation
b :indice d'amplification de l'étage continu
Vi : la tension à la sortie de convertisseur z-source(v)
VM ou Vs: la tension à la sortie de l'onduleur(v)
VL : la tension au borne de l'inductance (v)
VC : la tension au borne de capacité (v)
fm fréquence de commutation
R :résistance
B : factor d'amplification globale
G : gain
Ds : diode
L : inductance
C : capacité

Introduction générale

Aujourd'hui, l'électronique de puissance a évolué et devient très important dans notre vie, est une technologie qui traite de la conversion et le contrôle de l'énergie électrique avec des dispositifs électroniques de mode de commutation à haute efficacité pour un large éventail d'applications, cela comprend un DC et AC alimentations

L'électronique de puissance a trouvé une place importante dans la technologie moderne un noyau de contrôle de la puissance et de l'énergie. Ces dernières années, l'énergie a augmenté à un rythme rapide. Comme le taux de consommation d'électricité à l'extrémité utilisateur augmente plus rapidement que la croissance de la production d'énergie, il y a un besoin de plus de production pour le monde entier.

La contribution des énergies renouvelables à la production totale d'électricité est accueillie avec plaisir par toutes les nations, les installations de production d'énergie renouvelable se développent au rythme le plus rapide en raison de la sensibilisation croissante du public mondial, dépendant des combustibles fossiles (coût croissant). Toutes les conséquences dangereuses liées aux combustibles fossiles peuvent être éliminées en utilisant des sources d'énergie renouvelables. Parmi les sources d'énergie renouvelables (SER), l'énergie solaire est prometteuse et le système photovoltaïque (PV) fournit la méthode la plus directe pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique sans aucune pollution environnementale. Il utilise des modules ou panneaux photovoltaïque constitués de cellules photoélectriques ou de cellules solaires qui convertissent l'énergie du soleil en électricité. C'est la lumière du soleil qui permet aux dispositifs photovoltaïques de produire de l'électricité et qu'un processus électronique naturel se produit dans les semi-conducteurs.

L'intégration de ces énergies renouvelables dans le réseau électrique pose des problèmes techniques, sachant que ces énergies sont intermittentes : La nature variable de ces sources nécessite des étapes d'adaptation qui permettent une utilisation optimale adaptée aux différentes applications et assurent une qualité de transfert de l'énergie produite. Par conséquent, les onduleurs statiques et leur commande sont devenus nécessaires dans les dispositifs existants de conversion d'énergie électrique.

Ce travail étudie précisément la possibilité de remplacer une structure combinant un convertisseur DC/DC et un onduleur DC/AC par une nouvelle topologie d'onduleurs. Cette structure nommée par son architecte, onduleur à source d'impédance (ZSI).

La recherche sur les Z-sources s'est développée rapidement ; elle a été proposée pour la première fois en 2002 par le professeur Fang Zheng Peng. Le ZSI est une topologie alternative de conversion de l'énergie, basée sur un réseau de Z-source, capable d'absorber et d'augmenter la tension alternative de sortie, ce qui n'est pas possible avec les onduleurs traditionnels (source de tension ou source de courant). Il ne se contente pas de convertir un signal continu en un signal alternatif, mais possède également une fonction d'élévation qui lui permet d'élever la tension de la source à un niveau supérieur. Ainsi, l'onduleur Z-source peut avoir une tension de sortie en courant alternatif supérieure à celle de l'entrée, ce qui n'est pas possible avec les onduleurs traditionnels à source de tension ou à source de courant.

L'onduleur Z-source peut utiliser les états de shoot-through pour augmenter la tension de sortie, ce qui améliore grandement la fiabilité de l'onduleur et fournit une conversion intéressante de courant continu en courant alternatif à un seul étage qui peut absorber et augmenter la tension. Le rapport cyclique de shoot-through est utilisé pour contrôler l'augmentation de la tension de la liaison au CC et donc l'augmentation de la tension de sortie de l'onduleur.

L'objectif principal de ce projet est présenté la manière de dessiner et comprendre l'onduleur Z-source, afin de connaître le principe de fonctionnement de cet onduleur. En plus, le développement et la simulation de l'onduleur Z-source triphasé utilisé pour augmenter la tension de sortie de cet onduleur en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink. Le dernier objectif est le résultat comparatif du ZSI avec les onduleurs traditionnels à source de tension.

Ce projet se compose d'une introduction générale, trois chapitres et d'une conclusion générale.

Au début, l'introduction générale traite des informations générales sur le sujet. En outre, les objectifs du projet, la portée de l'étude, l'énoncé du problème et la structure du projet sont présentés.

Le premier chapitre résume l'étude de base et l'état actuel de l'onduleur Z-source. En plus, il couvre des informations générales sur l'onduleur Z-source et ses topologies. Le chapitre traite de la configuration et du fonctionnement de cet onduleur et de sa structure.

Le deuxième chapitre présente les stratégies de contrôle pour l'onduleur Z-source avec les techniques MLI. La conception du modèle est réalisée à l'aide de MATLAB/Simulink, les résultats finaux et l'analyse du modèle global de l'onduleur triphasé Z-Source en utilisant les méthodes MLI sinusoïdale et MLI vectorielle.

Le troisième chapitre est consacré à une modélisation et l'analyse de simulation de générateur photovoltaïques (GPV) connectés au réseau basé sur un onduleur Z-source. En utilisant un réseau Z-source, modélisé et simulé dans un environnement Matlab /Simulink. Et utiliser le commande MPPT Pour optimiser le rendement énergétique de GPV.

Enfin, la conclusion générale consiste en les résultats de ce projet pour le contrôle de l'onduleur triphasé Z-source alimenté par un système photovoltaïque.

Chapitre I :

L'onduleur Z-source

I.1 INTRODUCTION :

L'onduleur Z-source (ZSI) est le premier onduleur de source d'impédance proposé en 2003 pour surmonter les inconvénients des onduleurs traditionnels [1]. L'introduction du réseau d'impédance rend les caractéristiques Buck–boost des onduleurs de source d'impédance avec conversion en une seule étape. Et la même phase du pont d'inverseur peut être shoot-through (ST) depuis l'existence du réseau d'impédance. Le ZSI améliore la fiabilité de l'onduleur et élargit la plage d'application en ajustant le temps ST.

Cependant, certains inconvénients de ZSI sont apparus, tels que la puissance unidirectionnelle débit, petite plage de charge, courant de démarrage d'appel élevé, courant d'entrée discontinu tension élevée de condensateur, et ainsi de suite. Par conséquent, des améliorations ont également été apportées à la ZSI pour résoudre ces lacunes.

Dans ce chapitre nous allons étudier le principe de fonctionnement de convertisseur Z-source en passant l'état « Shoot-Through » et développer le modèle mathématique du convertisseur Z-source en extrayant les équations régissant le système.

Dans le but de préciser le rôle principal du convertisseur Z-source est d'amplifier la tension d'entrée est basés sur le rapport de l'état de « Shoot-Through » durant toute la période de commutation [2].

I.2 Onduleur :

Un onduleur est un convertisseur électronique d'alimentation DC/AC qui transforme directement (DC) tension ou courant à alternatif (AC) tension ou courant de différents de fréquence et amplitudes variables. C'est l'inverse de la fonction d'un redresseur.

Un système de convertisseur DC/AC typique est illustré à la figure (I.1). L'entrée est de Source DC (tension ou courant) et la sortie est souhaitée pour être une tension sinusoïdale ou courant avec une composante DC nulle.

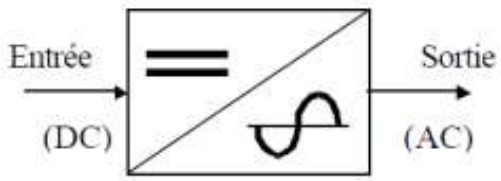


Figure I.1 Schéma général du convertisseur DC-AC

I.3 Inverseur traditionnel de source de tension (VSI) :

VSI est un inverseur de pont triphasé alimenté par une source de tension continue (ou) une source de tension alternative avec redresseur à diodes comme illustré à la figure (I.2). Un grand condensateur est connecté aux bornes d'entrée tend à rendre la tension continue d'entrée constante. Six commutateurs sont utilisés dans le circuit principal ; chacun composé du transistor de puissance et d'une diode antiparallèle pour fournir un flux de courant bidirectionnel et une tension unidirectionnelle capacité de blocage [3].

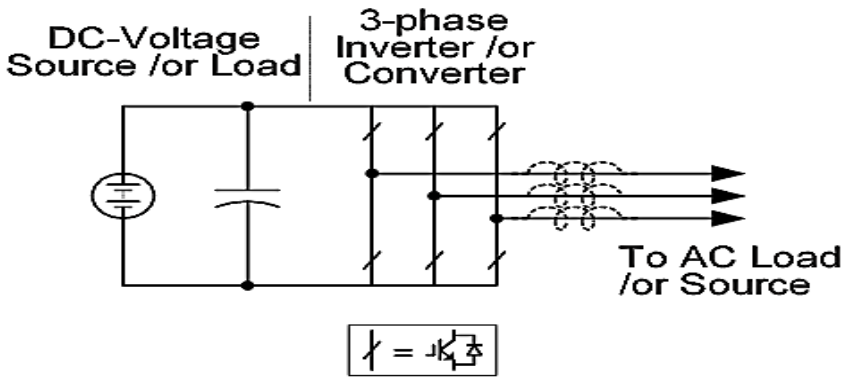


Figure I.2 Inverseur de Source de Tension

Un DC à AC onduleur système a généralement deux hautes fréquences de commutation étape. La première étape du système d'inverseur est une régulation de convertisseur DC à DC la tension d'entrée au deuxième étage est un onduleur de source de tension triphasé (Figure I.3).

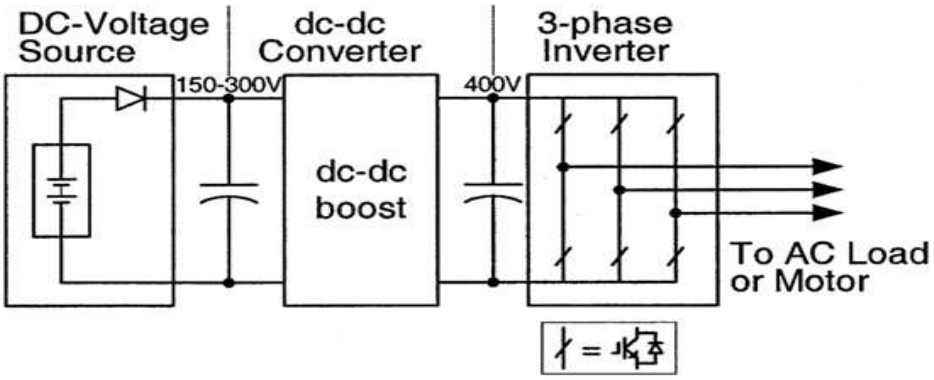


Figure I.3 Conversion d'alimentation DC/AC à deux étages traditionnels.

Il a la barrière conceptuelle et théorique suivante :

- La tension de sortie AC est limitée en dessous et ne peut pas dépasser l'entrée DC tension.
- Un équipement externe est nécessaire pour augmenter la tension, ce qui augmente le coût et réduit l'efficacité globale du système.
- Il y a une possibilité pour l'apparition de court à travers lequel détruit appareil.

Compte tenu des obstacles précédents liés à VSI, un nouveau concept de conversion de puissance est proposé, et il est montré dans la figure (I.4).

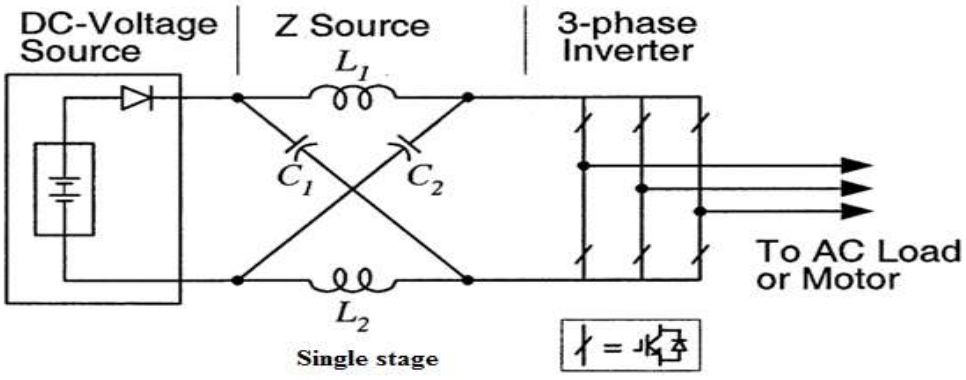


Figure I.4 Conversion d'alimentation DC/AC à un étage.

I.4 Convertisseur de Z-source (ZSC) :

Convertisseur Z-source est une technologie innovante présentée ces dernières années. C'est un nouveau type de convertisseurs en plus des deux autres types de convertisseurs traditionnels : le source de tension et les convertisseurs de source de courant. Il utilise une impédance unique réseau de coupler le circuit principal du convertisseur à la source d'alimentation. Figure (I.5) montre la structure générale du convertisseur de Z- source.

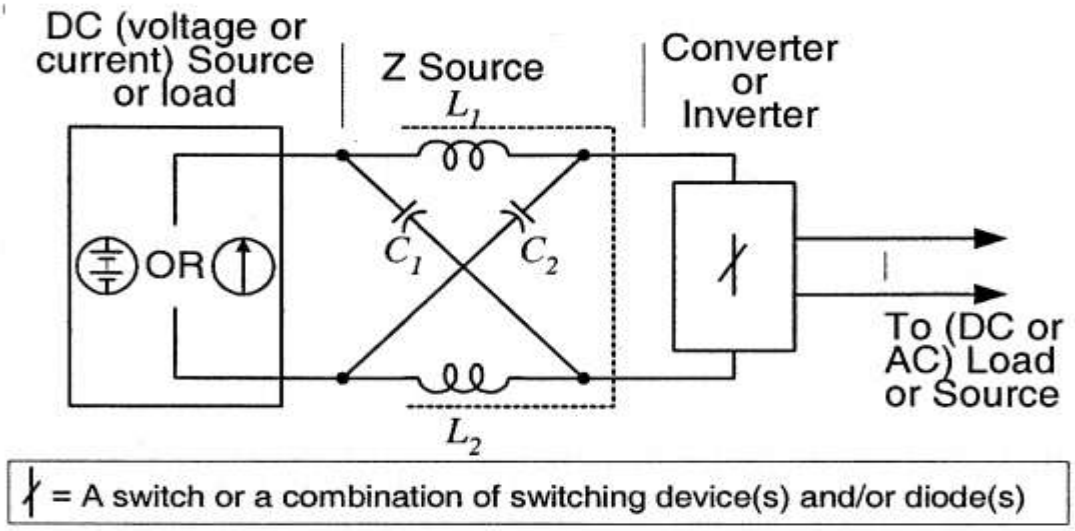


Figure I.5 Structure générale du convertisseur Z-source**.**

Il a une caractéristique précieuse en raison de deux idées particulières ajoutées au convertisseur de source de tension de base [4] :

- ❖ Mise en marche d'au moins une jambe de commutateurs ensemble, un shoot through mode, qui est interdit dans les convertisseurs conventionnels.
- ❖ Réseau d'impédance en forme de X comprend deux paires de condensateurs et d'inductances, maintient l'énergie dans l'état shoot-through.

I.4.1 Avantages et inconvénients de ZSI

Le ZSI interface la tension de la source DC et le pont de l'onduleur.
Le ZSI a non seulement une fonction Buck-boost, mais il manque également le temps de suppression traditionnellement présent dans un onduleur ordinaire. Les avantages que présente Le ZSI par rapport à la VSI ou à la CSI traditionnelle ne sont pas limités mais s'étendent aux éléments suivants :

- La source d'entrée DC n'est pas limitée à une batterie mais peut être l'une des multitudes, y compris la source de tension ou de courant ou même la charge comme le redresseur de diode, le convertisseur de thyristor, l'inductance, le condensateur, etc. ;
- Le ZSI peut être utilisé dans une pléthore d'applications comme dans les sources de tension de sortie variable telles que les piles à combustible et les réseaux photovoltaïques. La tension alternative peut ainsi être modifiée à n'importe quelle valeur comprise entre zéro et de très grandes grandeurs. Le ZSI est un onduleur Buck-boost qui n'est pas une propriété de VSI ou CSI ;

- On peut utiliser tous les schémas MLI pour contrôler le ZSI. Par conséquent, il offre également une grande flexibilité ;
- Il peut être appliqué à toutes les gammes de conversion de puissance.

I.4.2 Comparaison entre CSI, VSI et ZSI :

Tableau I.1: Comparaison entre CSI, VSI et ZSI [5].

Onduleur de source	**Onduleur de source actuelle**	**Onduleur Z-Source**
Le CSI agit comme une source de courant constant ou un courant rigide puisqu'un grand inducteur est utilisé en série avec la source de tension	Le VSI agit comme une source de tension constante ou un onduleur de tension rigide puisqu'un grand condensateur est utilisé en parallèle avec la source de tension.	Le ZSI agit comme une source constante de tension à haute impédance. Comme condensateur et inducteur est utilisé dans la liaison CC.
Un CSI est capable de résister à des courts-circuits sur deux de ses bornes de sortie. D'où court-circuit momentané en charge.	Un VSI est une situation plus dangereuse car le condensateur parallèle alimente plus de puissance le défaut.	Dans ZSI ratés des commutateurs est parfois également acceptable.
Ne peut pas être utilisé à la fois dans le fonctionnement buck ou boost de l'onduleur en même temps.	Ne peut pas être utilisé à la fois dans le fonctionnement buck ou boost de l'onduleur en même temps.	Peut être utilisé à la fois dans le fonctionnement buck et boost de l'onduleur en même temps.
Les circuits principaux ne peuvent pas être interchangeables.	Le circuit principal ne peut pas être interchangeable ici aussi.	Ici, les circuits principaux so interchangeables.
Il est affecté par le bruit EMI.	Il est affecté par le bruit EMI.	Il est moins affecté par le bruit EMII.
Il a une quantité considérable de distorsion harmonique.	Il a une quantité considérable de distorsion harmonique.	Harmoniques Distorsion en basse.
La perte de puissance devrait être élevée en raison de filtre	. La perte de puissance est élevée	la perte de Puissance devrait être faible
Observé que la perte de puissance diminue l'efficacité ici.	La perte de puissance élevée diminue l'efficacité ici.	Rendement plus élevé en raison de moins de perte de puissance

I.5 Onduleur Z-source :

L'onduleur Z-source est une topologie de conversion de puissance alternative qui peut à la fois réduire et augmenter la tension d'entrée à l'aide de composants passifs. Il utilise un réseau d'impédance LC unique pour coupler le circuit principal du convertisseur à la source d'alimentation, ce qui permet d'augmenter la tension d'entrée, une condition qui ne peut pas être obtenue dans les onduleurs traditionnels.

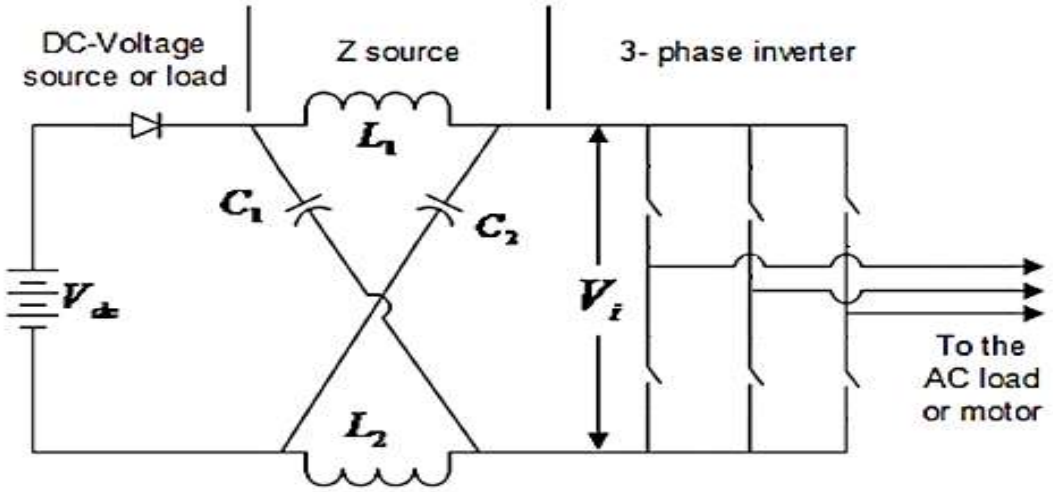


Figure I.6 Structure générale d'un onduleur Z-source.

Le ZSI est constitué d'un réseau d'impédances Z, comprenant deux condensateurs C1 et C2, et deux inducteurs L1 et L2 montés en X et connectés à un onduleur triphasé comme illustré à la Figure (I.6). En outre, une diode est utilisée pour empêcher le passage des courants inverses.

I.5.1 Topologie d'un onduleur triphasé à structure Z-Source :

L'onduleur de tension triphasé est illustré sur la figure ci-dessous, il se présente sous la forme d'un pont triphasé constitué de 3 bras reliés à la source de tension via un réseau d'impédance de Z-source ainsi qu'une diode de protection qui est utilisée pour empêcher la décharge des deux condensateurs dans la source de tension continue [6].

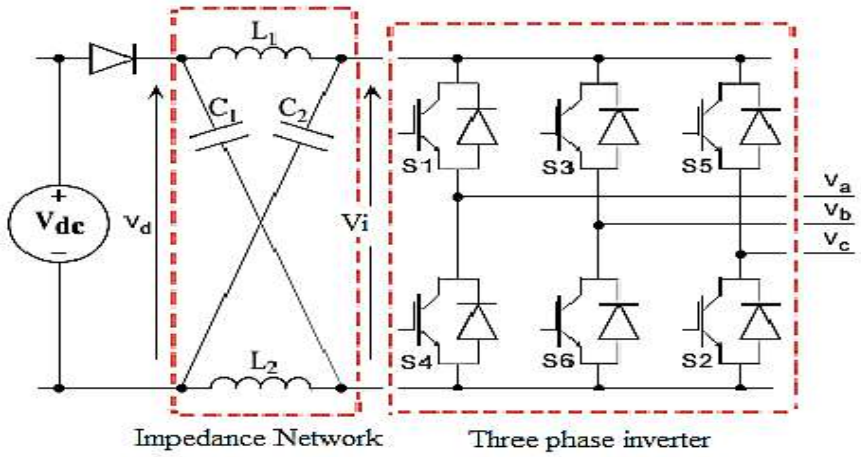


Figure I.7 Topologie d'un onduleur triphasé à structure z-source

Chaque bras de l'onduleur constitue une cellule de commutation. Il se compose de deux interrupteurs de courant réversibles contenant un transistor IGBT et une diode montée en antiparallèle [7].

L'insertion d'un réseau d'impédance entre la source CC et l'onduleur à trois phases Permet de frapper deux commutateurs dans le même bras, quelque chose qui est impossible dans un traditionnel, ce qui donne lieu à un nouvel "État Shoot-through", ou "état de court-circuit". Un bras inverseur peut remplacer un commutateur externe indépendant à l'entrée de ce dernier, cet état est utilisé pour contrôler le cycle de service du réseau d'impédance de z-source, et ajustent ainsi le rapport entre la tension source et le bus CC à l'entrée de l'onduleur [6].

Le réseau d'impédance Z-Source joue un double rôle, le premier est celui d'un Coupeur de poussée, une fois couplé à l'inverseur triphasé, les travaux entiers dedans Buck-Boost. La deuxième fonction est celle d'un filtre de tension et de courant.

L'impédance du réseau est utilisée pour réduire les ondulations de courant autour de sa moyenne valeur pendant une période de commutation, alors que le condensateur est destiné à absorber ces ondulations et sert à limiter les fluctuations de tension, et ainsi fournir un plus ou moins stable pic de tension à l'entrée de l'onduleur triphasé, afin d'obtenir des tensions sinusoïdales d'amplitude fixe à la sortie de l'onduleur.

I.5.2 Configurations d'un onduleur triphasé à structure z-source :

Il y a (06) six configurations actives pour un VSI traditionnel, (06) six configurations où il y a un transfert d'énergie entre la source et le charge, et (02) deux configurations passives où il n'y a pas de transfert de puissance entre la source et la charge, nous pouvons appeler ces états: configurations nul.

Il existe également un neuvième état qui correspond à plusieurs configurations, dédié au contrôle de la partie réseau d'impédance Z-source. Cet état est caractérisé par le court-circuit d'un ou plusieurs bras, parmi les trois disponibles bras de l'onduleur [6]. Toutes les configurations possibles d'onduleur Z-Source sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.2: États de commutation de l'onduleur triphasé à Z- source [8].

(! S_X represents complement of S_X, where X = 1, 3 or 5)

Etat (Tension de Sortie)	**S_1**	**S_4**	**S_3**	**S_6**	**S_5**	**S_2**
active {100} (fini)	1	0	0	1	0	1
active {110} (fini)	1	0	1	0	0	1
active {010} (fini)	0	1	1	0	0	1
active {011} (fini)	0	1	1	0	1	0
active {001} (fini)	0	1	0	1	1	0
active {101} (fini)	1	0	0	1	1	0
Zero {000} (0V)	0	1	0	1	0	1
Zero {111} (0V)	1	0	1	0	1	0
Shoot-Through E1 (0V)	1	1	S_3	!S_3	S_5	!S_5
Shoot-Through E2 (0V)	S_1	!S_1	1	1	S_5	!S_5
Shoot-Through E3 (0V)	S_1	!S_1	S_3	!S_3	1	1
Shoot-Through E4 (0V)	1	1	1	1	S_5	!S_5

Shoot-Through E5 (0V)	1	1	S_3	$!S_3$	1	1
Shoot-Through E6 (0V)	S_1	$!S_1$	1	1	1	1
Shoot-Through E7 (0V)	1	1	1	1	1	1

L'analyse du tableau précédent montre que l'état de court-circuit peut être généré par sept (07) configurations possibles, réparties comme suit :

- Trois configurations sont obtenues par le court-circuit de chaque bras ;
- Trois configurations sont faites par le court-circuit de deux bras ;
- Une configuration est obtenue par le court-circuit des trois bras.

Les valeurs des tensions alternatives à la sortie de l'onduleur ne sont pas affectées par l'insertion de ces configurations [9].

Le fonctionnement du dispositif est lié au comportement du non linéaire éléments entourant l'étage continu Z-source comme indiqué dans le tableau (I.2).

Tableau I.3: Les états utilisés avec la commande Z-source [9].

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

I.5.3 Principe de fonctionnement et analyse de l'onduleur Z-source :

Normalement, il y a huit états de commutation dans le SPWM triphasé système de contrôle, mais il y a neuf statuts au total dans ZSI, huit statues est identique à l'onduleur triphasé traditionnel et un statut zéro supplémentaire.

Dans ce statut zéro supplémentaire, le circuit entre l'inverseur et la source de CC sont court-circuité par les commutateurs supérieurs et inférieurs s'allument en même temps dans n'importe quel pont, n'importe quels deux ponts ou tous les ponts [10]. La figure (I. 8) montre le circuit équivalent de l'onduleur Z-source.

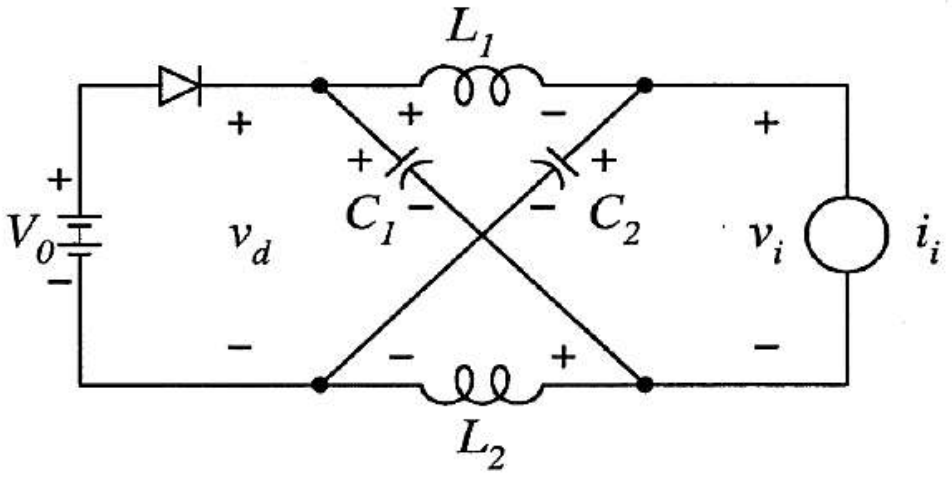


Figure I.8 Circuit équivalent de l'onduleur Z-source vu à partir du lien dc.

A partir de la (I. 8), on peut supposer tous les inducteurs L1, L2 et condensateurs

C1, C2 ont la même valeur dans le réseau Z :

$$\begin{cases} V_{L1} = V_{L2} \underset{et}{} = V_L \\ V_{C2} = V_{C2} = V_C \end{cases} \quad \text{(I.1)}$$

Les figures ci-dessous sont le circuit équivalent de l'onduleur Z-source en les différents états.

I.5.3.1 Shoot-Through État :

Le ZSI utilise avantageusement les états de prise de vue pour stimuler le bus C.C tension par déclenchement sur les commutateurs supérieur et inférieur d'une branche de phase [11].

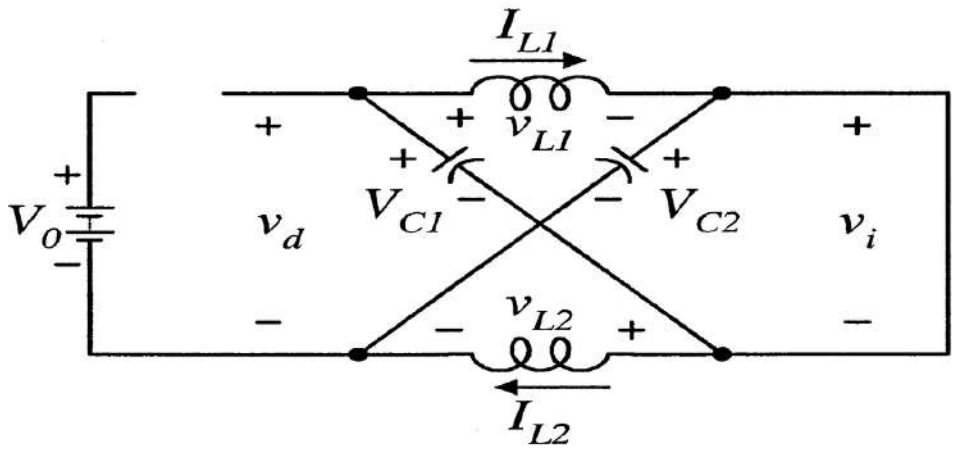


Figure I.9 Circuit équivalent shoot-through état zéro du ZSI vu à partir du lien dc.

Le circuit est dans un état zéro shoot-through, par conséquent la tension du condensateur est stimulée pendant cet état, la somme des deux condensateurs" tension est supérieure à la tension de source de C.C ($V_{C1} + V_{C2} > V_0$), la diode est inverse polarisée, et les condensateurs chargent les inducteurs. Les tensions à travers les inducteurs sont [12] :

$$\begin{cases} V_{L1} = V_{C1} \\ \underset{et}{} \\ V_{L2} = V_{C2} \end{cases} \quad \text{(I.2)}$$

Le courant de l'inducteur augmente linéairement en supposant que la tension du condensateur est constante au cours de cette période. En raison de la symétrie ($L_1=L_2 = L$) et ($C_1=C_2 = C$) du circuit ($V_{L1}=V_{L2}=V_L$), ($I_{L1}=I_{L2}=I_L$) et ($V_{C1}=V_{C2}= V_C$) [12].

Par le biais de la ci-dessus, nous obtenons :

$V_C = V_L$, $V_D = 2V_C$ et $Vi = 0$ (I.3)

I.5.3.2 États actifs (État Non shoot-Through) :

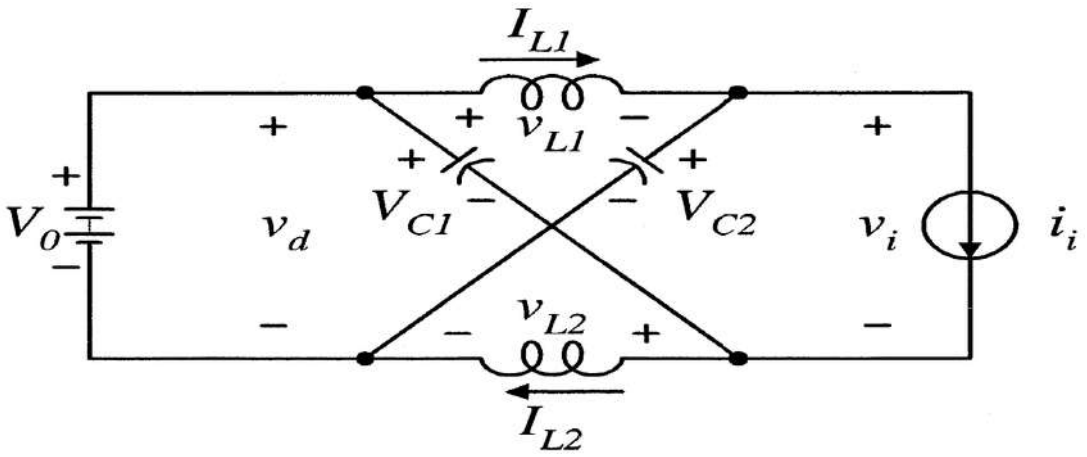


Figure I.10 Circuit équivalent non shoot-through des états de commutation du ZSI vu du lien de DC.

L'onduleur est dans un état non-shoot through (l'un des 6 états actifs et 2 états zéro traditionnels) et le courant inducteur répond à l'équation suivante

$$I_L > \frac{1}{2} L_I \qquad \text{(I.4)}$$

Encore une fois en raison de la symétrie du circuit, le courant du condensateur I_{C1} et I_{C2} et le courant inducteur I_{L1} et I_{L2} doivent être égaux l'un à l'autre respectivement. Dans ce mode, le courant d'entrée de la source C.C devient :

$$I_{in} = I_{L1} + I_{C1} = I_{L1} + (I_{L2} - I_i) = 2I_L - I_i > 0 \qquad \text{(I.5)}$$

Par conséquent, la diode est conductrice et la tension aux bornes de l'inducteur est :

$$V_L = V_0 - V_C \qquad \text{(I.6)}$$

$V_D = V_0$ (V_0 est la tension de source C.C) (I. 7)

Comme le temps passe, l'inducteur actuel maintient en baisse à un niveau qui ne plus longtemps, la condition de (I. 4) peut être remplie. À ce stade, le courant d'entrée I_{in} ou le courant de diode est diminué à zéro [12].

En plus des deux types précédents, un ZSI a de nouveaux modes qui peuvent exister pour une faible inductance et une forte ondulation des inducteurs.

I.5.4 Calcul du facteur d'élévation β :

Définir les états non-shoot-through pour un intervalle de T1, dans un cycle de commutation T, Nous avons $T = T_0 + T_1$. Donc, à partir de la Figure (I.10) circuit équivalent, nous avons [10] :

$$V_i = V_C - V_L \qquad \text{(I.8)}$$

Selon la relation (I.6) nous avons :

$$V_i = 2V_C - V_0 \quad \text{(I.9)}$$

La relation avec la période de commutation et la tension du condensateur et du courant continu source :

$$\frac{V_C}{V_0} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} \quad \text{(I.10)}$$

La tension de crête de la liaison CC sur le pont de l'onduleur est exprimée en (I. 3) et peut-être réécrit comme :

$$V_i = V_C - V_L = 2V_C - V_0 = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_0 = \beta \, . \, V_0 \quad \text{(I.11)}$$

- β est de renforcer facteur :

$$\beta = \frac{T_1}{T_1 - T_0} = \frac{1}{1 - 2(\frac{T_0}{T})} \geq 1 \quad \text{(I.12)}$$

- Où T est la période de temps totale, T_0 est la période de prise de vue et D_0 est le S_T de rapport cyclique.

$$D_0 = \frac{T_0}{T_S} \quad \text{(I.13)}$$

La tension de phase de crête de sortie de l'onduleur peut être exprimée comme suit :

$$V_{AC} = M \frac{Vi}{2} = M.\beta \frac{V0}{2} \quad \text{(Où } M \text{ est l'indice de modulation)} \quad \text{(I.14)}$$

De cette équation, nous savons que la tension CA de sortie peut être contrôlée par les valeurs de *M* et ***β,*** le facteur de poussée [10].

I.6 Condition d'inducteur et de condensateur du réseau Z- source :

Pour l'onduleur V-source traditionnel, le condensateur C.C est le stockage d'énergie unique et élément filtrant pour supprimer la tension ondulation et servir de stockage temporaire. Pour le traditionnel I-source inverseur, l'inducteur de C.C est le stockage d'énergie unique / filtrage élément pour supprimer l'ondulation actuelle et servir le stockage temporaire. Le réseau Z-source est une combinaison de deux inducteurs et deux condensateurs. Ce circuit combiné, le réseau Z-source est l'élément de stockage / filtrage d'énergie pour l'onduleur Z-source. Le réseau Z-source fournit un filtre de second ordre et est plus efficace pour supprimer les ondulations de tension et de courant que le condensateur ou inducteur utilisé seul dans les onduleurs traditionnels. Donc, la condition d'inducteur et de condensateur devrait être plus petite que les onduleurs traditionnels. Guide de conception détaillé et formules de le réseau Z-source sera présenté dans un prochain document. Une brève discussion est donnée ci-dessous en termes de tailles physiques et les exigences. Lorsque les deux inductances (L1 et L2) sont petit et proche de zéro.

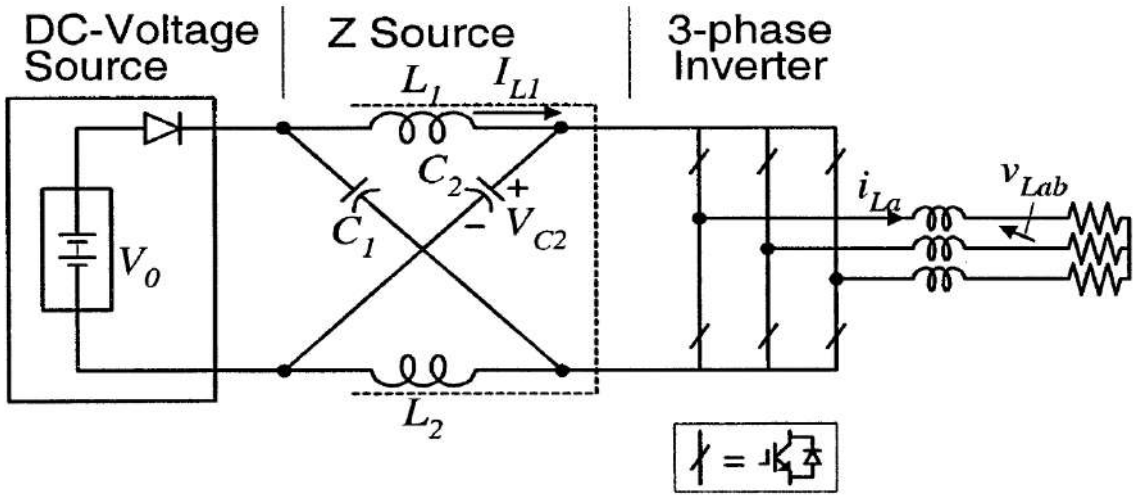


Figure I.11 Simulation et configuration du système prototype.

Le réseau Z-source réduit à deux les condensateurs (C1 et C2) en parallèle et devient un traditionnel V-source. Par conséquent, le condensateur d'un onduleur V-source traditionnel exigences et la taille physique est la pire exigence de cas pour le réseau Z-source. Envisager un filtrage supplémentaire et stockage d'énergie fourni par les inducteurs, le réseau Z-source devrait nécessiter moins de capacité et de plus petite taille par rapport avec l'onduleur V-source traditionnel. De même, lorsque l'deux condensateurs (C1 et C2) sont petits et approchent zéro, le Réseau Z-source réduit à deux inducteurs (L1 et L2) en série et devient une I-source traditionnelle. Par conséquent, un traditionnel Les conditions de l'inducteur de l'inverseur d'I-source et la taille physique est le pire des cas requis pour le réseau Z-source. Considérer filtrage supplémentaire et stockage d'énergie par les condensateurs, le réseau Z-source devrait nécessiter moins d'inductance et plus petit taille comparée à l'onduleur I-source traditionnel.

I.7 Onduleur à Quasi Z-Source (qZSI) :

Le Quasi-Z-source est une mise à niveau d'impédance source onduleur (ZSI). Il offre divers avantages par rapport au ZSI lui-même et a donc été utilisé dans le modèle Simulink et comparé au modèle de référence*par la suite. En faisant l'analyse du circuit du qZSI, nous réalisons que presque toutes les équations pour ZSI sont également vraies pour qZSI.

Les principales différences entre le ZSI et le qZSI sont :

1) Le courant tiré par qZSI est courant CONTINU constant tandis que le ZSI tire le courant discontinu de la source menant à moins d'harmoniques.
2) La tension appliquée et par conséquent la taille du condensateur C2 est considérablement réduite que le ZSI régulier.

Parce que le courant source tiré est constant et continu pour le qZSI, il est plus approprié pour l'application dans PV et les piles à combustible.

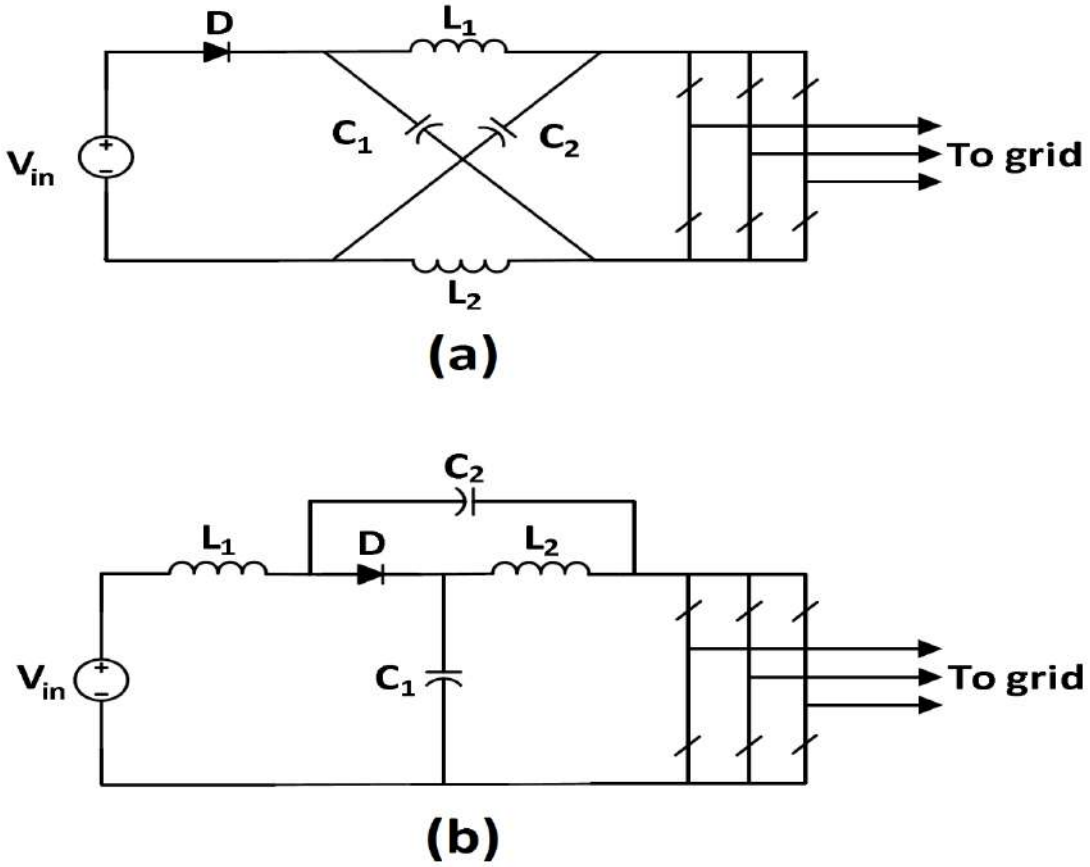
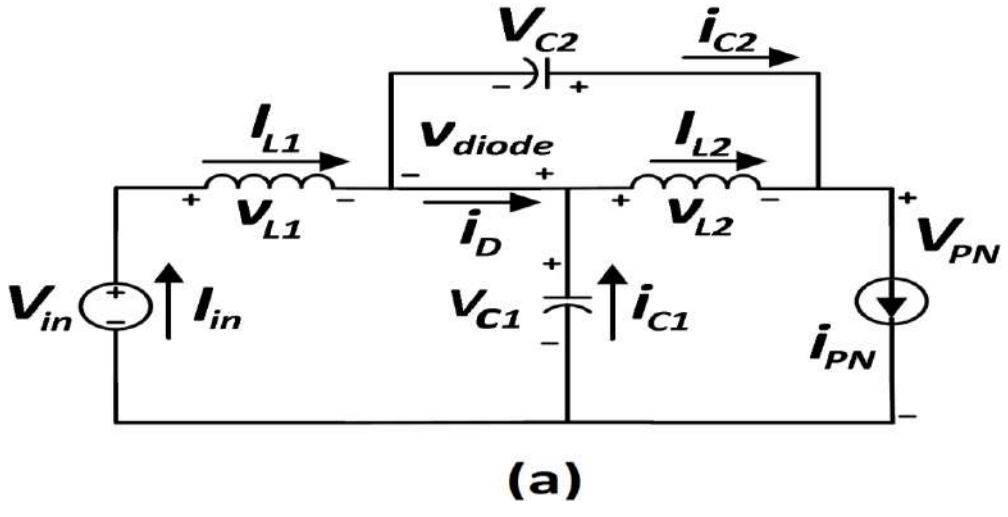


Figure I.12 a) Tension alimentée ZSI et **(b)** Tension alimenté qZSI.

Comme c'est le cas avec un ZSI régulier, le qZSI dispose également de deux modes de fonctionnement, à savoir le mode non-shoot-through et le mode shoot-through. Le circuit équivalent efficace d'un qZSI sous le mode non-shoot-through et shoot-through peut être vu dans la figure I.13. Dans l'état non traversant de la figure I.13 **(a)**, le pont/les commutateurs de l'onduleur ressemblent à une source de courant tandis que les commutateurs sont court-circuités avec un V_{PN} égal à zéro dans le cas d'un état traversant de la figure I.13 **(b).**



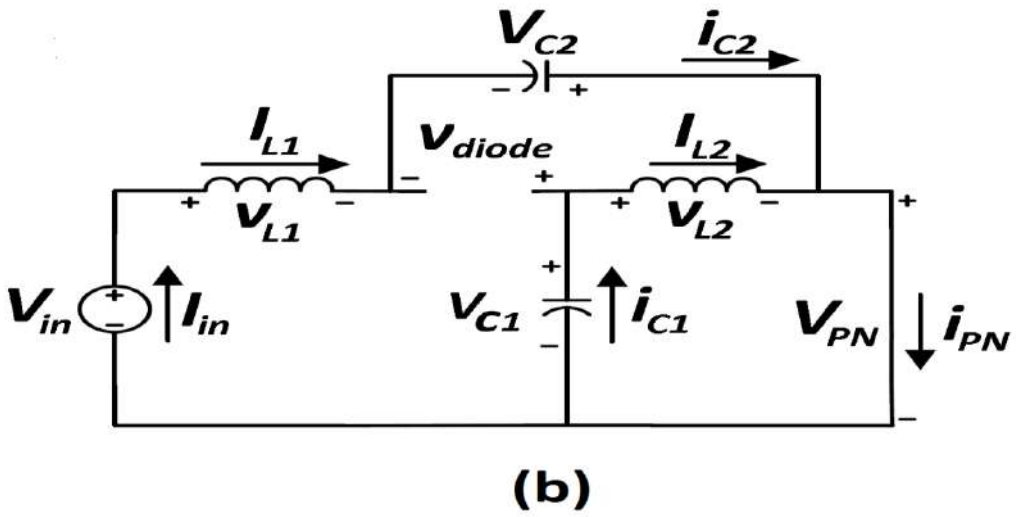


Figure I.13 Le circuit équivalent qZSI sous (a) état non-shoot- through et (b) état shoot-through.

I.8 Conclusion :

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

L'onduleur Z-source utilise un réseau d'impédance unique pour coupler le circuit principal de l'onduleur à la source d'alimentation CC, et fournir ainsi une tension alternative amplifiée, de sorte qu'il peut être dit qu'il s'agit d'un convertisseur boost. Et nous avons pu constater la particularité de ce type de convertisseur qui se caractérise par l'insertion d'un court-circuit (Shoot-through) qui nous permet d'obtenir à la fin des tensions alternatives amplifiées et indépendantes de la tension d'entrée. Enfin, nous avons montré que les résultats de la simulation sont compatibles avec les relations démontrées analytiquement.

D'autre part, un dimensionnement des éléments passifs du réseau d'impédance Z a été aussi fait pour faire fonctionner l'onduleur dans les meilleures conditions.

Chapitre II :

Stratégies de commande de l'onduleur Z-source

II.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, deux modèles (MLI sinusoïdale et MLI à vecteur spatial) ont été construits avec MATLAB/Simulink et Simscape. De plus, ces méthodes de contrôle sont utilisées dans le VSI traditionnel et l'onduleur Z-source. Leurs résultats ont été comparés et analysés.

II.2 Stratégies de commande de l'onduleur z-source :

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) est une méthode pour générer des magnitudes de tension variables et différentes formes en contrôlant la durée de l'impulsion à chaque période complète [10]. La technique de MLI est aussi très commune dans la conversion DC/AC. En utilisant cette technique de commutation haute fréquence, il est possible d'éliminer les harmoniques basses fréquences indésirables et les harmoniques de commutation haute fréquence sont faciles à filtrer [5].

L'inverseur triphasé de structure de Z-source peut être commandé par plusieurs stratégies de contrôle, ces stratégies sont développées à partir des techniques de contrôle sinusoïdales et vectorielles de modulation de largeur d'impulsion (MLI) utilisées dans les onduleurs conventionnels.

II.2.1 Modulation de Largeur d'impulsion Sinusoïdale (SPWM) :

La technique de MLI sinusoïdal est un des premiers signaux de modulation pour MLI à base de porteuse, l'idée principale de MLI sinusoïdal est d'utiliser un signal de modulation sinusoïdale comparer avec un signal de porteuse (normalement est une onde de rampe) pour produire. La durée de ON/OFF des six commutateurs du système onduleur dépend des intersections entre la forme d'onde de référence (onde sinusoïdale) et la forme d'onde porteuse

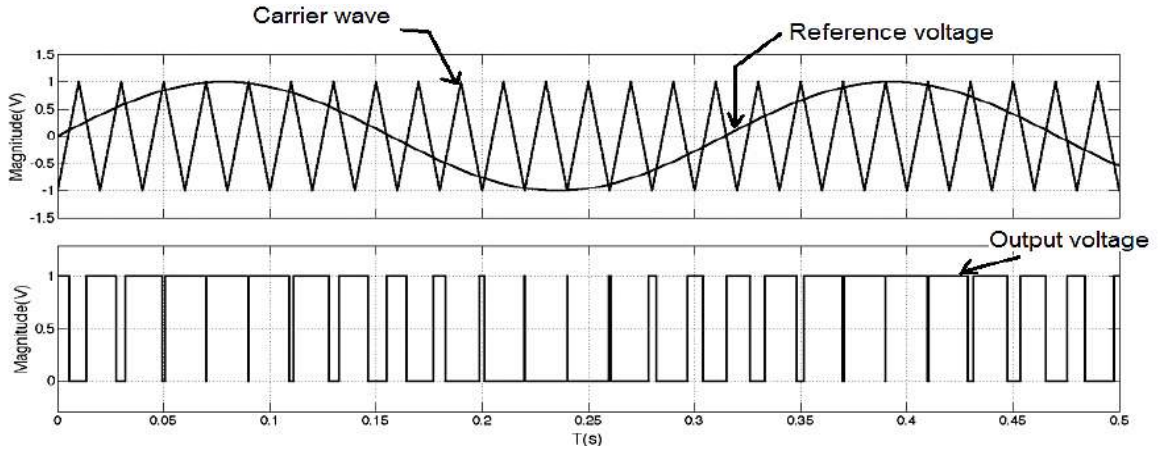


Figure II.1 Le signal MLI sinusoïdale produit une tension de référence et une onde porteuse par rapport à la tension de sortie.

L'indice de modulation (M) est le composant principal de contrôle et il est exprimé comme suit:

$$\boldsymbol{V} = \frac{\boldsymbol{V_{ref}}}{\boldsymbol{V_{car}}} \qquad \text{(II.1)}$$

La relation entre l'indice de modulation et la tension de sortie est produite par sous l'indice de modulation (M<1).

La commande MLI sinusoïdale peut être étudiée sous trois angles différents. Il s'agit de la commande d'élévation simple, de la commande d'élévation maximale et de la commande d'élévation constante maximale.

II.2.1.1 Simple Boost Control *(*SBC):

Dans ce système, les impulsions de déclenchement sont générées en corrélant les trois signaux de référence sinusoïdaux et les deux enveloppes de tension constante avec l'onde triangulaire porteuse. Les signaux de référence ont une différence de phase de 120 degrés et l'amplitude des deux enveloppes est identique à l'amplitude de crête des signaux de référence [13].

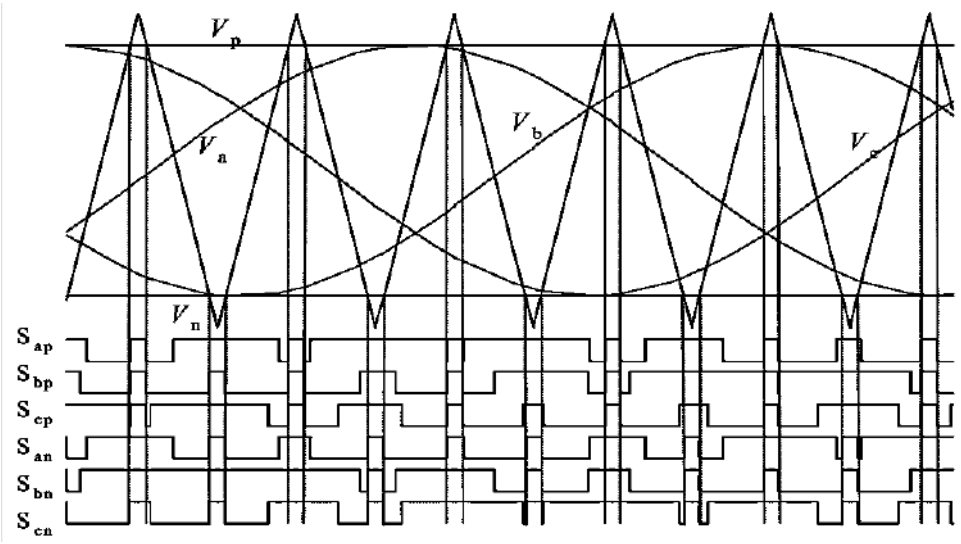


Figure II.2 Signaux de commande de la stratégie SBC

II.2.1.2 Maximum Boost Control (MBC):

Dans cette stratégie, le circuit est dans l'état shoot-through lorsque l'onde porteuse triangulaire est soit supérieure à la courbe maximale des références (V_a, V_b, V_c), soit inférieure au minimum des références.

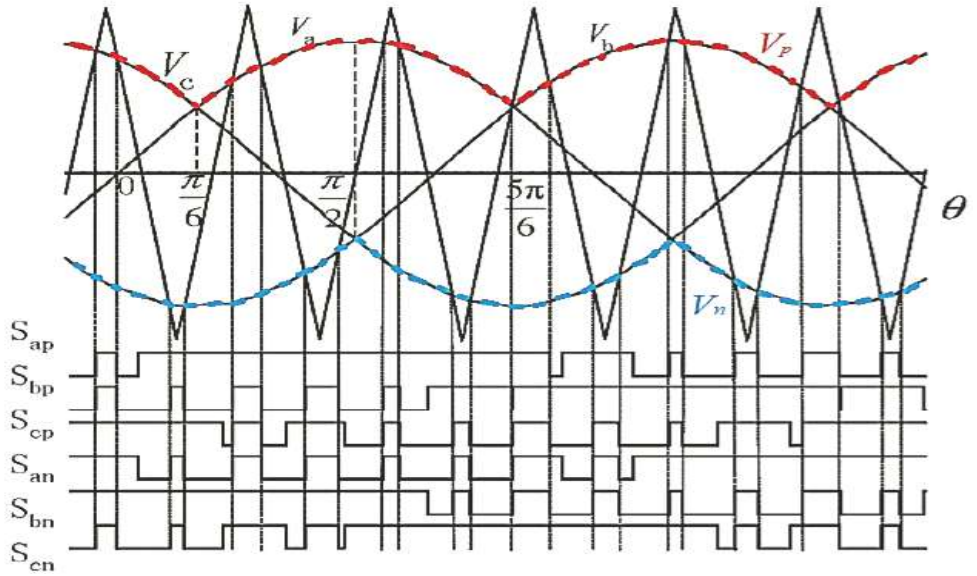


Figure II.3 Contrôle de la modulation de largeur d'impulsion du Boost maximum.

Dans le cas de Maximum Boost Control, la période de temps totale de zéro état est convertie en l'état de tournage, ce qui entraîne un meilleur résultat que La commande d'élévation simple.

II.2.1.3 Maximum Constant Boost Control (MCBC):

Afin de réduire le volume et le coût, il est important de toujours maintenir le rapport de service constant. La figure (II.4) montre la carte d'esquisse de la méthode de commande d'élévation constante et maximale, qui permet d'obtenir le gain de tension maximal tout en maintenant toujours le rapport de service de prise de vue constant [14].

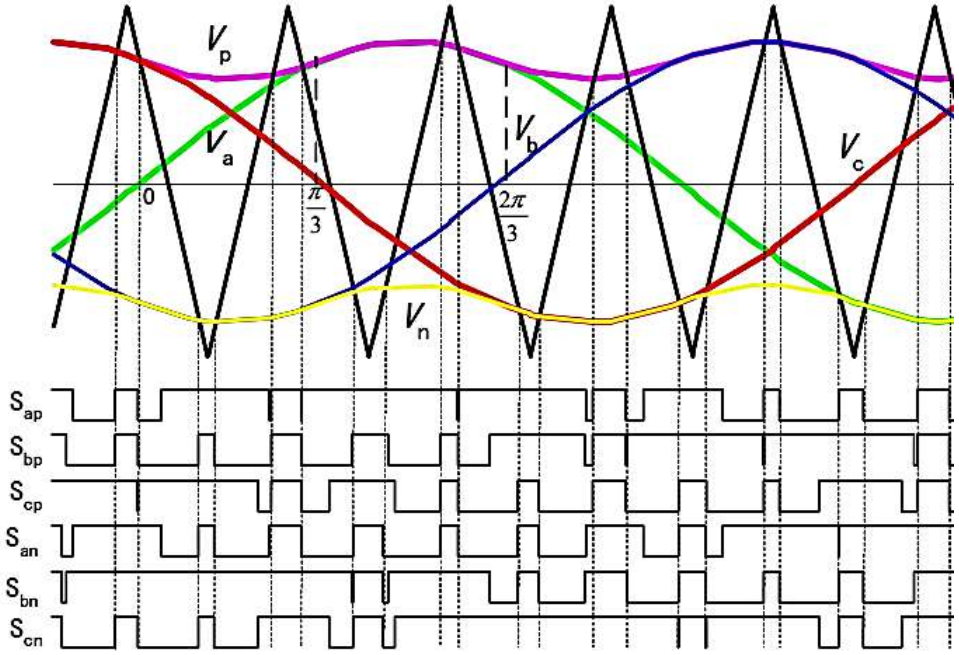


Figure II.4 Signaux de commande de la stratégie MCBC

Il y a cinq courbes de modulation dans cette méthode de contrôle : trois signaux de référence, V_a, V_b et V_c, et deux signaux d'enveloppe de prise de vue, V_p et V_n. Lorsque l'onde triangulaire porteuse est supérieure à l'enveloppe de pousse supérieure, V_p ou inférieure à l'enveloppe de pousse inférieure V_n, l'onduleur est tourné vers un état de pousse. Entre les deux, l'onduleur commute de la même manière que dans le contrôle MLI basé sur un transporteur traditionnel [15].

Pour la première demi-période, (0, π/3) sur la figure (II.4), les courbes d'enveloppe supérieure et inférieure peuvent être exprimées respectivement par les équations suivantes :

$$\boldsymbol{V_{P1} = \sqrt{3M} + \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) M} \qquad \boldsymbol{0 < \theta < \frac{\pi}{3}} \qquad \text{(II.2)}$$

$$\boldsymbol{V_{n1} = \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) M} \qquad \boldsymbol{0 < \theta < \frac{\pi}{3}} \qquad \text{(II.3)}$$

Et pour la seconde demi-période (π/3, 2π / 3) sont exprimées respectivement comme :

$$V_P = \sin(\theta)\, M \qquad \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{2\pi}{3} \qquad \text{(II.4)}$$

$$V_{n2} = \sin(\theta) M - \sqrt{3M} \qquad \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{2\pi}{3} \qquad \text{(II.5)}$$

La troisième injection harmonique est couramment utilisée dans un système d'onduleur triphasé pour augmenter la plage d'indice de modulation. Ceci peut également être utilisé ici pour augmenter la plage de manière à augmenter la plage de gain de tension du système [16]. Le croquis est présenté à la figure (II.5)

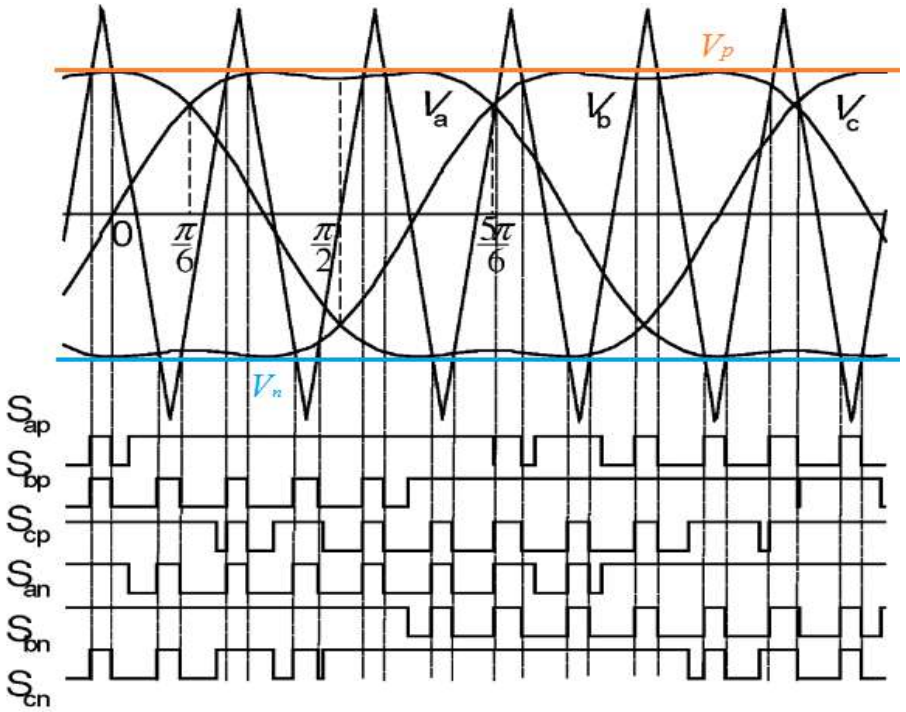


Figure II.5 Maximum Constant Boost MLI Control avec injection harmonique de troisième

Le principe de fonctionnement est identique au cas précédent, la seule différence est que la forme d'onde de modulation est changée. L'indice de modulation maximal peut être atteint à la troisième injection harmonique [PMZ 05].

II.2.2 Commande de modulation de largeur d'impulsion à vecteur spatial (SVPWM) :

La MLI à vecteur spatial (SVPWM) est une technique conçue pour la commande d'onduleurs de moteurs à courant alternatif triphasés ; elle fonctionne en fonction de leur séquence de commutation spéciale et de l'effet de la combinaison des différentes largeurs d'impulsions. En conséquence, les enroulements dans le moteur à courant alternatif généreront les ondes sinusoïdales triphasées, qui ont des déphasages de 120° et moins d'harmoniques [10].

Par rapport à la MLI sinusoïdale, la MLI à vecteur spatial est largement utilisée pour les applications d'entraînement à fréquence variable en raison de ses divers avantages tels que :

- Utilisation plus élevée de tension DC.

- Composant fondamental plus élevé et moins d'harmoniques.
- Le MLI à vecteur spatial est préférable de contrôler le moteur à courant alternatif par un système de contrôle numérique.

II.2.2.1 MLI à vecteur spatial modifié (MSVPWM) :

La commande de tension de sortie par la MLI à vecteur spatial (SVPWM) consiste à commuter entre les deux vecteurs de tension actifs et un vecteur de tension nulle de telle sorte que la moyenne temporelle dans chaque cycle de commutation corresponde à la commande de tension. Afin d'appliquer ce concept pour l'onduleur Z-source, un nouveau MLI à vecteur spatial modifié est nécessaire pour introduire les états shoot-through dans les vecteurs zéro sans compromettre les états actifs [17].

II.2.2.2 Transformation rotative :

Le concept de vecteur spatial, qui est dérivé du champ tournant du moteur à induction, est utilisé pour moduler la tension de sortie de l'onduleur. Dans cette technique de modulation, les quantités triphasées peuvent être transformées en leur quantité biphasée équivalente, soit dans la trame de la rotation synchrone (ou) trame stationnaire. A partir de ces composantes biphasées, la magnitude du vecteur de référence peut être trouvée et utilisée pour moduler la sortie de l'onduleur [18].

Les performances du moteur triphasé sont décrites par leurs équations de tension. Si $\boldsymbol{U_m}$ est la valeur de crête de la tension sinusoïdale triphasée et ω= 2πf est la fréquence radiale, le système mathématique sinusoïdal triphasé peut être représenté comme suit :

$$\begin{cases} \boldsymbol{V_a = U_m cos(\omega t)} \\ \boldsymbol{V_b = U_m cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)} \\ \boldsymbol{V_c = U_m cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)} \end{cases} \quad \text{(II.6)}$$

Lorsque cette tension triphasée est appliquée à la machine à courant alternatif, elle produit un flux rotatif dans l'entrefer de la machine à courant alternatif. Ce flux résultant tournant peut-être représenter comme un vecteur de tension tournant unique. La magnitude et l'angle du vecteur tournant peuvent être trouvés au moyen de la transformation de Clark comme expliqué ci-dessous dans le cadre de référence stationnaire.

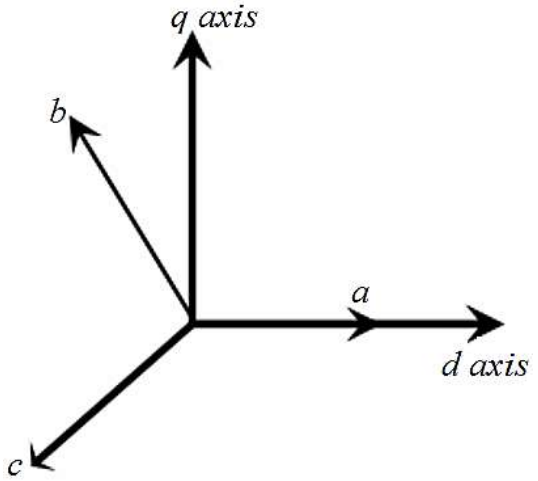


Figure II.6 La relation entre la trame de référence abc et l la trame de référence stationnaire dq

La transformation du domaine triphasé en domaine biphasé est exprimée par :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{pmatrix} \quad \text{(II.7)}$$

Puis échanger les éléments α β et les éléments abc de la matrice (II.8), (Clark ou transformation de α-β) :

$$\begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad \text{(II.8)}$$

A partir de la transformation de Clarke, nous pouvons dériver la transformation de Park (transformation dp0) :

$$\begin{pmatrix} U_d \\ U_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad \text{(II.9)}$$

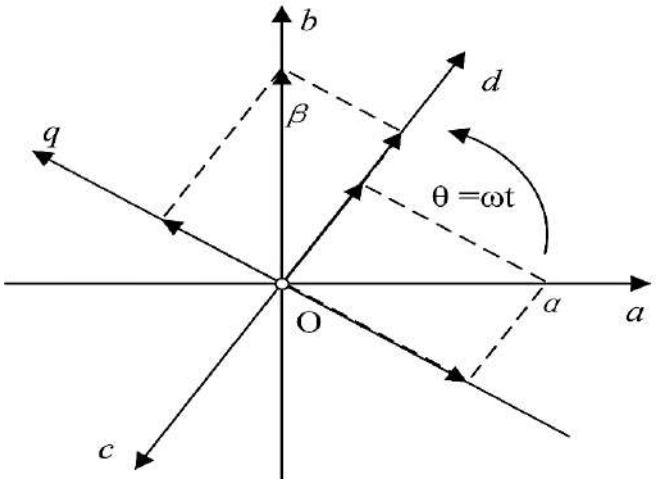


Figure II.7 Transformation de Park du système de coordonnées triphasé au système de coordonnées rotatif dq0

II.2.2.3 Principe de la MLI à vecteur spatial :

Les tensions de phase de sortie de l'onduleur dépendent de la relation entre les variables de commutation [C_1 ; C_3 ; C_5] et la tension continue comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_3 \\ C_5 \end{bmatrix} \quad \text{(II.10)}$$

MLI à vecteur spatial (SVPWM) fonctionne sur le principe que lorsque le commutateur supérieur est activé, le commutateur inférieur correspondant est désactivé. L'état ON et OFF des commutateurs supérieurs (C1, C3, C5) évalue les tensions de sortie. Les états de commutation, les commutateurs à l'état actif et la définition du vecteur sont présentés dans le tableau (II.1).

Tableau II.1 Vecteurs spatiaux, états de commutation et commutateurs à l'état actif.

Vecteur spatial	État de commutation	Commutations à l'état actif	Définition du vecteur
$\overrightarrow{V_0}$	[000]	C4, C6, C2	$\overrightarrow{V_0}= \mathbf{0}$
$\overrightarrow{V_1}$	[100]	C1, C6, C2	$\overrightarrow{V_1}= \frac{2}{3} V_{dc} e^{j0}$
$\overrightarrow{V_2}$	[110]	C1, C3, C2	$\overrightarrow{V_2}= \frac{2}{3} V_{dc} e^{j\frac{\pi}{3}}$
$\overrightarrow{V_3}$	[010]	C4, C3, C2	$\overrightarrow{V_3}= \frac{2}{3} V_{dc} e^{j\frac{2\pi}{3}}$
$\overrightarrow{V_4}$	[011]	C4, C3, C5	$\overrightarrow{V_4}= \frac{2}{3} V_{dc} e^{j\frac{3\pi}{3}}$
$\overrightarrow{V_5}$	[001]	C4, C6, C5	$\overrightarrow{V_5}= \frac{2}{3} V_{dc} e^{j\frac{4\pi}{3}}$
$\overrightarrow{V_6}$	[101]	C1, C6, C5	$\overrightarrow{V_6}= \frac{2}{3} V_{dc} e^{j\frac{5\pi}{3}}$
$\overrightarrow{V_7}$	[111]	C1, C3, C5	$\overrightarrow{V_7}= \mathbf{0}$

La stratégie MLI à vecteur spatial approxime le vecteur de tension de référence V_{ref} pendant chaque période de modulation par une combinaison de huit vecteurs, chacun relatif à une configuration ou un état donné de l'onduleur, les six vecteurs actifs divisent le plan en six secteurs, (60°ou $\boldsymbol{\pi}/_{\mathbf{6}}$) pour chaque secteur, V_{ref} doit être généré pendant chaque période de modulation par deux vecteurs actifs adjacents (V1 à V6) et deux vecteurs d'états nuls (V0 ou V7) [6].

Le diagramme de vecteurs spatiaux pour un onduleur conventionnel à source de tension et à source d'impédance est illustré à la figure (II.8).

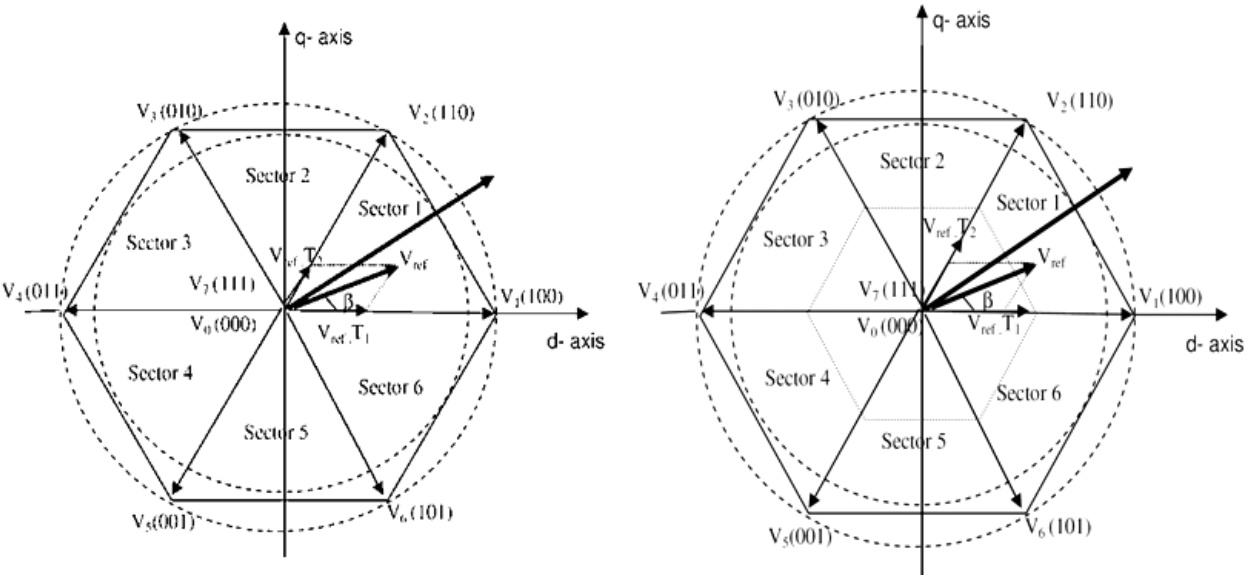


Figure II.8 Vecteur de tension à travers la MLI à vecteur spatial conventionnel du VSI**.**

Afin de déterminer quel vecteur spatial de tension sera utilisé pour générer le vecteur synthétisé de tension $\overrightarrow{\boldsymbol{V_{out}}}$, nous devons utiliser les valeurs $\boldsymbol{u_\alpha}$ et $\boldsymbol{u_\beta}$ dans le αβ système de coordonnées AB pour déterminer le secteur qui travaillera sur la statue active. Définissez trois valeurs variables U_{ref1}, U_{ref2} et U_{ref3} dans l'équation (II.11) :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{U_{ref1}} &= \boldsymbol{u_\beta} \\ \boldsymbol{U_{ref2}} &= \sqrt{\boldsymbol{3}}\boldsymbol{u_\alpha} - \boldsymbol{u_\beta} \\ \boldsymbol{U_{ref3}} &= -\sqrt{\boldsymbol{3}}\boldsymbol{u_\alpha} - \boldsymbol{u_\beta} \end{aligned} \qquad \text{(II.11)}$$

Ensuite, définissez les trois autres variables A, B et C et établissez la relation comme suit ci-dessous :

Si $U_{ref1} > 0$, alors A=1, sinon, A=0 ;

Si $U_{ref2} > 0$, alors B=1, sinon, B=0 ;

Si $U_{ref3} > 0$, alors C=1, sinon, C=0 ;

Soit : $\boldsymbol{N = 4 \times C + 2 \times B + A}$ **(**II.12)

Nous pouvons alors obtenir la relation entre N et le secteur, comme le montre le tableau (II.2).

Tableau II.2 La relation correspondante entre N et le secteur

N	3	1	5	4	6	2
Secteur	I	II	III	IV	V	VI

Les schémas de commutation dans les six secteurs sont illustrés à la figure (II.9) et l'algorithme de la modulation de largeur d'impulsion à vecteur spatial classique de VSI est décrit comme suit.

L'indice de modulation est :

$$\boldsymbol{M} = \frac{\boldsymbol{V}_{\text{ref}}}{\frac{\boldsymbol{2}}{\boldsymbol{3}}\boldsymbol{V_{dc}}} \qquad \text{(II.13)}$$

Les durées de commutation pour les états actifs sont les suivantes :

$$\boldsymbol{T_1} = \frac{\boldsymbol{T_s \cdot M \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \beta\right)}}{\boldsymbol{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)}} \quad / \quad \boldsymbol{T_2} = \frac{\boldsymbol{T_s \cdot M \cdot \sin(\beta)}}{\boldsymbol{\sin\left(\frac{t}{3}\right)}} \qquad \text{(II.14)}$$

La durée du temps de commutation pour l'état zéro est :

$$\boldsymbol{T_0} = \boldsymbol{T_S} - (\boldsymbol{T_1} + \boldsymbol{T_2}) \qquad \text{(II.15)}$$

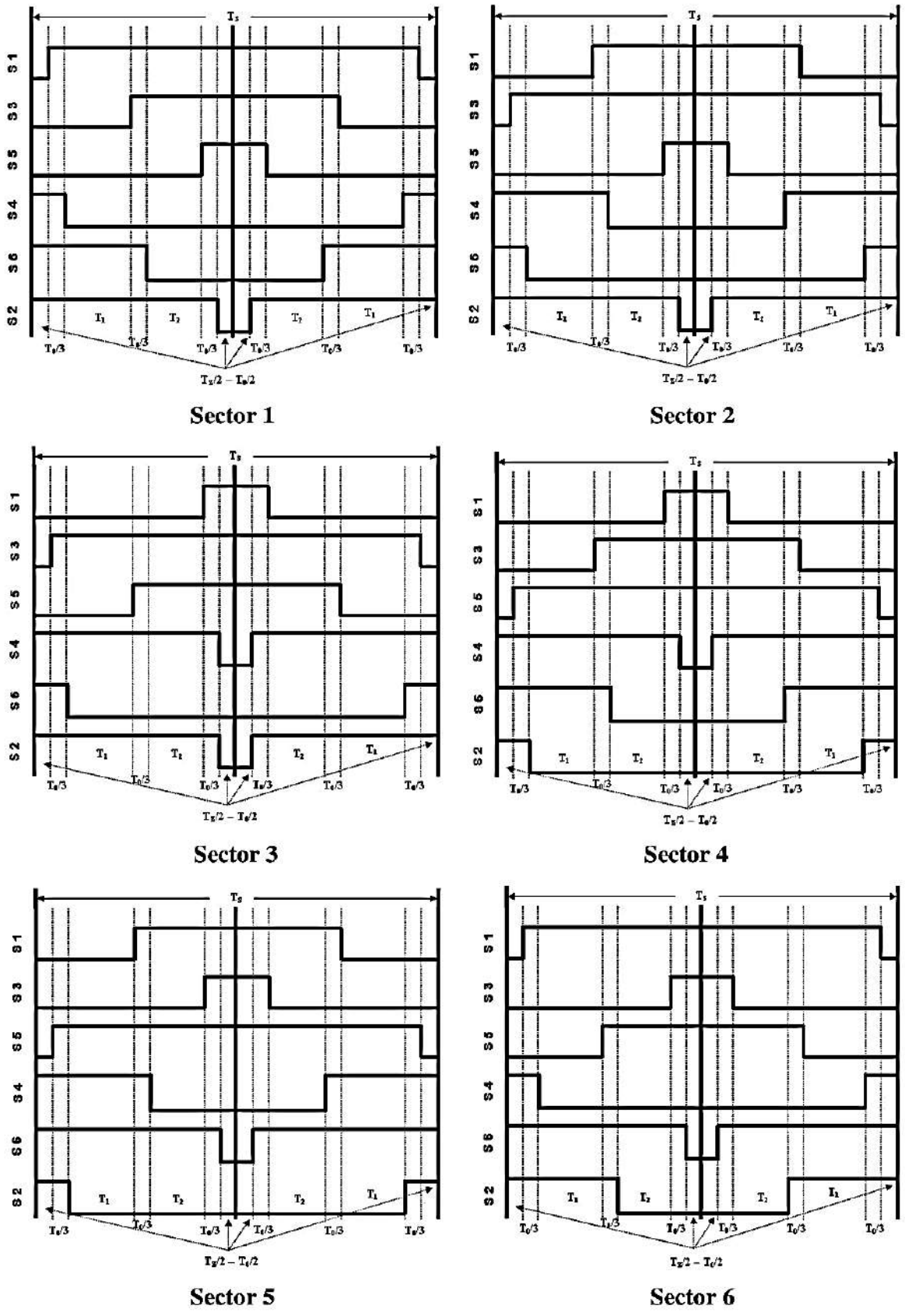


Figure II.9 Modèles de commutation et placement des états ST dans tous les secteurs par MLI à vecteur spatial.

Le MLI à vecteur spatial permet de contrôler le temps de shoot-through dans le ZSI. Si le vecteur de tension de référence V_{ref} est situé entre les vecteurs arbitraires V_i et V_{i+1}, le vecteur de tension de référence est divisé en deux vecteurs de tension adjacents (V_i et V_{i+1}) et en vecteurs nuls (V_0 et V_7). Dans un intervalle d'échantillonnage, V_i et V_{i+1} sont appliqués aux temps T_1 et T_2, respectivement, et le vecteur zéro est appliqué au temps T_0.

Par conséquent, le vecteur de tension de référence V_{ref} peut être obtenu comme [19] :

$$\boldsymbol{V_{ref} = V_i T_1 + V_i T_2} \qquad \text{(II.16)}$$

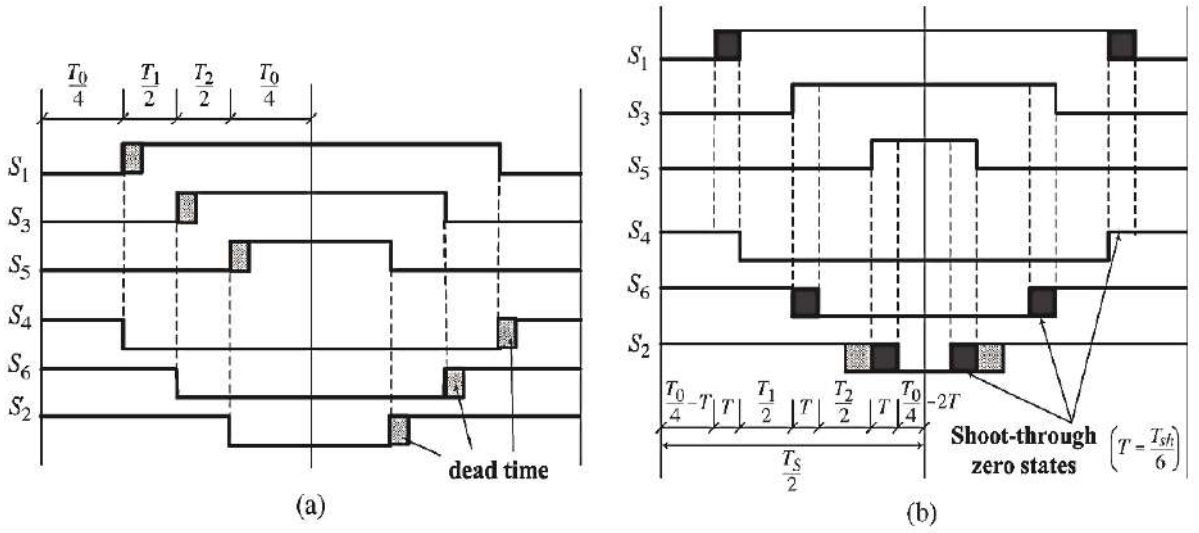


Figure II.10 Modelés de commutation MLI au secteur i.

(a) Schémas de commutation pour la MLI à vecteur spatial traditionnelle**. (b)** Schémas de commutation pour la MLI à vecteur spatial modifiée.

La figure (II.10) montre les schémas de commutation MLI pour le MLI à vecteur spatial traditionnel et le MLI à vecteur spatial modifié lorsque le vecteur de tension de référence est au secteur I.

✓ Contrairement au MLI à vecteur spatial modifié traditionnel, le MLI à vecteur spatial modifié dispose d'un temps de shoot-through supplémentaire T_{sh} pour augmenter la tension de la liaison CC de l'onduleur en dehors des intervalles de temps T_1, T_2 et T_0. Les états de shoot-through sont affectés de manière égale à chaque phase avec $T_{sh/6}$ dans les périodes de tension nulle T_0, comme le montre la figure (II.10 (b)). Les périodes de tension nulle doivent être réduites pour générer un temps de shoot-through, et les périodes d'états actifs T_1 et T_2 sont inchangées. Ainsi, le temps de shoot-through n'affecte pas la commande PWM de l'onduleur, et il est limité au temps d'état zéro T_0. Les six signaux MLI dans le schéma MLI à vecteur spatial modifié doivent être commandés indépendamment [20].

Le vecteur de tension de référence V_{ref} peut être obtenu comme suit :

$$\boldsymbol{V_{ref} = V_1 T_1 + V_2 T_2} \qquad \text{(II.17)}$$

II.3 Résultats de simulation :

Cette partie consacrée par les résultats de simulation dont illustre ci-dessous**.**

II.3.1 Résultats de simulation de MLI Sinusoïdale (SPWM) :

II.3.1.1 Résultats de simulation SBC :

- **Pour le modèle Simulink de SBC voire Annexe. B (**Figure 6 – page vi)

Cette simulation a donné les résultats suivants comme le montre la Figure II.11 :

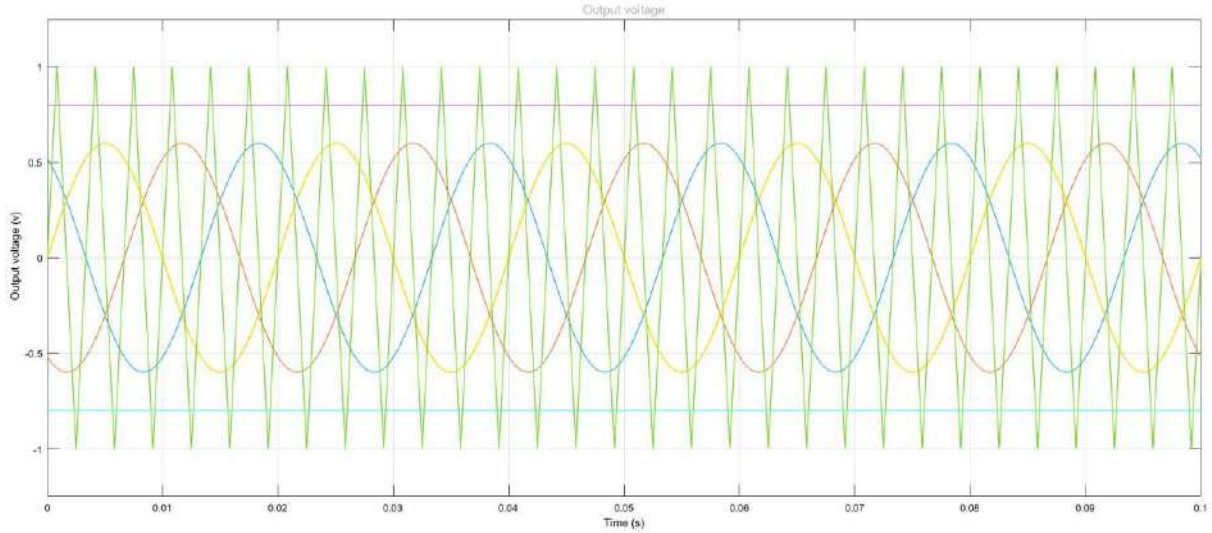


Figure II.11 Illustration du Simple Boost Control

En plus de la MLI sinusoïdale traditionnelle, la commande simple de boost présentée à la Figure II.11 & Figure II.12 utilise deux lignes droites égales à la valeur de crête des trois références de phase pour réguler le rapport cyclique de shoot-through. Chaque fois que la forme d'onde triangulaire est supérieure à la ligne supérieure Vp, ou inférieure à la ligne inférieure Vn, le circuit est mis en état de shoot-through.

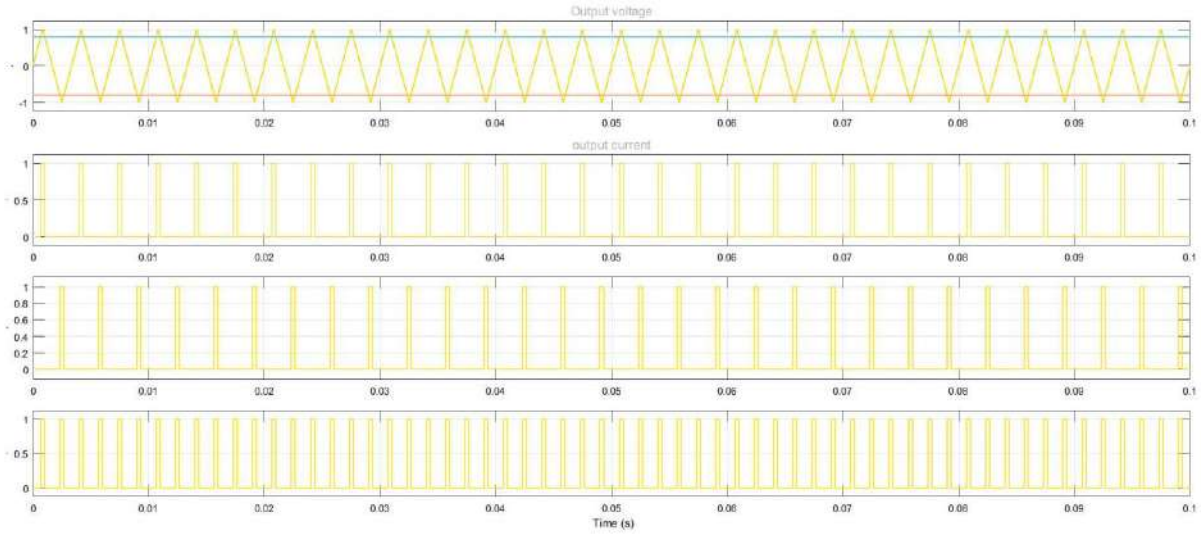


Figure II.12 Génération d'impulsions shoot-through par l'adaptation d'une technique de SBC.

Les impulsions produites par huit états actifs et les impulsions produites dans les états zéro shoot-through (voir la Figure II.13) sont combinées ensemble pour la génération des impulsions pour l'onduleur qui est montré dans la figure suivante.

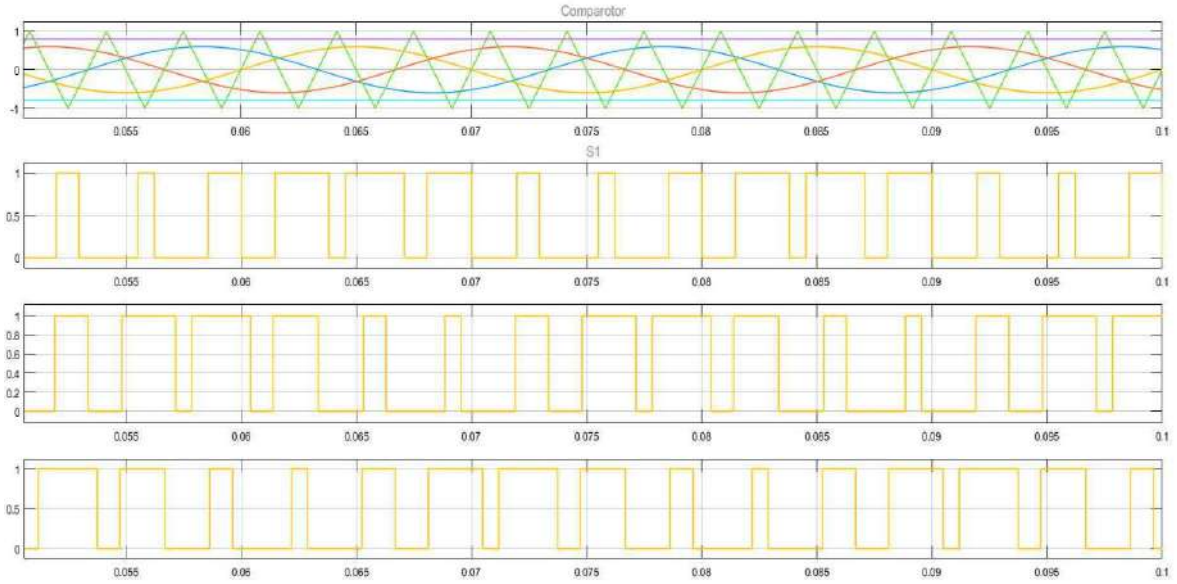


Figure II.13 Génération d'impulsions pour les commutateurs à l'aide d'une technique SBC.

Les figures suivantes montrent les tensions simples :

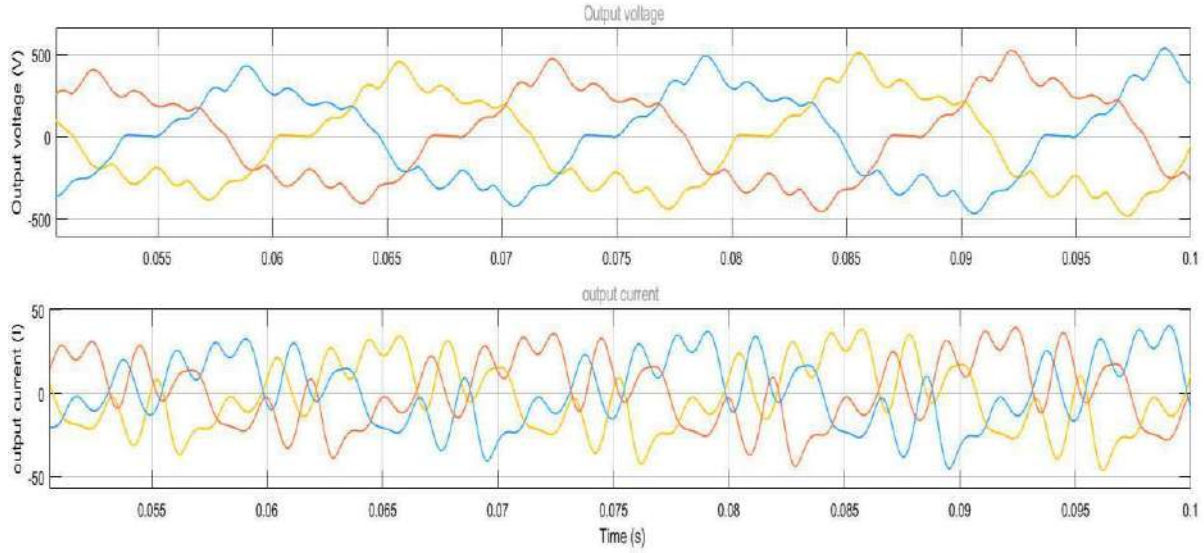


Figure II.14 Tension simple et courant élevées à différentes fréquences.

Les résultats de cette technique montrent que L'onduleur alimente la charge avec tensions élevées à différentes fréquences.

II.3.1.2 Résultats de simulation MCBC :

- **Pour le modèle Simulink de MCBC voire Annexe. B (**Figure 4– page v)

Cette simulation a donné les résultats suivants comme le montre la Figure II.15 **:**

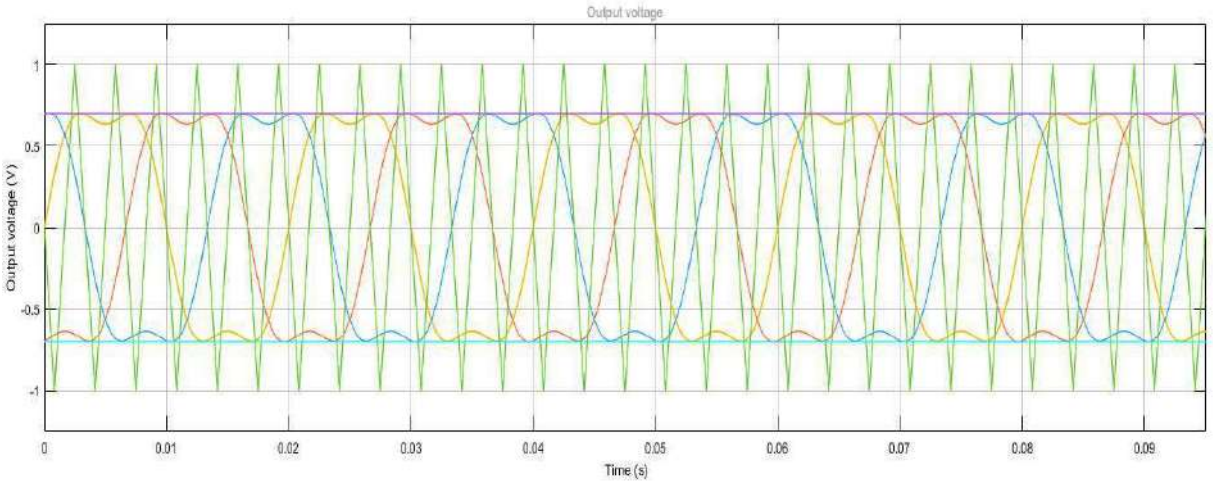


Figure II.15 Illustration du Maximum Constant Boost Control

Le taux de service de shoot-through doit toujours être maintenu constant afin de réduire le volume ainsi que le coût. Simultanément, pour diminuer la tension aux bornes des dispositifs de commutation, pour tout indice de modulation, une meilleure élévation de tension est souhaitée. Le gain de tension maximal est obtenu par la commande d'amplification constante maximale, comme le montre la Figure II.16, en maintenant le taux de service de shoot-through constant à tout moment.

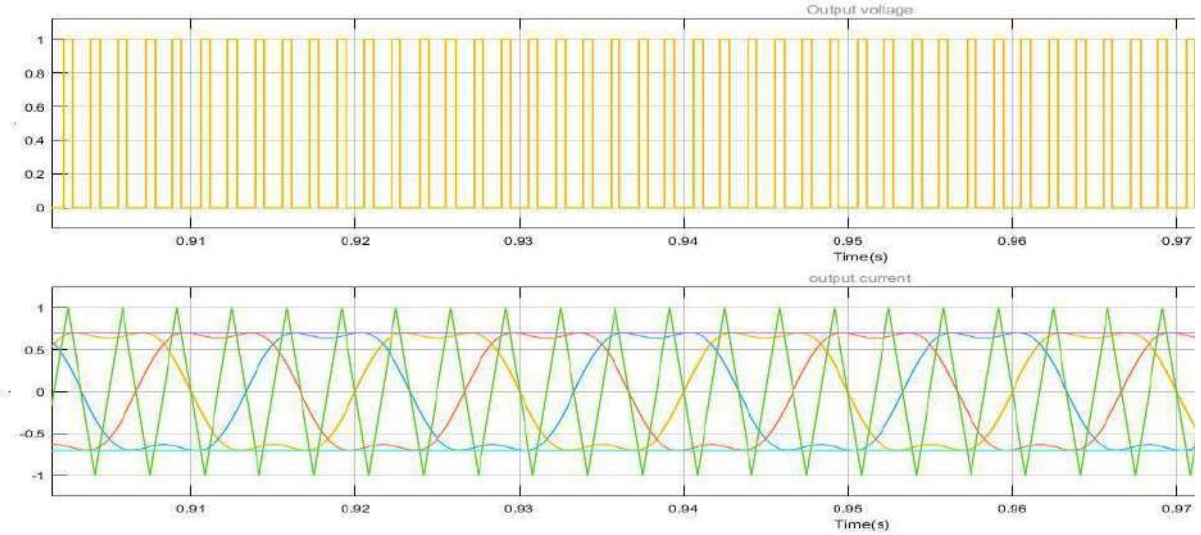


Figure II.16 Génération d'impulsions de shoot-through en adaptant la technique de MCBC

Les figures suivantes montrent la tension composée et courant :

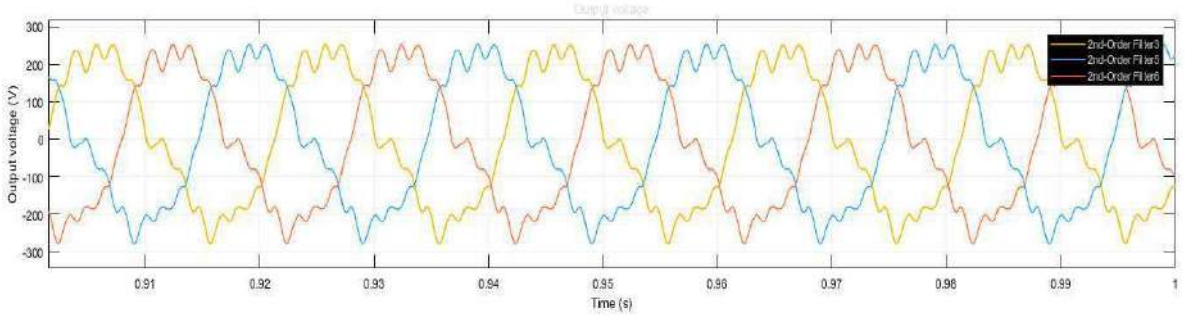


Figure II.17 Tension composée

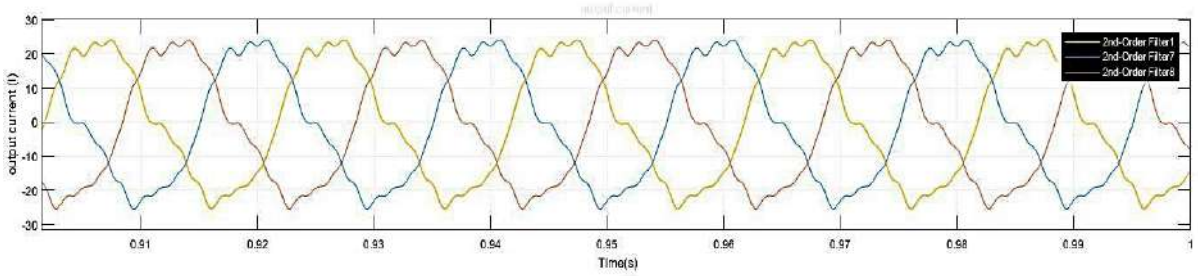


Figure II.18 courant de sortie.

II.3.1.3 Résultats de simulation MBC :

- **Pour le modèle Simulink de MBC voire Annexe. B (**Figure 2 – page iv)

Cette simulation a donné les résultats suivants comme le montre la Figure II.19 **:**

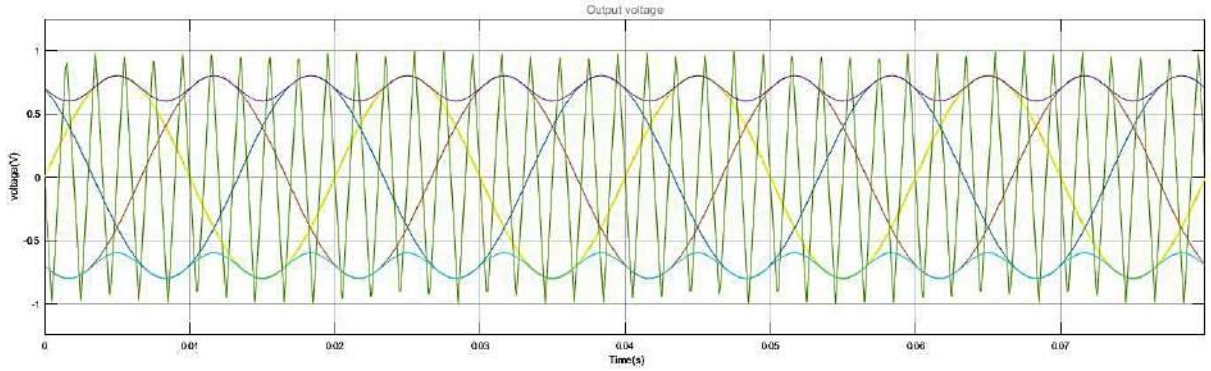


Figure II.19 Illustration du Maximum Boost Control.

Dans le cas de la MBC, comme le montre la Figure II.20, la période d'état zéro est complètement utilisée et transformée en état de shoot-through, ce qui donne un meilleur résultat que la SBC. Dans cette stratégie, chaque fois que l'onde porteuse triangulaire est supérieure à la courbe maximale des références (Va, Vb, Vc) ou lorsqu'elle est inférieure au minimum des références.

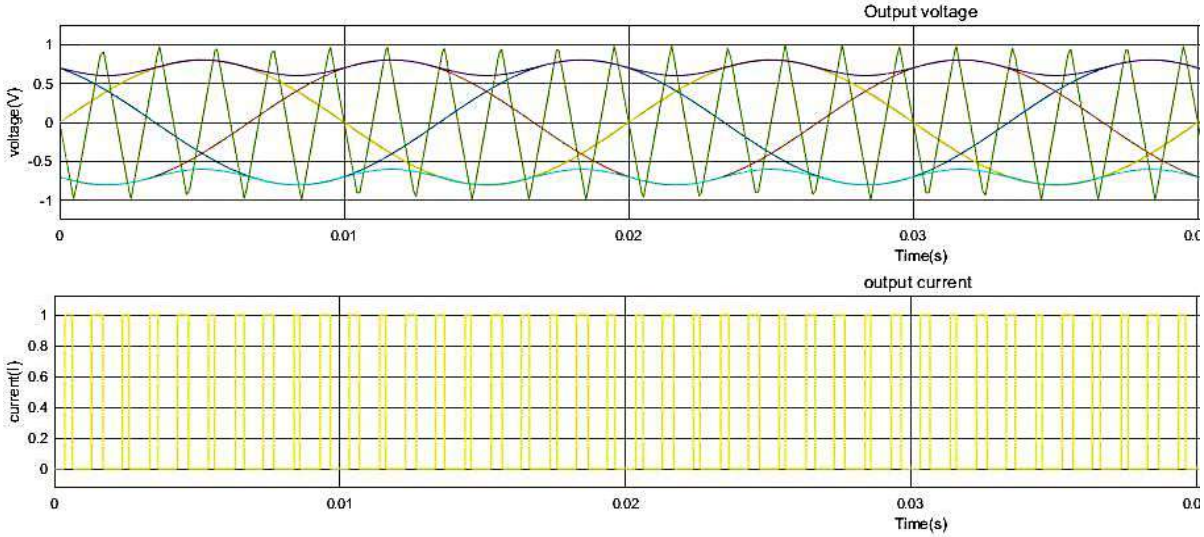


Figure II.20 Impulsion de déclenchement du MBC.

Une onde porteuse triangulaire est évaluée avec une onde sinusoïdale de référence triphasée, chaque phase d'un état de shoot-through de l'interrupteur du côté positif se produit chaque fois que la valeur de crête du triangle dépasse l'amplitude de crête sinusoïdale.

En considérant la tension de sortie de l'onduleur, on peut dire qu'il fonctionne en mode boost ou buck. L'entrée correspondante du circuit de l'onduleur est la sortie du pont redresseur à diodes (Figure II.21).

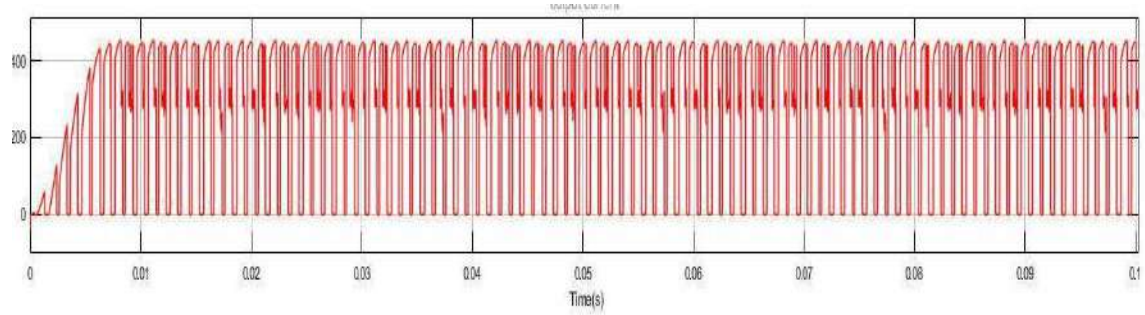


Figure II.21 Tension de sortie du redresseur à pont de diodes pour M=0.8.

La tension aux bornes du condensateur est représentée sur la Figure II.22. Au début, la tension du condensateur augmente jusqu'à maximale, puis elle atteint une valeur constante.

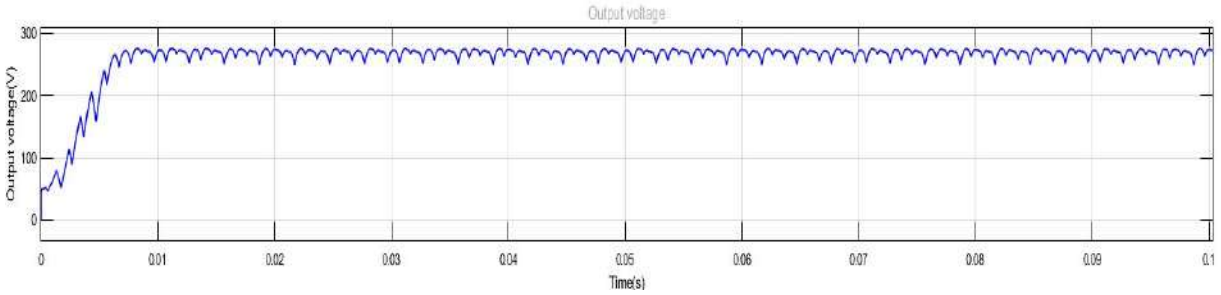


Figure II.22 Tension à travers le condensateur pour M=0.8.

Ici, une charge triphasée RL en série est connectée au ZSI. La tension de sortie triphasée à travers la charge est montrée dans la figure 17.

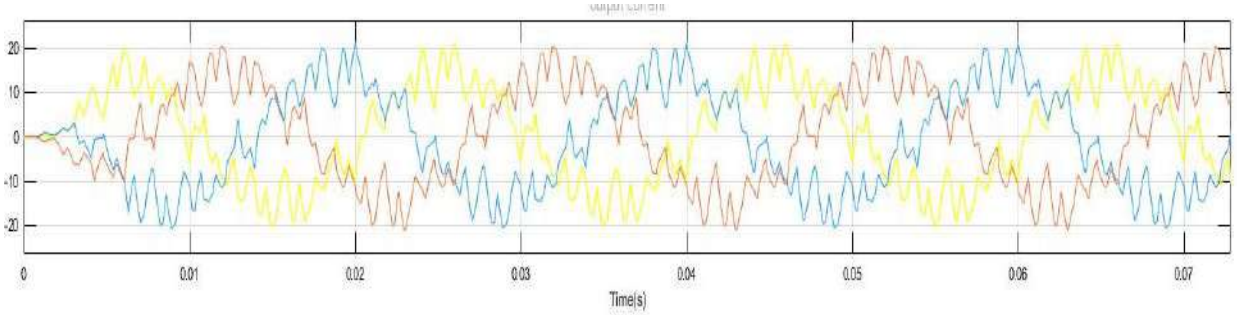


Figure II.23 Tension de charge triphasée à travers la charge pour M=0.8.

II.3.2 Résultats de simulation de MLI à vecteur spatial (SVPWM) :

- **Pour le modèle Simulink de MLI vectoriel voir Annexe. B (**Figure 8 – page vii)

Les résultats de simulation pour le MLI vectoriel proposé sont présentés dans les Figure II.24 à Figure II.26. La tension de phase de sortie et les la forme d'onde de la tension de ligne de sortie de la commutation du ZSI avec les méthodes SVM sont montrées dans la Figure II.25 et la Figure II.24 ; la Figure II.26. Montre le courant de ligne de sortie.

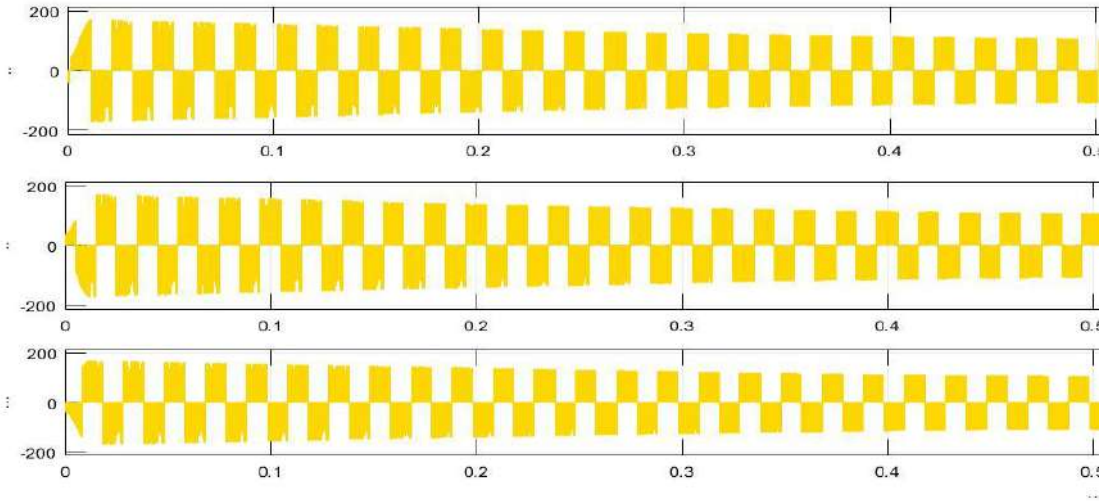


Figure II.24 Forme d'onde de la tension de ligne de sortie de la commutation ZSI (SVM)

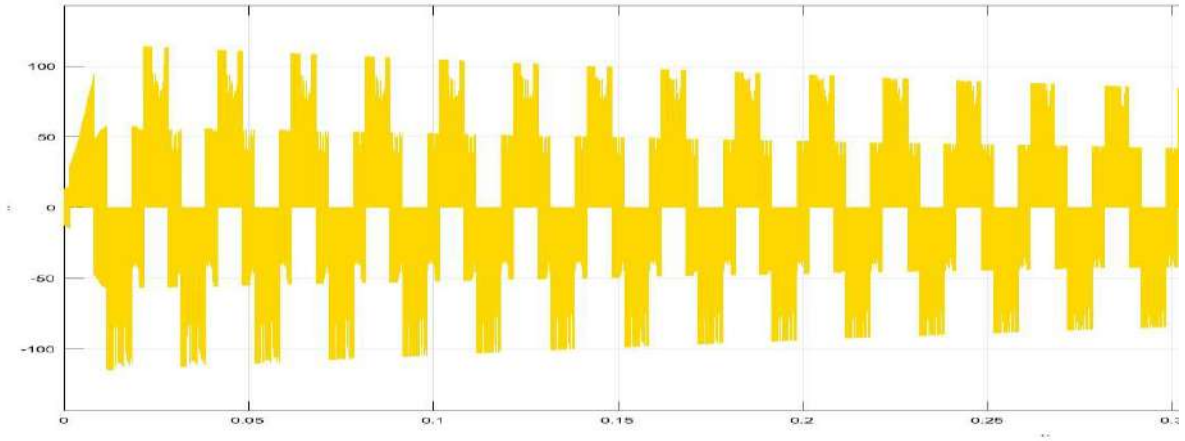


Figure II.25 Formes d'onde de la tension de phase de sortie.

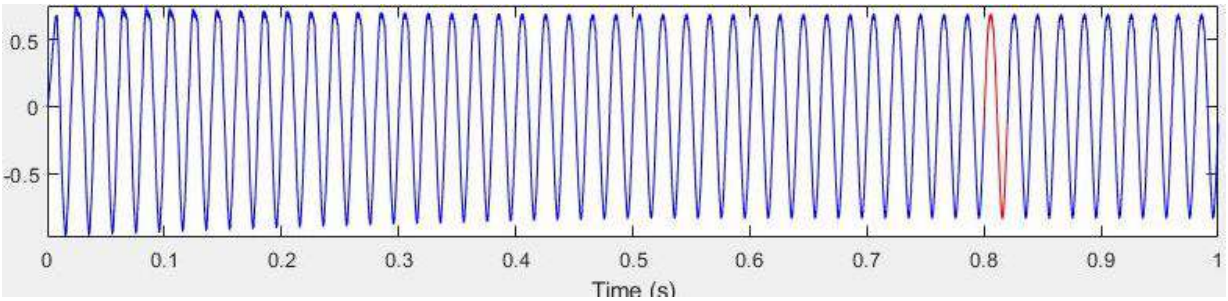


Figure II. 26 Formes d'onde du courant de charge

Une analyse harmonique de la tension de la ligne de sortie et du courant de sortie a été effectuée et la distorsion harmonique totale du courant de charge s'est avérée être de 8.74 %. Total La distorsion harmonique totale de la tension de phase de sortie s'est avérée être de 103.64 %. Les spectres harmoniques du courant de charge et de la tension de phase de sortie sont montrés dans la Figure II.27 et la Figure II.28.

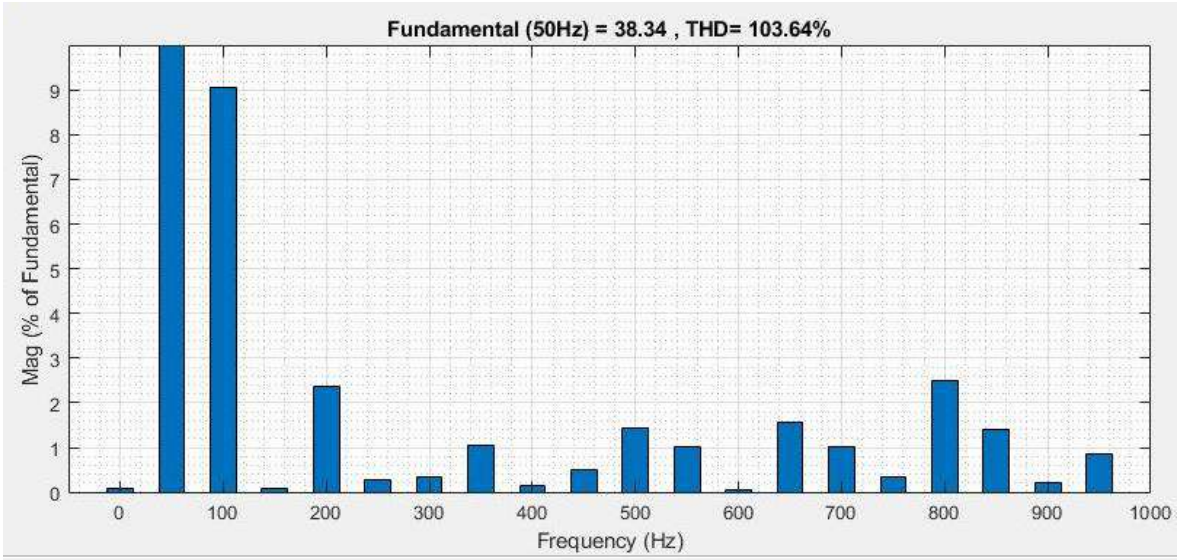


Figure II. 27 Spectre harmonique de la tension de phase de sortie.

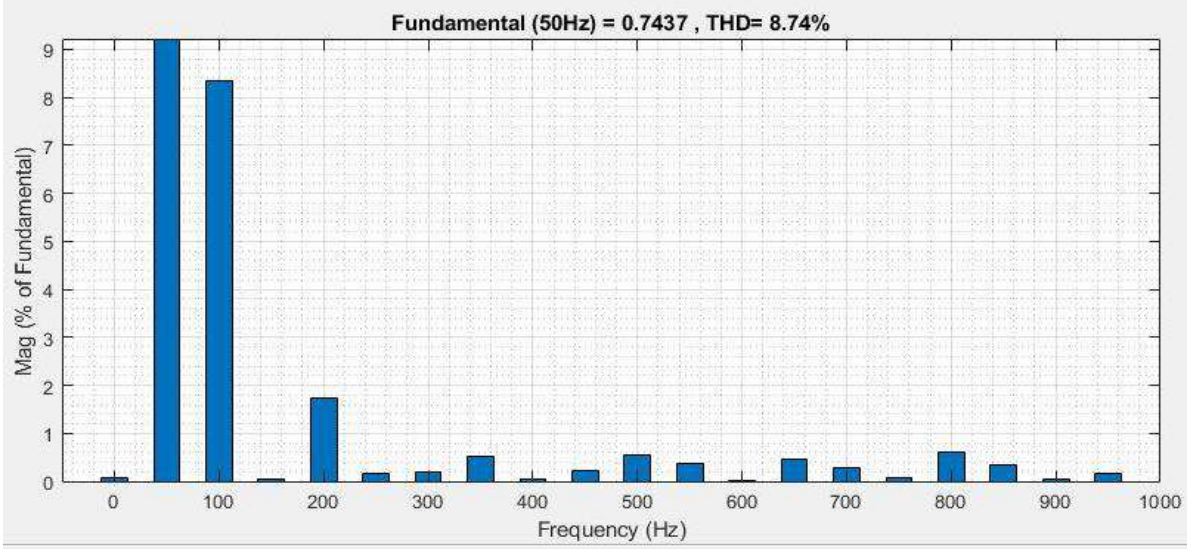


Figure II.28 Spectre harmonique du courant de sortie.

L'angle est généré à partir de la fréquence de sortie de référence en l'intégrant. Sur la base de l'angle, le secteur peut être identifié. Le résultat est montré dans la Figure II.29.

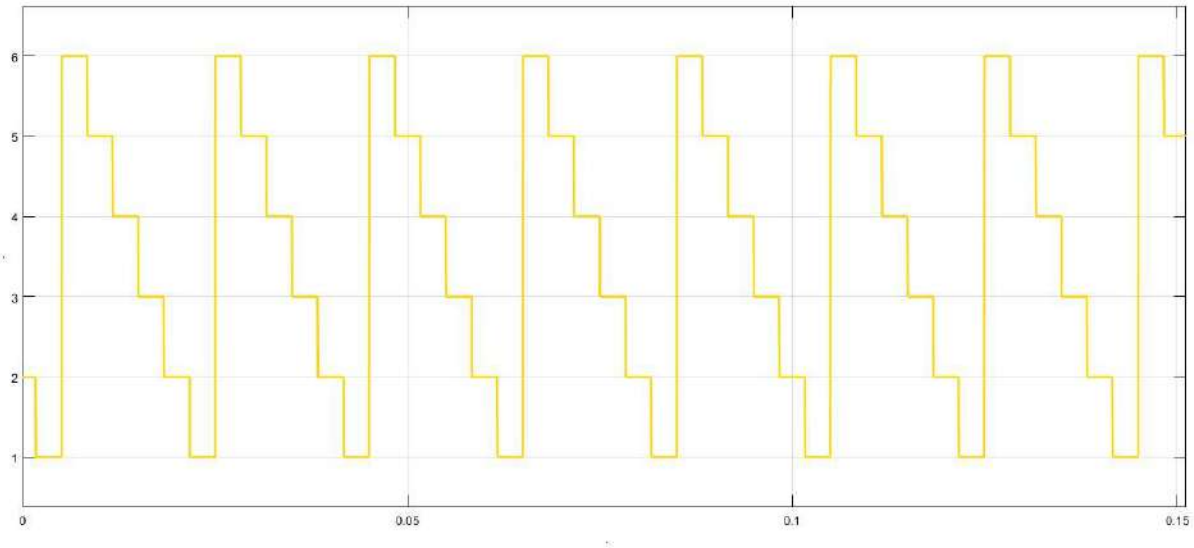


Figure II.29 Profil du rapport cyclique avec MLI vectoriel.

Le contrôle de la tension de sortie est effectué en faisant varier l'indice de modulation en amplitude : $\boldsymbol{m_a = \frac{v_*}{v_{tri}}}$, c'est-à-dire, en maintenant l'amplitude de l'onde triangulaire fixe, nous pouvons, faire varier la largeur d'impulsion en faisant varier la tension de référence positive et négative. La fréquence du signal triangulaire impose la fréquence fondamentale de la tension de sortie. Dans la Figure II.30, nous pouvons observer le signal $\boldsymbol{v_{tri}}$ du système onduleur triphasé.

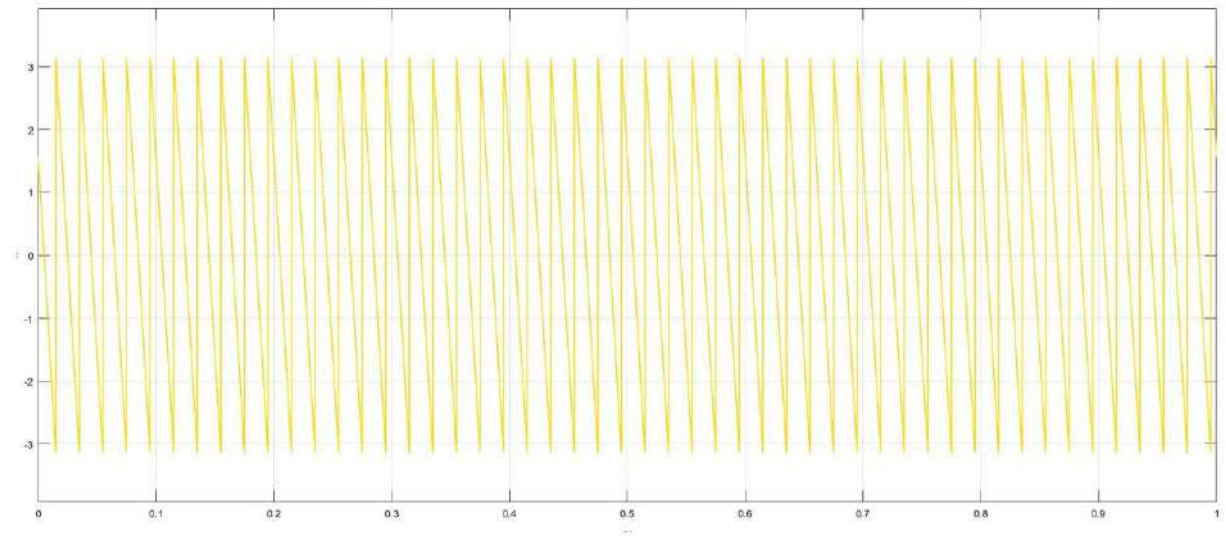


Figure II.30 Signal Vtri en fonction du temps.

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mis l'accent sur le principe de fonctionnement de l'onduleur Z-source, ainsi que sur les différentes stratégies de contrôle de cet onduleur. L'onduleur Z-source offre l'avantage d'augmenter la tension d'entrée sans utiliser de convertisseur élévateur (chopper boost).

Les séquences MLI ont été insérées dans les signaux de commande MLI sinusoïdale et MLI vectorielle pour obtenir le temps de shoot-through dans le réseau Z-source. Les résultats de la comparaison de ces stratégies de contrôle montrent que le contrôle MLI vectoriel est le plus approprié pour contrôler l'onduleur Z-source. Cependant, la stratégie MLI sinusoïdale se caractérise principalement par une remarquable simplicité.

L'analyse FFT est effectuée pour calculer la distorsion harmonique totale (THD) de la tension et du courant de sortie des onduleurs. L'expérience montre des résultats significatifs pour la tension du lien continu, et la forme d'onde de sortie a une bonne forme et moins de THD.

Chapitre III :

L’Onduleur Z-Source dans conversion PV

III.1. Introduction :

L'onduleur Z-source (ZSI) ont attiré une attention considérable dans les applications de production d'énergie photovoltaïque (PV) en raison de la conversion de puissance à un seul étage, de l'absence de temps mort entre les commutateurs d'une branche du pont et de la capacité à gérer une large variation de tension continue provenant du PV.

Ce chapitre traite de cette application, notamment des configurations typiques, de la conception des paramètres, du suivi du point de puissance maximale (MPPT) et des méthodes de contrôle du système, ainsi que de quelques exemples.

III.2 Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque (GPV) est l'ensemble des cellules solaires, des connexions, des pièces de protection, des supports, etc. Dans le cadre de la présente modélisation, l'accent est mis uniquement sur cellule/module/réseau.

Les cellules solaires sont constituées de matériaux semi-conducteurs (généralement du silicium), qui sont spécialement traités pour former un champ électrique, positif d'un côté (verso) et négatif de l'autre (vers le soleil). Lorsque l'énergie solaire (photons) frappe la cellule solaire, des électrons sont détachés des atomes du matériau semi-conducteur, créant ainsi des paires électron-trou [21]. Si des conducteurs électriques sont ensuite fixés aux côtés positif et négatif, formant ainsi un circuit électrique, les électrons sont capturés sous la forme d'un courant électrique I_{ph} (photocourant).

III.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque

III.3.1 La cellule photovoltaïque et ses caractéristiques électriques :

Le photovoltaïque est la conversion directe de la lumière en électricité au niveau+ atomique. Une cellule photovoltaïque est composée de matériaux semi-conducteurs qui absorbent les photons émis par le soleil et génèrent un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent le rayonnement solaire à une vitesse de 300 000 kilomètres par seconde. Lorsque les photons frappent un matériau semi-conducteur comme le silicium, ils libèrent les électrons de ses atomes, laissant derrière eux un espace vacant. Les électrons errants se déplacent au hasard, à la recherche d'un autre "trou" à remplir. [22]

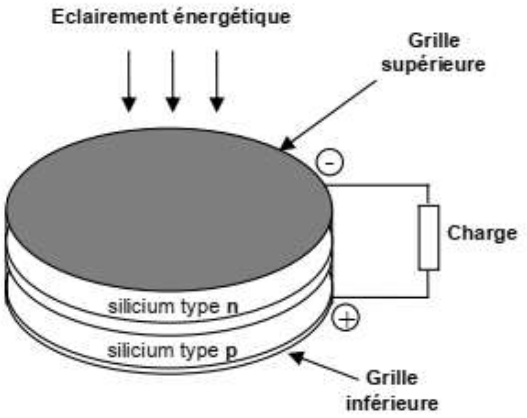


Figure III.1 Cellule photovoltaïque

Pour produire un courant électrique, cependant, les électrons doivent circuler dans la même direction. On y parvient en utilisant deux types de silicium. La couche de silicium exposée au soleil est dopée avec des atomes de phosphore, qui possède un électron de plus que le silicium, tandis que l'autre côté est dopé avec des atomes de bore, qui possède un électron de moins. Le sandwich ainsi obtenu fonctionne comme une batterie : la couche qui a un surplus d'électrons devient la borne négative (n) et le côté qui a un déficit d'électrons devient la borne positive (p). Un champ électrique est créé à la jonction entre les deux couches.

Dans l'obscurité, la cellule solaire n'est pas un dispositif actif, elle fonctionne comme une diode, c'est-à-dire une jonction p-n. Elle ne produit ni courant ni tension. Elle ne produit ni courant ni tension. Cependant, si elle est connectée à une alimentation externe (grande tension), elle génère un courant ID, appelé courant de diode ou courant d'obscurité [23].

Une cellule solaire est généralement représentée par un modèle électrique équivalent à une diode [21], comme le montre la figure III.2.

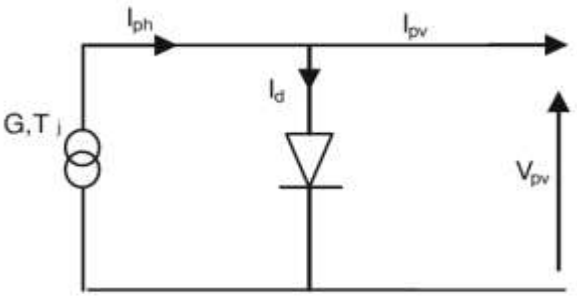


Figure III.2 Schéma électrique équivalent d'une cellule PV

Le modèle contient une source de courant Iph, une diode et une résistance série RS, qui représente la résistance à l'intérieur de chaque cellule et dans la connexion entre les cellules. Le courant net est la différence entre le photocourant Iph et le courant normal de la diode ID :

$$\boldsymbol{I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0\left(\exp\frac{e(V+IR_s)}{mkT_c} - 1\right)} \qquad \textbf{(III. 1)}$$

Dans cette équation, $\boldsymbol{m}$ est le facteur d'idéalisation, $\boldsymbol{k}$ est la constante des gaz de Boltzmann, $\boldsymbol{T_c}$ la température absolue de la cellule, e la charge électronique et $\boldsymbol{V}$ la tension imposée à travers la cellule. $\boldsymbol{I_0}$ est le courant de saturation de l'obscurité et il dépend fortement de la température [21].

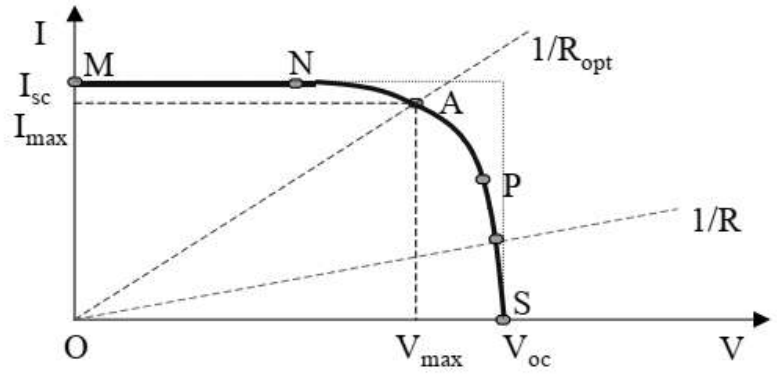


Figure III.3 Caractéristique *I-V* d'une cellule PV

Dans la représentation de la caractéristique I-V, une convention de signe est utilisée, qui prend comme positif le courant généré par la cellule lorsque le soleil brille et qu'une tension positive est appliquée aux bornes de la cellule.

La représentation standard d'un dispositif photovoltaïque est la caractéristique I-V (courant-tension). (Figure III.3). La courbe représente les combinaisons possibles de courant et de tension pour un dispositif PV dans des conditions ambiantes données. Le point de courant et de tension spécifique auquel le dispositif PV fonctionnera est déterminé par la charge à laquelle il est connecté. Déterminé par la charge à laquelle il est connecté.

III.3.2 Paramètre d'une cellule photovoltaïque :

Les principaux paramètres de la caractéristique V-I du dispositif photovoltaïque, comme l'indique la figure III.3, sont les suivants :

- **Courant de court-circuit** (Isc en notation internationale) ***: $Isc = Iph$.*** C'est le courant maximal que l'appareil produira dans des conditions d'éclairage et de température définies, correspondant à une tension égale à zéro **(V=0).**
- **Tension en circuit ouvert** (Voc en notation internationale) : c'est la tension maximale de l'appareil dans des conditions définies d'éclairement et de température, correspondant à un courant égal à zéro ***(I = 0)***.

$$V_{oc} = \frac{mkT_c}{e} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) = V_t \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \qquad (\mathbf{III.2})$$

Avec la formule suivante : $V_t = \frac{mkT_c}{e}$ est appelé tension thermique et T_c est la valeur absolue de la cellule.

- **Point de Puissance maximale (**P_{max}**)** : il s'agit de la puissance maximale que le dispositif peut produire dans certaines conditions d'éclairage et de température, correspondant au couple maximal :

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \qquad (\mathbf{III.3})$$

- **Le rendement maximal** (η) : est le rapport entre P_{max} (Puissance maximale) et P_{in} (Puissance de la lumière incidente) :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max}V_{max}}{A\,G_a} \qquad (\mathbf{III.4})$$

En considérant que **Ga** est l'irradiation ambiante et que **A** est la surface de la cellule.

- **Facteur de forme (FF)** : C'est la valeur correspondant au quotient entre P_{max} et le produit $V_{oc} \times I_{sc}$. Il peut être exprimé en pourcentage ou en pourcentage de 1, étant 100% la valeur qui correspondrait à un profil hypothétique de courbe carrée, non réelle. Il nous donne

une idée de la qualité du dispositif photovoltaïque, plus le facteur de remplissage est élevé, mieux c'est.

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \qquad (\mathbf{III.5})$$

En général, les cellules du module photovoltaïque sont associées en série, afin d'obtenir des valeurs de tension plus appropriées pour la connexion à différentes charges ou à une batterie (la tension d'une cellule standard est généralement d'environ 0,6 V). La tension totale du module dépendra donc du nombre de cellules associées en série. D'autre part, le courant que nous pouvons obtenir du module photovoltaïque dépendra essentiellement du type et de la taille des cellules (en supposant qu'il n'y ait pas de cellules connectées en parallèle à l'intérieur du module). Une cellule classique en silicium cristallin de 100 cm² de surface offre généralement environ 3 A, bien que des cellules de taille beaucoup plus grande soient actuellement produites, pouvant donner jusqu'à 5 ou 7 A.

III.3.3 Facteurs affectant la caractéristique I-V du générateur :

La courbe caractéristique courant-tension du générateur PV est affecté par des facteurs environnementaux tels que l'intensité de l'éclairage, la température et la distribution spectrale de la lumière solaire, de la lumière du soleil.

- **Effet de l'intensité de l'éclairage (Irradiance) :**

En général, l'éclairement énergétique affecte principalement le courant, de sorte que le courant de court-circuit du générateur PV peut être considéré comme proportionnel à l'éclairement énergétique :

$$I_{sc}(E_2) = I_{sc}(E_1) \cdot \frac{E_2}{E_1} \qquad (\mathbf{III.6})$$

Où :

- Isc (E2) est le courant de court-circuit pour un niveau d'irradiation E2.
- Isc (E1) est le courant de court-circuit pour le niveau d'irradiation E1.

Cette équation est valable pour les variations d'irradiation à température constante, et elle est une approximation lorsque celle-ci varie, puisqu'elle suppose de ne pas tenir compte des effets que la température a sur le courant de court-circuit. Cependant, nous pouvons considérer qu'il s'agit d'une expression appropriée pour avoir une idée de ce que seraient les valeurs de l'Isc à différentes irradiances puisque l'erreur est inférieure à 0,5%. Des expressions plus précises pour la variation des paramètres fondamentaux de la caractéristique V-I en fonction de l'éclairement énergétique et de la température sont présentées dans le chapitre sur la modélisation des composants des systèmes PV autonomes.

La figure III.4 montre un exemple de l'influence de l'intensité de l'éclairage sur une courbe I-V mesurée en laboratoire de 100 W/m² à 1000 W/m² et à température constante.

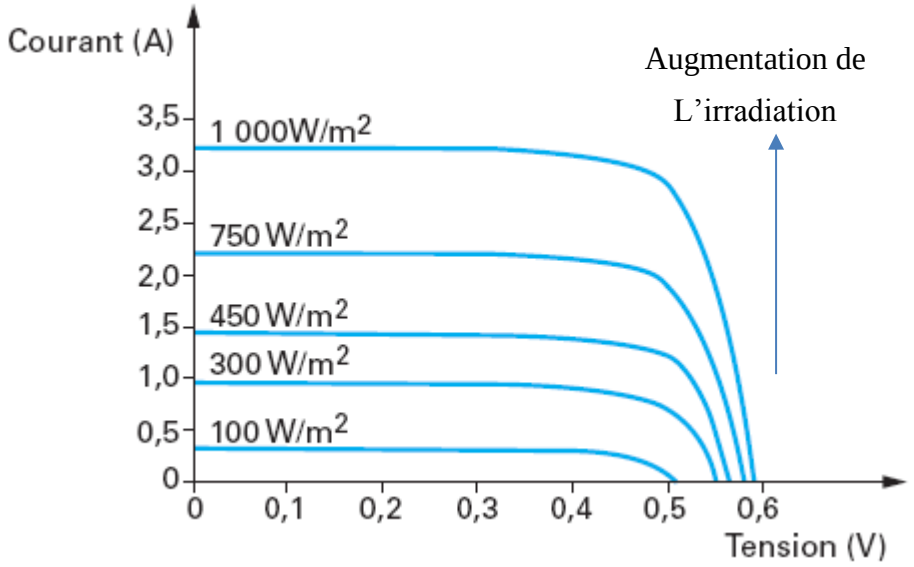


Figure III.4 Effet de l'irradiation sur la caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque

- **Effet de la température :**

La température affecte principalement les valeurs de tension de la caractéristique I-V, et a sa plus grande influence sur la tension en circuit ouvert, bien qu'elle modifie également les valeurs du point de puissance maximale et la valeur de Isc (cette dernière très légèrement). La figure 8 montre un exemple de la variation de la courbe caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque lorsque l'on fait varier la température tout en maintenant l'éclairement énergétique du générateur photovoltaïque, température tout en gardant l'irradiance constante.

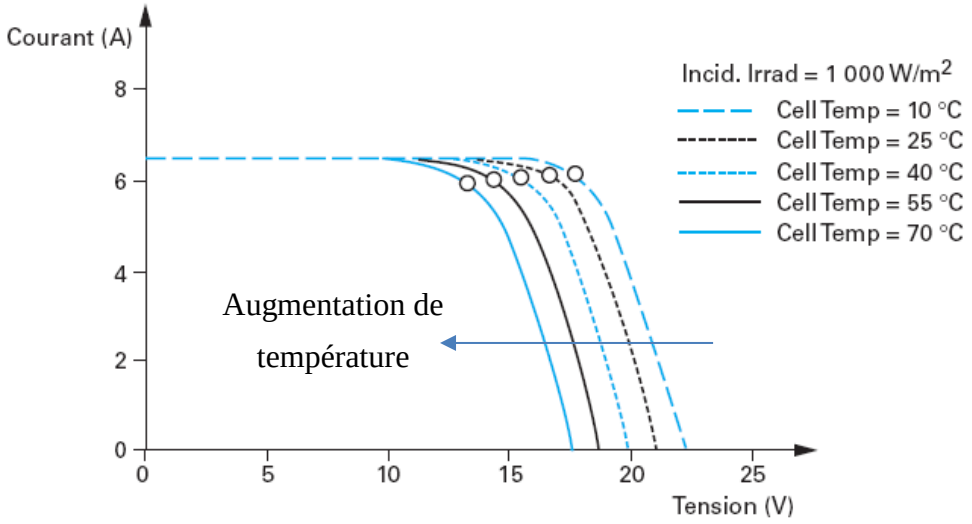


Figure III.5 Exemple de la variation de la caractéristique I-V du générateur PV en faisant varier la température tout en maintenant l'irradiance constante.

Il existe trois coefficients α, β et γ qui représentent la variation des paramètres fondamentaux de la caractéristique V-I du générateur PV avec la température. Ainsi, α exprime la variation du courant de court-circuit avec la température, β la variation de la tension en circuit ouvert et γ la variation de la puissance maximale. En général, les fabricants de modules PV Les fabricants de modules PV incluent généralement les valeurs de ces trois coefficients dans leurs fiches techniques des coefficients, dont les valeurs les plus courantes peuvent être :

$$\alpha = \frac{\partial I_{sc}}{\partial T} \approx +0.04\% \quad (\mathbf{III.7})$$

$$\beta = \frac{\partial V_{\infty}}{\partial T} \approx -0.37\% \quad (\mathbf{III.8})$$

$$\gamma = \frac{\partial P_{max}}{\partial T} \approx -0.44\% \quad (\mathbf{III.9})$$

Les valeurs présentées dans les équations (III.7), (III.8) et (III.9) sont des valeurs typiques pour les dispositifs en silicium monocristallin exprimées en pourcentage, cependant il est plus courant de trouver ces valeurs comme référence à celles d'une cellule constitutive du module photovoltaïque avec des valeurs typiques, pour le cas d'une cellule de ~100 cm² :

$$\alpha \approx 1.5\text{mA}/°\text{C}$$
$$\beta \approx -2.3\text{mV}/°\text{C}$$
$$\frac{1}{P_{max}}\gamma = -0.00441/°\text{C}$$

- **Effet du contenu spectral de la lumière**

Selon le moment de la mesure et la période de l'année, le spectre présente de faibles écarts par rapport au spectre considéré comme standard à la surface de la terre. Si le spectre est mesuré au moment de la prise de la caractéristique V-I, une petite correction peut être effectuée en multipliant le courant de court-circuit par le "facteur spectral", obtenu à partir de la comparaison du spectre standard et du spectre dans des conditions expérimentales. Cette correction est généralement très faible et est utilisée lorsqu'une grande précision est nécessaire pour les étalonnages de cellules ou de modules photovoltaïques.

III.3.3 Technique de contrôle MPPT :

On a déjà vu que le générateur photovoltaïque présente certaines caractéristiques non linéaires qui sont représentées par la courbe I-V, comme le rayonnement solaire, la température et la charge électrique, conditions dans lesquelles le générateur fournira une certaine puissance.

Idéalement, pendant tout le temps où le générateur fournit son point de puissance maximale, l'onduleur devrait fonctionner de manière optimale. Cependant, il existe une seule charge, pour toute condition d'irradiation et de température donnée, à laquelle le générateur fournit une puissance maximale.

Cette charge ne peut pas être choisie arbitrairement, mais elle est variable, de sorte que l'on obtiendra des valeurs de tension et de courant différentes pour chaque cas. Dans ces conditions, l'onduleur est chargé d'ajuster ces variations de charge en suivant le point de puissance maximale (SPMP) ou Maximum Power Point Tracking (MPPT). En d'autres termes, lorsque ces conditions varient, le système balaie les différentes possibilités jusqu'à ce qu'il trouve la meilleure solution possible, celle qui lui permet de fonctionner au MPPT.

Pour ce faire, l'onduleur doit contrôler la tension de fonctionnement du générateur PV à l'aide d'algorithmes tels que la perturbation et l'observation, la conductance incrémentale, la capacité, la tension constante, la tension corrigée en fonction de la température, la logique floue, etc. Dans le cas des onduleurs connectés au réseau, les algorithmes les plus courants sont la perturbation, l'observation et la conductance incrémentale.

III.3.3.1 Algorithme de perturbation et d'observation (P&O) :

L'algorithme de suivi de la puissance P&O consiste à faire varier la tension du panneau tout en surveillant la puissance résultante. Si la puissance mesurée dans l'échantillon actuel est supérieure à la puissance mesurée dans l'échantillon précédent, une variation de tension (augmentation-diminution) est effectuée ; si la puissance mesurée est inférieure à celle de l'échantillon précédent, la variation de tension est inverse (diminution-augmentation).

Les échantillons de la tension du panneau photovoltaïque permettent de placer un point appelé point de fonctionnement. Une fois le MPP atteint, l'algorithme fera osciller le point de fonctionnement autour de celui-ci.

La figure III.6 montre l'organigramme avec les différentes conditions qui peuvent se produire pendant le calcul de l'algorithme, qui peuvent se produire pendant le calcul de l'algorithme P&O.

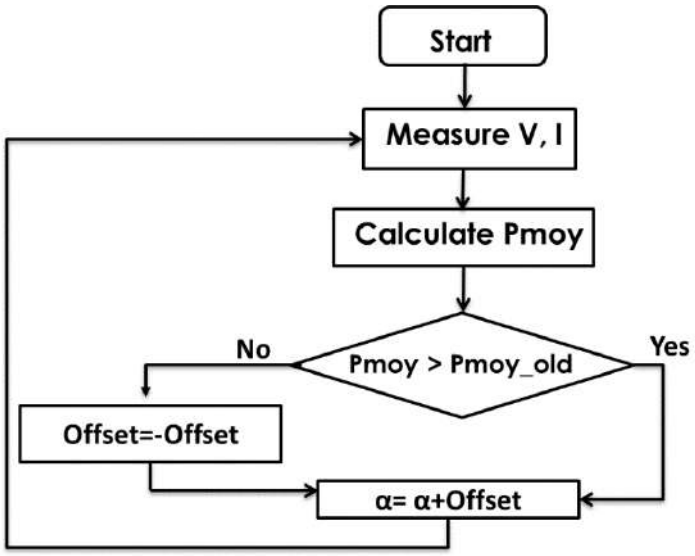


Figure III.6 Algorithme type de la méthode P&O

III.3.3.2 Algorithme de conductance incrémentale (Cond Inc) :

Une fois que le MPP est atteint, le tracker continue à fonctionner à ce point jusqu'à ce qu'il y ait un changement dans la valeur du courant. Ce changement dépend de la variation de l'irradiation sur le générateur PV [24].

Dès que l'irradiation augmente, donc la valeur du courant, le MPP se déplace vers la droite par rapport à la tension de fonctionnement du générateur. Pour compenser cet effet, le tracker MPPT doit augmenter la tension. En cas de diminution du rayonnement, le système fonctionnera en sens inverse.

L'avantage de cet algorithme par rapport à l'algorithme P&O est qu'il peut calculer à tout moment la direction dans laquelle le point de fonctionnement du générateur PV doit être modifié pour le rapprocher du MPP. Cela permet de s'assurer que, en cas de changements atmosphériques rapides, il ne prend pas une mauvaise direction. Pour ce faire, on utilise une expression dérivée de la condition selon laquelle, au MPP, dP/dV = 0 (Figure III.7).

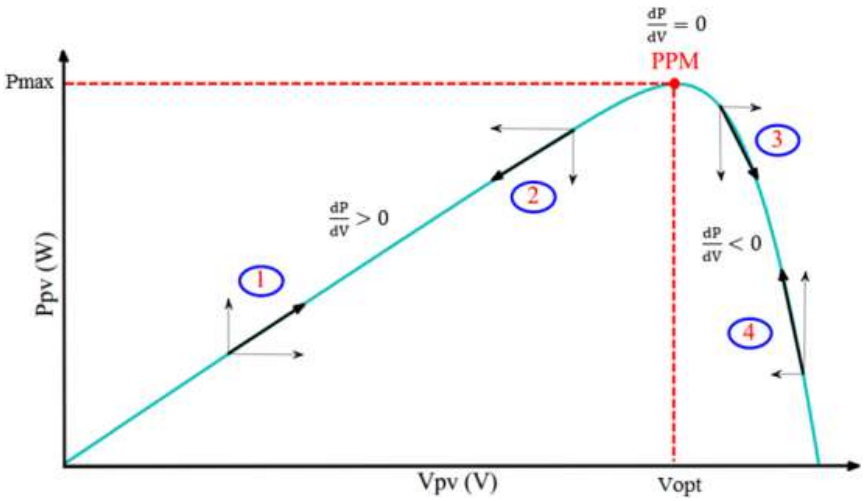


Figure III.7 Signe de dP/dV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance

III.3.3.3 Rendement du MPPT

Un autre paramètre qui présente un intérêt particulier est la performance du tracker du point de puissance maximale, car il décrit la précision de l'onduleur à travailler au point de puissance maximale, selon les courbes caractéristiques du générateur.

L'efficacité énergétique MPPT (η_{MPPT}) est définie comme le quotient entre la valeur instantanée de la puissance fournie, dans une période de temps définie, et la valeur instantanée de la puissance fournie dans la période de temps définie, et la valeur instantanée de la puissance fournie dans la période de temps définie, valeur instantanée de la puissance délivrée au MPP.

$$\boldsymbol{\eta_{MPPT} = \frac{P_{DC}}{P_{MPP}}} \qquad (\mathbf{III.10})$$

P_{DC} : C'est la puissance mesurée et adoptée par l'onduleur.

P_{MPP} : C'est la puissance fixée au point de puissance maximale (MPP).

Toutefois, il convient de noter que les performances du MPPT peuvent être divisées en deux parties distinctes deux : les performances statiques et dynamiques.

III.4 Le module solaire photovoltaïque :

Une cellule solaire fournit très peu d'énergie. En outre, une cellule unique est fragile et très difficile à commercialiser ; le fabricant, en les regroupant pour qu'elles fonctionnent comme une seule, cherche à fournir des niveaux et une puissance adaptée à chaque application, et les protège des conditions climatiques défavorables. C'est ce qu'on appelle un module photovoltaïque, dans lequel est associé électriquement un certain nombre de cellules solaires.

III.4.1 Association en série :

Dans une connexion en série, la borne positive d'un dispositif photovoltaïque est connectée à la borne négative de l'autre dispositif, et ainsi de suite. Pour des appareils identiques soumis à la même irradiation, lorsque la connexion est en série, les tensions s'additionnent et le courant électrique n'est pas affecté, sont additionnés et le courant électrique n'est pas affecté.

$$V = V_1 + V_2 + \cdots + V_n \quad (\mathbf{III.11})$$

$$I = I_1 = I_2 = \cdots = I_n \quad (\mathbf{III.12})$$

Ce résultat est illustré à la figure III.8 (c), au moyen des caractéristiques I - V. Si les dispositifs sont identiques et se trouvent dans les mêmes conditions d'irradiation et de température, les courants électriques individuels sont donc égaux. Par conséquent, la connexion en série des cellules solaires permettra d'augmenter la tension finale dans le module photovoltaïque.

III.4.2 Association en parallèle :

Dans une association parallèle, les bornes positives des dispositifs sont interconnectées entre elles, ainsi que les bornes négatives. La figure III.8 (c) illustre le résultat de la somme des courants électriques dans les cellules idéales connectées en parallèle. Les courants électriques sont additionnés, la tension restante inchangée. En conclusion, une connexion en parallèle augmentera le courant total de l'ensemble.

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n \quad (\mathbf{III.13})$$

$$V = V_1 = V_2 = \cdots = V_n \quad (\mathbf{III.14})$$

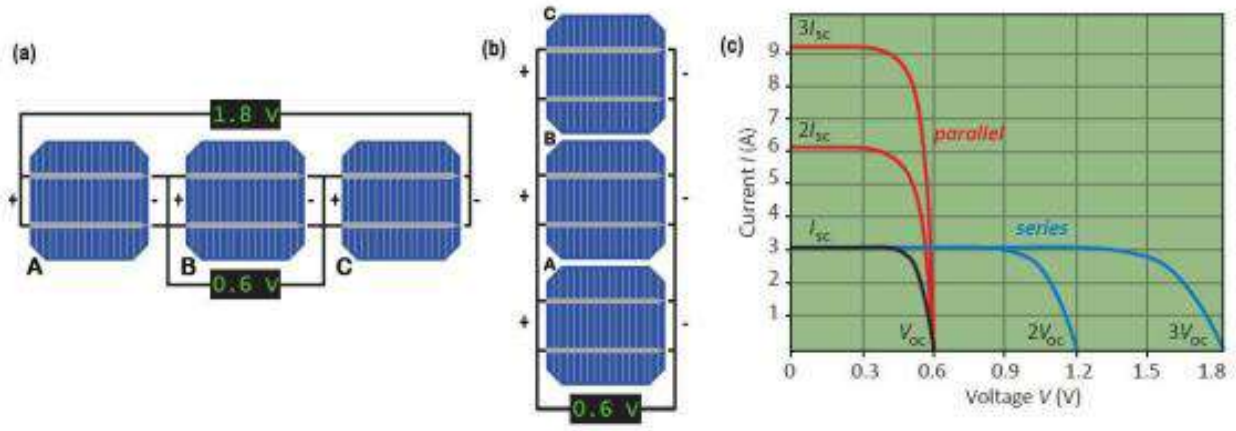


Figure III.8 (A) trois cellules solaires connectées en série, (B) connexion de trois cellules solaires en parallèle, (C) courbe I - V de la cellule solaire connectée en série et en parallèle.

III.5 Protection dans les générateurs photovoltaïques :

III.5.1 Diodes de passage (diodes parallèles) :

Comme mentionné ci-dessus, pour éviter les problèmes qui peuvent être causés par un éclairage non uniforme, la présence d'ombres ou d'autres facteurs qui peuvent faire qu'une partie du générateur photovoltaïque fonctionne dans des conditions différentes du reste, on utilise des protections. Les diodes passantes sont placées en parallèle dans les associations de cellules PV en série, pour éviter que tous les éléments de la série ne se déchargent sur une cellule ombragée.

La figure III.9 montre schématiquement le mode de fonctionnement d'une diode de passage. Ici, des diodes sont placées sur quatre branches de cellules connectées en série. La diode est connectée avec une polarité opposée à celle des cellules, de sorte que si les cellules fonctionnent correctement, aucun courant ne traverse la diode. Si l'une des bandes en série est fortement ombragée de manière à ce que sa polarité soit inversée, la polarité de la diode changera, ce qui peut conduire à un chemin facile pour le passage du courant généré par le reste des groupes de cellules. De plus, si une cellule est ombragée, seules les autres cellules de la même branche seront déchargées sur elle. Ainsi, en fonction du nombre de cellules par diode, on peut limiter la quantité de puissance à dissiper par une cellule, et donc sa température.

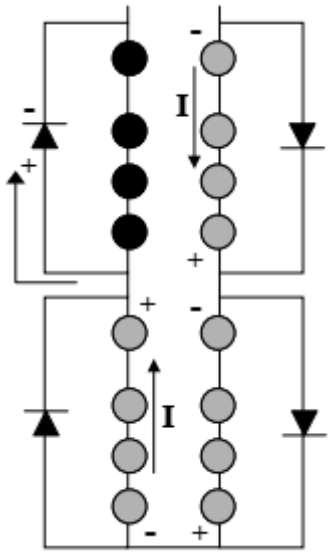


Figure III.9 Diagramme de la mode de fonctionnement d'une diode à gradins. d'une diode de passage.

La plupart des fabricants de modules incorporent des diodes de dérivation dans les prises intermédiaires de leurs boîtes de jonction de modules.

III.5.2 Diodes de blocage (diode séries) :

Tout système photovoltaïque hors réseau doit disposer d'un système de contrôle des flux de courant afin d'éviter les courants inverses entre la batterie et le réseau de panneaux et/ou de protéger les chaînes faibles ou endommagées. Des diodes de blocage sont utilisées pour remplir cette fonction. Les deux principales fonctions des diodes de blocage sont :

- Empêcher la batterie de se décharger sur le module la nuit.
- Bloquer les flux de courant inverse des branches parallèles ombragées et altérées pendant la journée.

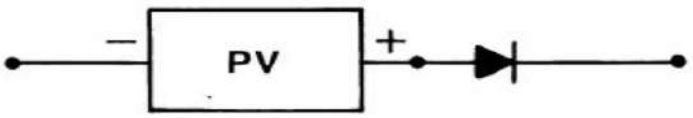


Figure III.10 diodes de blocage ou diode séries

III.6 Résultats de simulation :

- **Pour le modèle Simulink de Commande vectorielle des onduleurs Z-Source alimenté par un générateur PV voire Annexe. B (**Figure 9 – page x).

Dans cette section, nous allons présenter les différents résultats obtenus en régimes normal et perturbé. La fréquence de modulation de la MLI choisie est de 2 kHz, la tension de référence du bus continu est de 100 V et les paramètres du système simulé.

Paramètres du système simulé :

L1=L2=10e-3 (H), C_1=C_2=1.3e-3 (F), V_{DC}= 100v, F=50hz, R= 50(ohm).

Les figures présentées ci-dessous montrent les allures des différentes grandeurs liées à la commande MLI vectorielle appliquée au redresseur triphasé à trois niveaux (l'angle θ, les secteurs N, les régions n, les séquences des temps de commutation M). Ces allures montrent l'efficacité et le fonctionnement correct en boucle fermée de la commande MLI vectorielle pour générer les signaux de commande des gâchettes des 12 interrupteurs du redresseur triphasé à niveaux.



Figure III.11 Commutateur S1 et S2et S3 et S 4et S5 et S6 .

La Figure III.11 montre la forme d'onde du signal de commande MLI vectorielle.

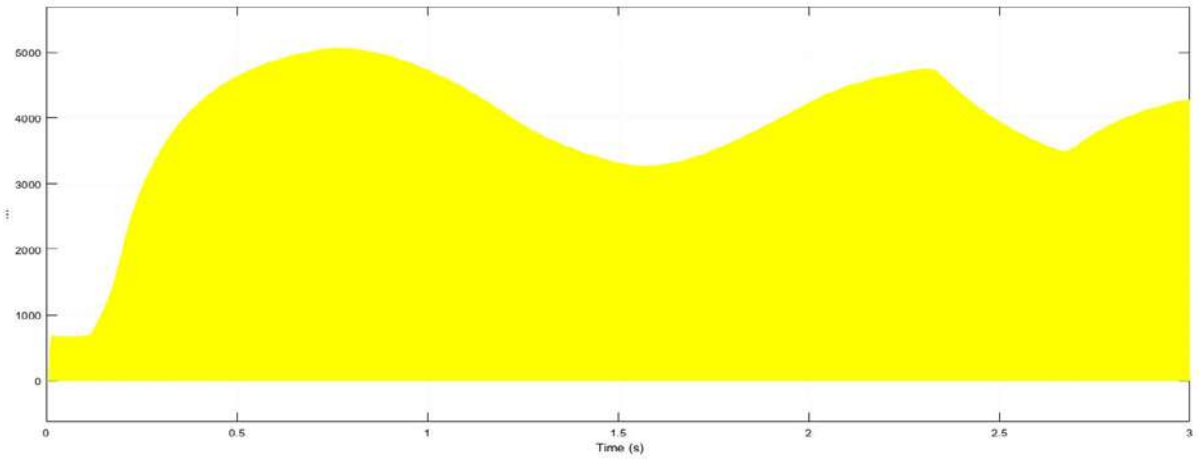


Figure III.12 la tension de sortie de z-source.

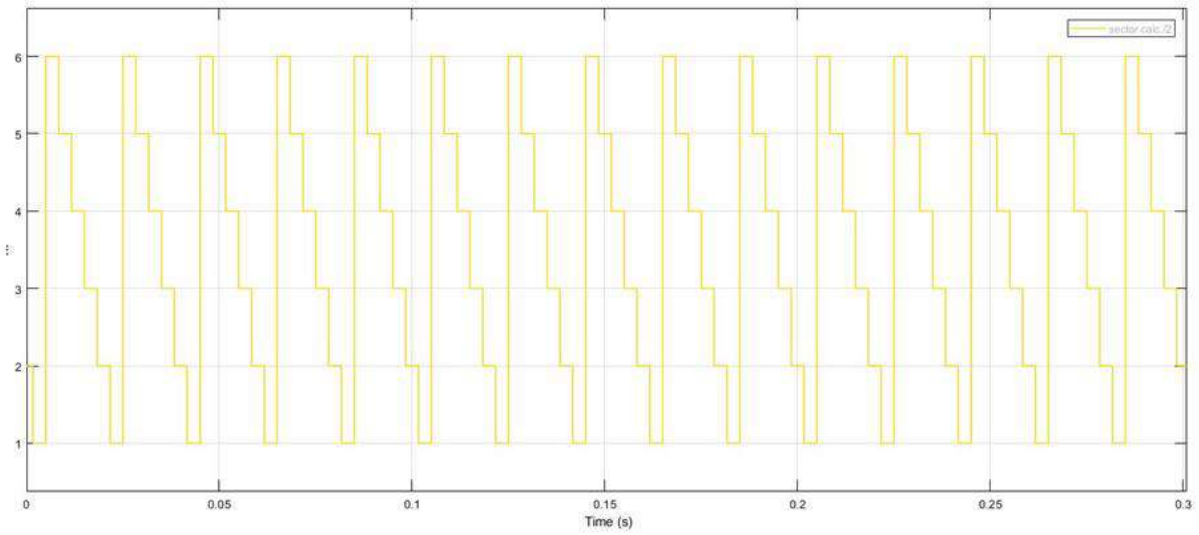


Figure III.13 Allure des Secteurs.

La Figure III.13 montre la forme d'onde du segment Il y a 6 secteurs. Onde de modulation MLI vectorielle.

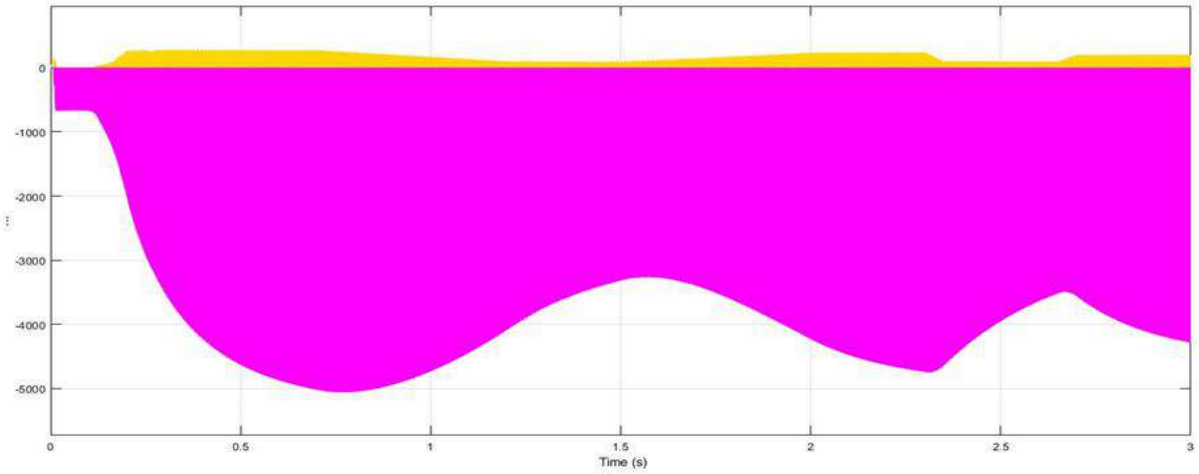


Figure III.14 courant.

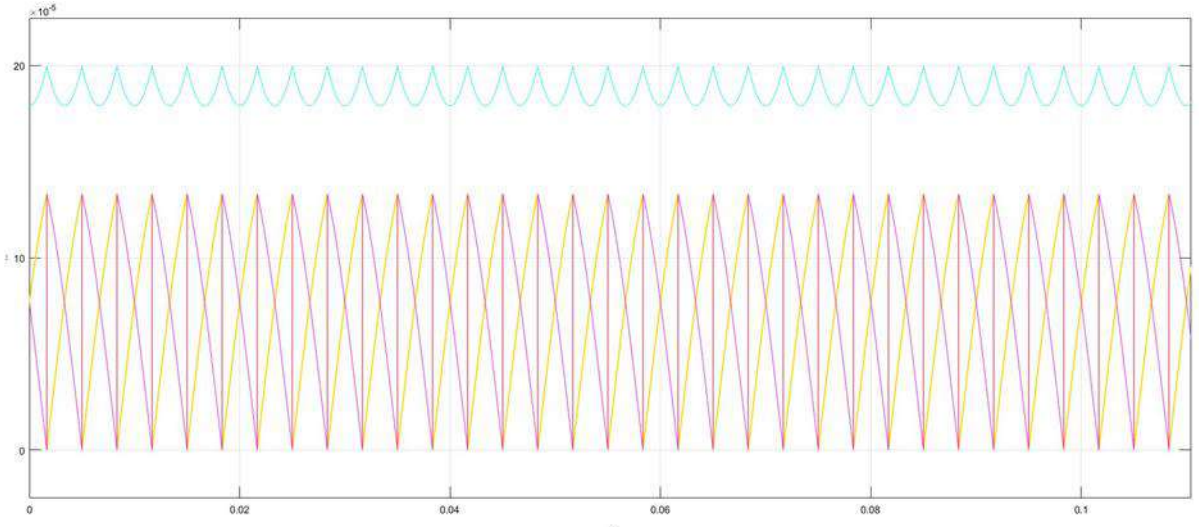


Figure III.15 Les périodes de t0, t1, t2.

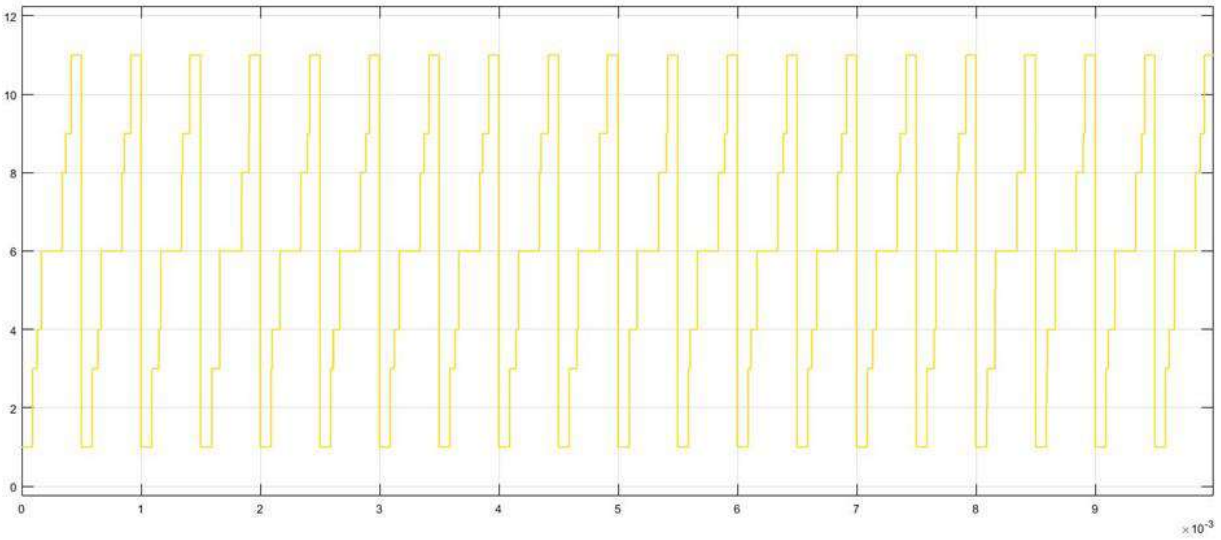


Figure III.16 : Allure des séquences des temps commutation.

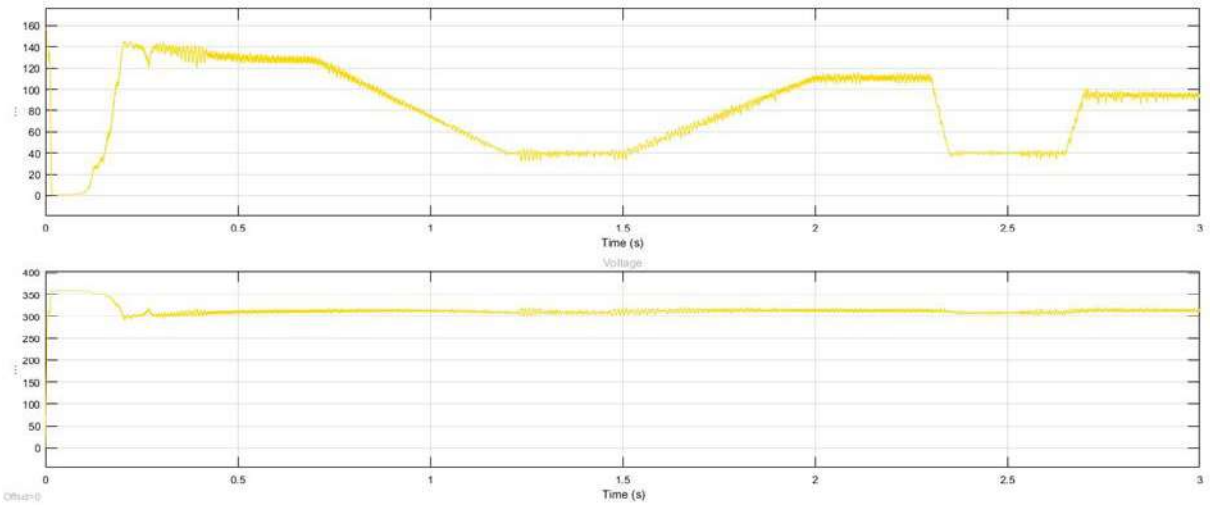


Figure III.17 courant (I) et tension (V) .

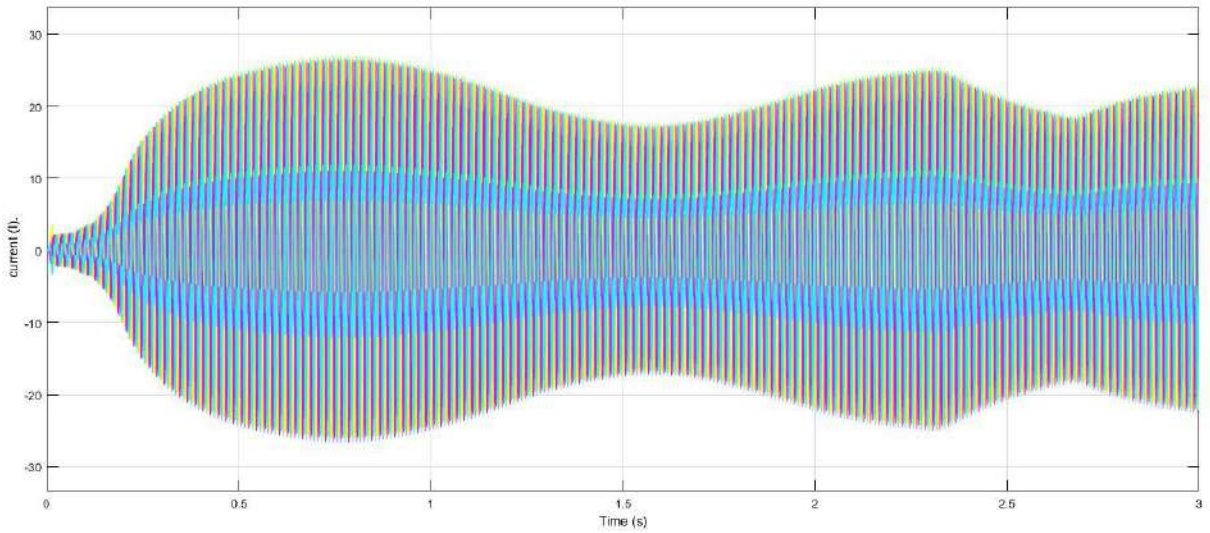


Figure III.18 La forme d'onde de courant triphasé de l'onduler triphasé à traves la charge.

La Figure III.18 montre de bons résultats pour un LITAR contrôle dans une forme d'onde sinusoïdal de haute qualité.

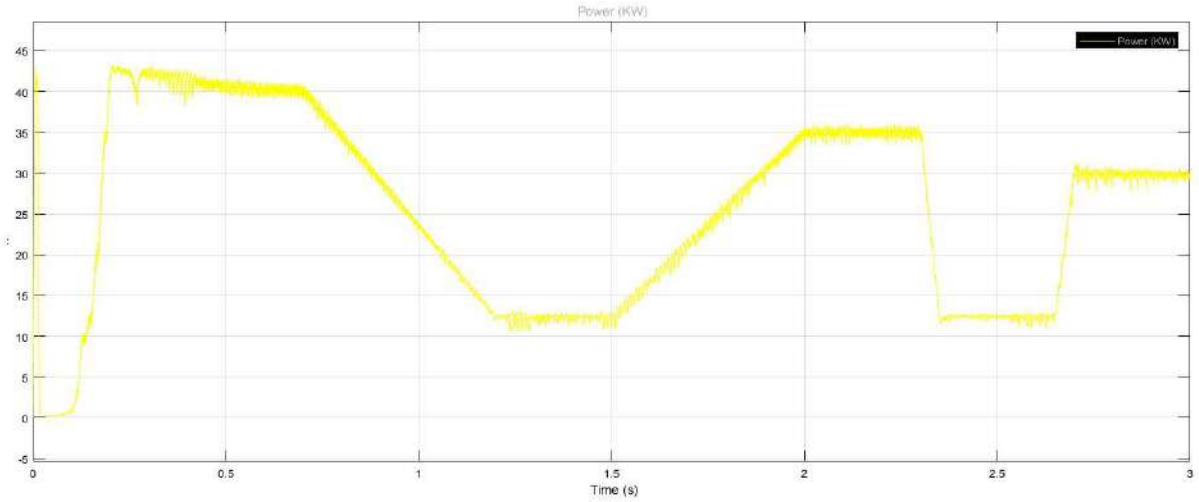


Figure III.19 la puissance (p).

La figure 19 montre puissance et elle est égale au courant multiplié la tension

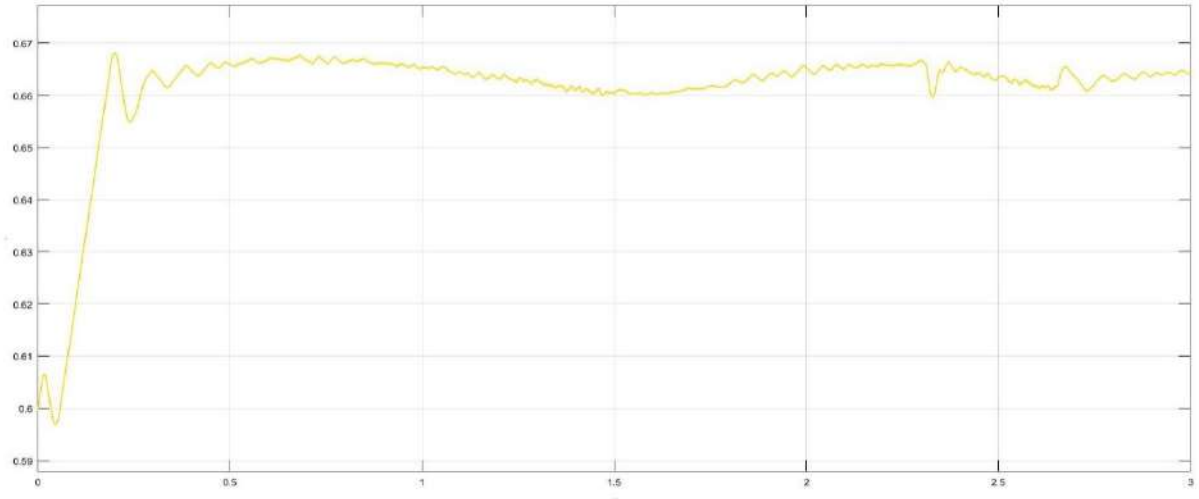


Figure III.20 Résultats de simulation des formes d'onde de sortie du contrôle MPPT proposé.

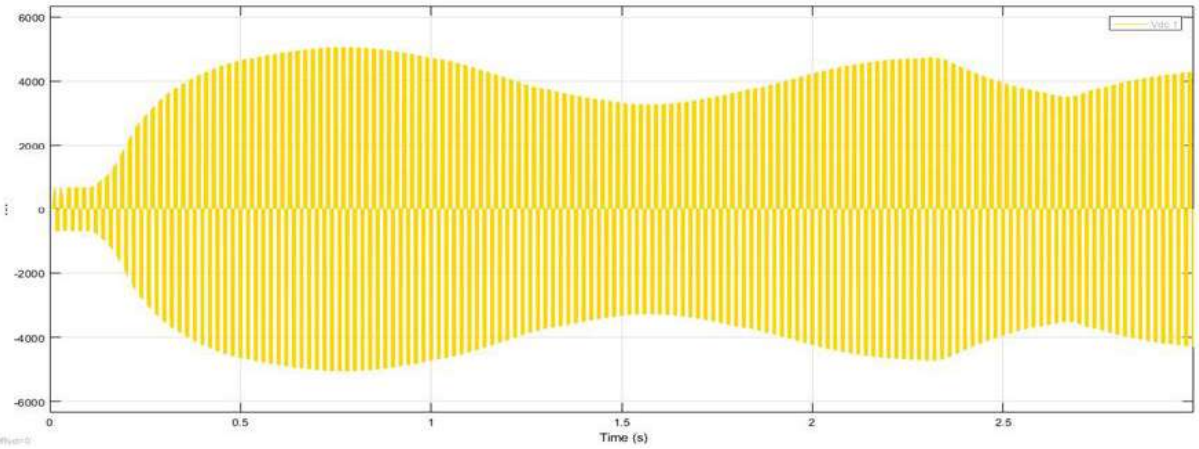


Figure III.21 la tension V ab _V sc

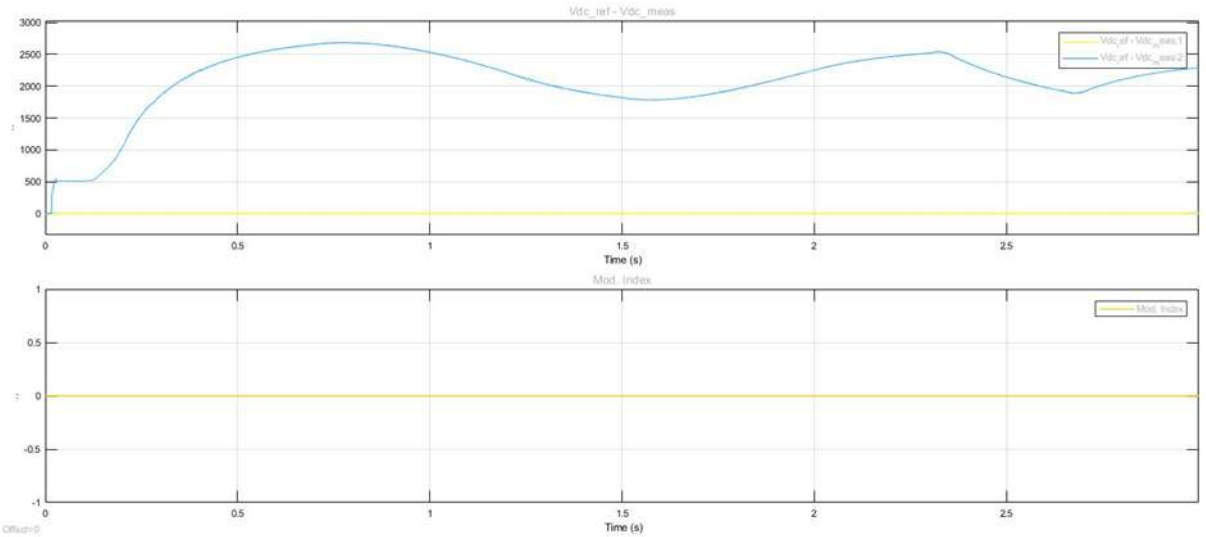


Figure III.22 courant (I) et tension (V)

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que la poursuite du point de puissance maximale basée sur l'algorithme de commande directe de la sortie est performante soit du côté poursuite du point de puissance maximale du système photovoltaïque soit du côté de régler la tension désirée du sortie ;car le régulateur gère le système suivant les fonctions décrites précédemment.la tension de sortie se stabilise à la tension de référence voulue après un régime transitoire causé par l'accumulation d'énergie dans la bobine.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le générateur photovoltaïque (GPV), en nous concentrant sur modélisation d'un ce générateur, puis nous avons étudié l'intégration d'un des nouveaux convertisseurs d'électronique de puissance dans la production solaire photovoltaïque qui est l'onduleur Z-source.

La méthode MPPT P&O est mise en œuvre avec MATLAB-SIMULINK pour la simulation. La méthode MPPT simulée dans ce chapitre est capable d'améliorer simultanément les performances dynamiques et statiques du système PV. Par la simulation, il est observé que le système complète le suivi du point de puissance maximale avec succès malgré les fluctuations.

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce projet s'inscrit dans le cadre du développement de l'électronique de puissance en général et des convertisseurs en particulier, afin d'améliorer les systèmes de production d'énergie électrique à partir de sources renouvelables (soleil). L'objectif de ce projet est d'étudier les onduleurs Z-source et leurs différentes stratégies de contrôle, ainsi que l'intégration de ces onduleurs dans un system photovoltaïque.

Nous avons commencé par présenter l'analyse théorique et la conception de l'onduleur Z-source et a donné un aperçu général du cet onduleur récemment introduit, quelques topologies sont données pour montrer le degré d'avancement de ce type de convertisseur. Cette recherche découvre également les différences entre l'onduleur Z-source et les onduleurs traditionnels, en substance, en soulignant la supériorité de l'onduleur Z-source. L'utilisation du réseau Z-source permet de remplacer le convertisseur DC-DC, ce qui réduit le nombre d'étages de commutation, ainsi que le nombre de commutateurs. Cela signifie un meilleur rendement, un volume optimisé et des coûts de construction réduits, coûts de construction.

Dans le deuxième chapitre, on a étudié les méthodes de contrôle avec l'insertion d'états shoot-through de l'onduleur Z-source ont été étudiées. Le schéma proposé sous les commandes MLI sinusoïdale et MLI vectorielle est simulé avec l'aide de MATLAB/SIMULINK et les résultats de simulation sont obtenus pour la valeur constante de l'indice de modulation. Les résultats de la simulation montrent que la tension et le courant de charge sinusoïdaux peuvent être obtenus par le ZSI en utilisant un filtre avec une magnitude et une fréquence plus élevée par rapport à l'onduleur traditionnel.

Au dernier chapitre, nous avons modélisé un générateur photovoltaïque et présenté ses principales caractéristiques (I-V), puis nous introduisons la commande MPPT (algorithme P&O). A travers ces dernières, nous avons observé que le générateur photovoltaïque a une puissance maximale, et qu'il est trop sensible aux changements d'irradiation et de température.

Notre travail non exhaustif offre quelques perspectives qui sont :

- Intégration de l'onduleur z-source dans un système photovoltaïque.
- Commander le convertisseur Z-source avec différentes stratégies de commandes.
- Appliquer les différentes méthodes de contrôle de z-source.
- Améliorer le rendement de convertisseur z-source par la technique MPPT dans les systèmes photovoltaïques.

BIBLIOGRAPHIE

[1] F.Z. Peng, Z-source inverter. IEEE Trans. Ind. Applicat. 39(2), 504–510 (2003).

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

[3] Suresh, L., GRS Naga Kumar, and M. V. Sudarsan. "Modeling andsimulation of Z-source inverter." From the Selecte Works of suresh L (2012).

[4] Kouhanjani, Masoud Jokar, and Ali Reza Seifi. "Comparison of VSC and Z-source converter: power system application approach." Advances in Electrical and Electronic Engineering 15.1 (2017) : 12-20.

[5] Zope, Pankaj Hiraman. "Modeling and simulation of z source inverter design and control strategies." Thesis submitted for the degree of doctor of philosophy in electronics and telecommunication engineering, Faculty of engineering and technology Jodhpur National University, Jodhpur June (2012).

[6] Riache Younes. "Commande d'un onduleur Z-Source par la stratégie SVM modifiée à quatre court-circuits pour une application PV connectée au réseau." Master thesis in Electrical Engineering. National Polytechnic School (ENP), El Harrach, Algiers, Algeria, 2017.

[7] Mohamed Lamine MESSAOUD. "Commande d'un onduleur Z-Source à stratégie SVM modifiée à six courts-circuits pour une application PV connecté au réseau." Master thesis in Electrical Engineering. National Polytechnic School (ENP), El Harrach, Algiers, Algeria, 2017.

[8] Loh, Poh Chiang, et al. "Pulse-width modulation of Z-source inverters." Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Vol. 1. IEEE, 2004.

[9] BENZINEB, Fairouz. "ETUDE ET COMMANDE D"UN ONDULEUR Z-SOURCE : Application aux systèmes photovoltaïques." (2016).

[10] Huang, Zhe. "SVPWM Switching Pattern for Z-source Inverter, Simulation and Application." (2014).

[11] Supatti, Uthane. Low cost z-source converter/inverter system for wind power generation. Michigan State University. Electrical Engineering, 2011.

[12] Shen, Miaosen, and Fang Z. Peng. "Operation modes and characteristics of the Z-source inverter with small inductance." Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005. Vol. 2. IEEE, 2005.

[13] Rajesh, Kammari. "Design and Analysis for Various Controlling Methods of a Z-Source Inverter." International Journal of ElectricalEngineering. ISSN 0974-2158 Volume 10, Number 2 (2017), pp. 271-288. M.Tech, G.Pulla Reddy Engineering College, Kurnool, India.

[14] Shen, Miaosen, et al. "Maximum constant boost control of the Z-source inverter." Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Vol. 1. IEEE, 2004.

[15] Rostami, H., and D. A. Khaburi. "Voltage gain comparison of different control methods of the Z-source inverter." 2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009. IEEE, 2009.

[16] Peng, Fang Zheng, Miaosen Shen, and Zhaoming Qian. "Maximum boost control of the Z-source inverter." IEEE Transactions on power electronics 20.4 (2005): 833-838.

[17] Ali, U. Shajith, and V. Kamaraj. "Z-Source inverter with a new space vector PWM algorithm for high voltage gain." ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 6.6 (2011): 9-13.

[18] Kumar, K. Vinoth, et al. "Simulation and comparison of SPWM and SVPWM control for three phase inverters." ARPN journal of engineering and applied sciences 5.7 (2010): 61-74.

[19] Tran, Quang-Vinh, et al. "Algorithms for controlling both the DC boost and AC output voltage of Z-source inverter." IEEE Transactions on Industrial Electronics 54.5 (2007): 2745-2750.

[20] Tran, Quang-Vinh, et al. "Minimization of voltage stress across switching devices in the Z-source inverter by capacitor voltage control." Journal of Power Electronics 9.3 (2009): 335-342.

[21] E. Lorenzo. Electricidad Solar. Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos. Instituto de Energía Solar. Artes Gráficas Gala S.L. 1994.

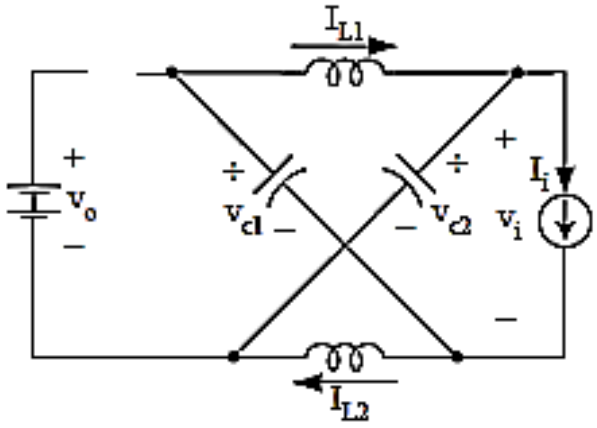
[22] A. Hoque, K. A. Wahid, "New Mathematical Model of a Photovoltaic Generator", Journal of Electrical Engineering, vol. EE 28, No. 1, June 2000.

[23] A. D. Hansen. P. Sørensen, L. H. Hansen, H. Bindner, "Models for Stand-Alone PV System", Risø-R-1219(EN)/SEC-R-12, 2000.

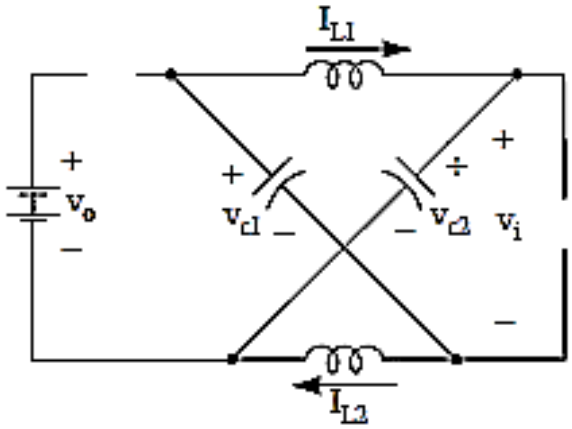
[24] A. Goetzberger V.U. Hoffmann (2005): "Photovoltaic Solar Energy Generation". Freiburg, Germany – Springer.

Annexe. A :

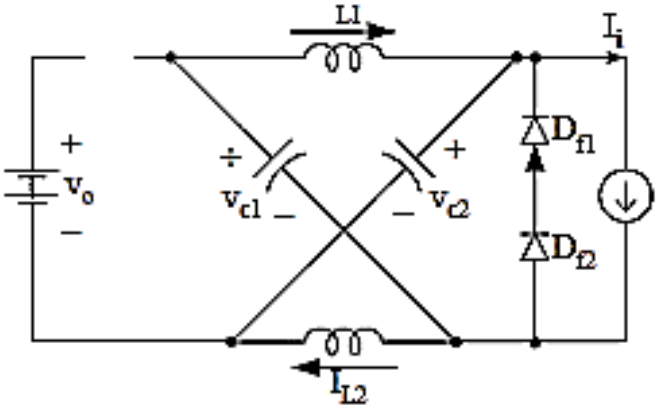
Un nouveau mode de fonctionnement de ZSI :



Mode 3



Mode 4



Mode 5

Figure 1 nouveau mode de fonctionnement de ZSI.

Annexe. B :

1. Modèle Simulink du Maximum Boost Control (MBC)

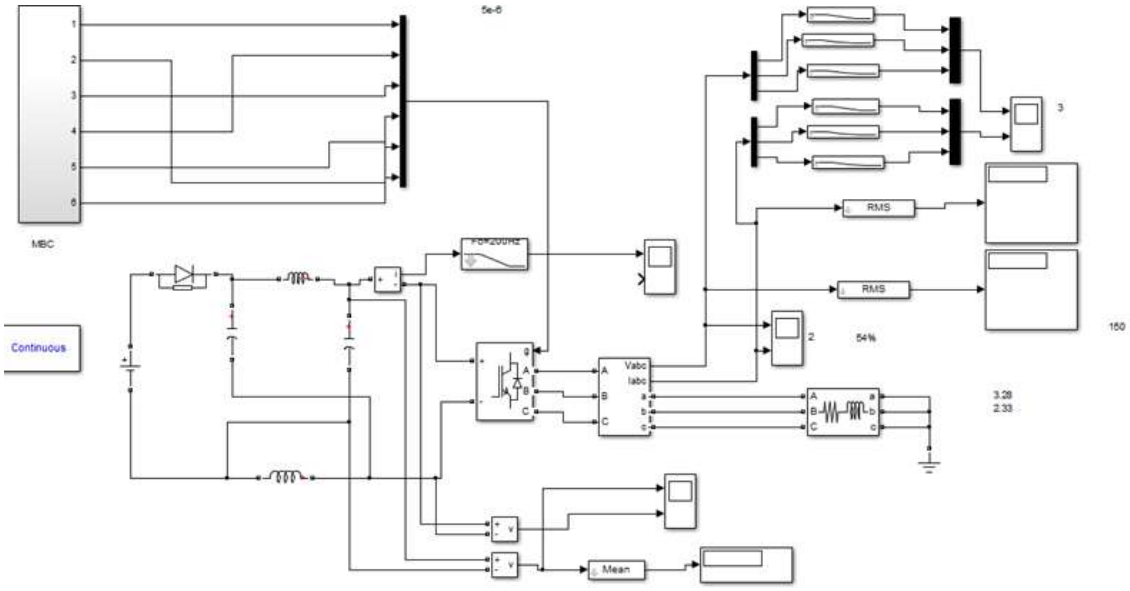


Figure 2 Schema bloc Maximum Boost Control MBC **(Z-SOURCE)**

1. **Sous-système circuit MBC** :

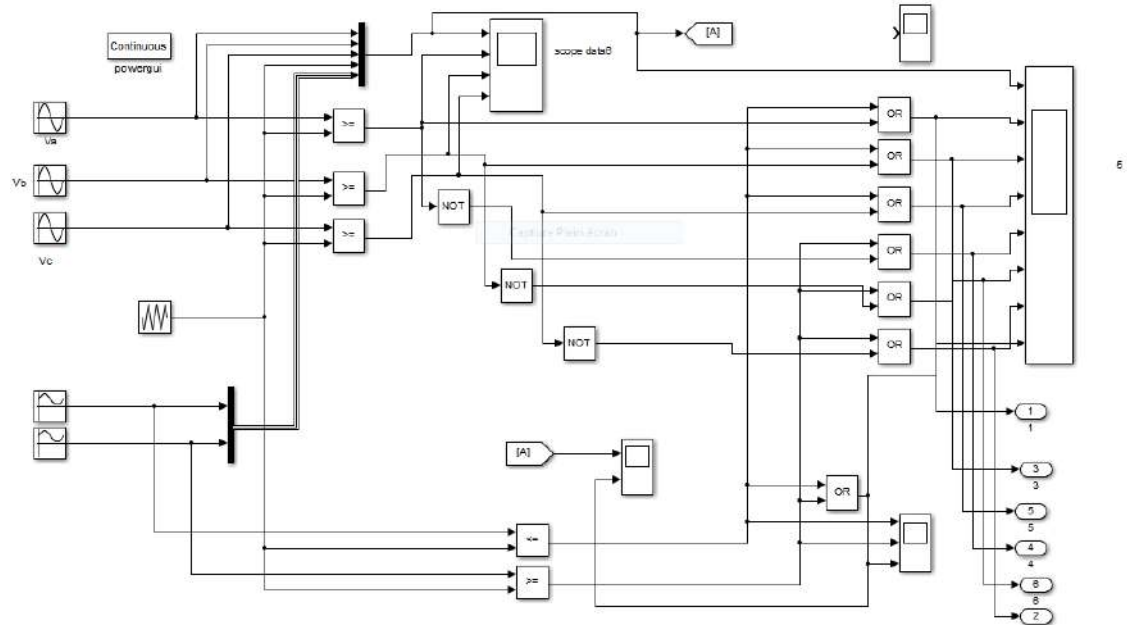


Figure 3 Maximum Boost Control (MB**C).**

2. Simulation Maximum Constant Boost Control *(MCBC)*:

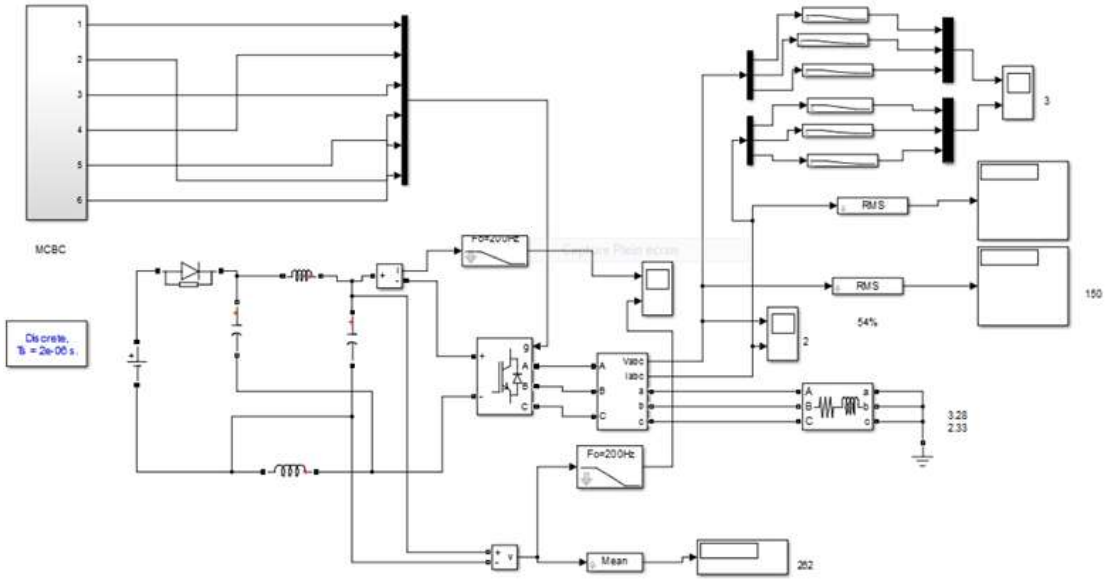


Figure 4 Schema bloc Maximum Constant Boost Control MCBC (Z-Source).

2. Sous-système circuit MCBC :

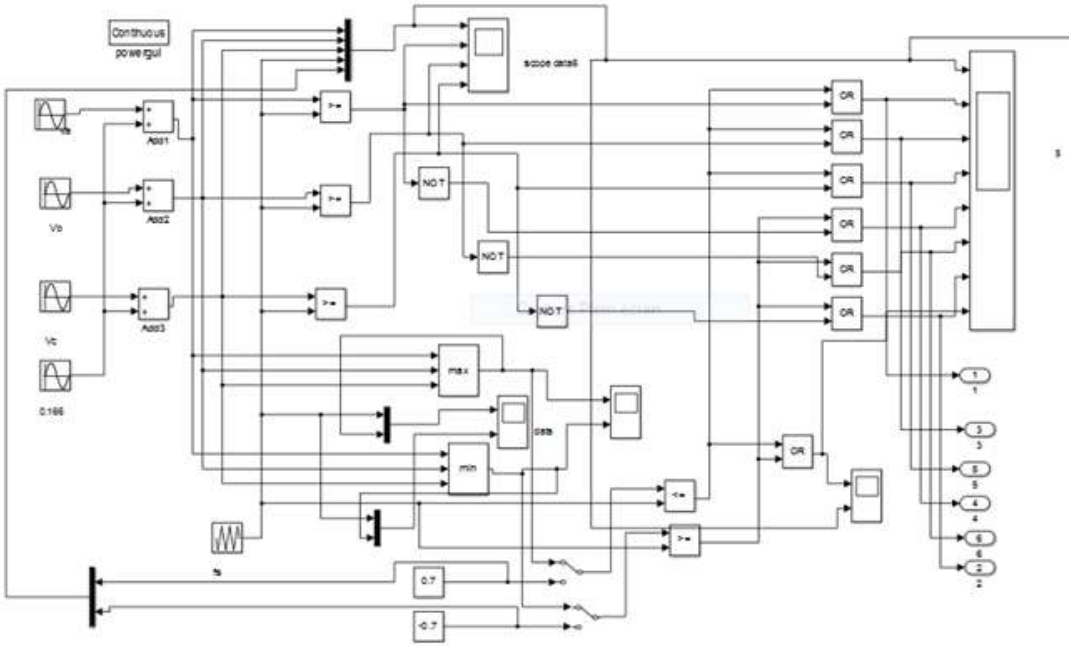


Figure 5 Schema bloc Maximum Constant Boost Control MCBC

3. Simulation Simple Boost Control *(SBC)*:

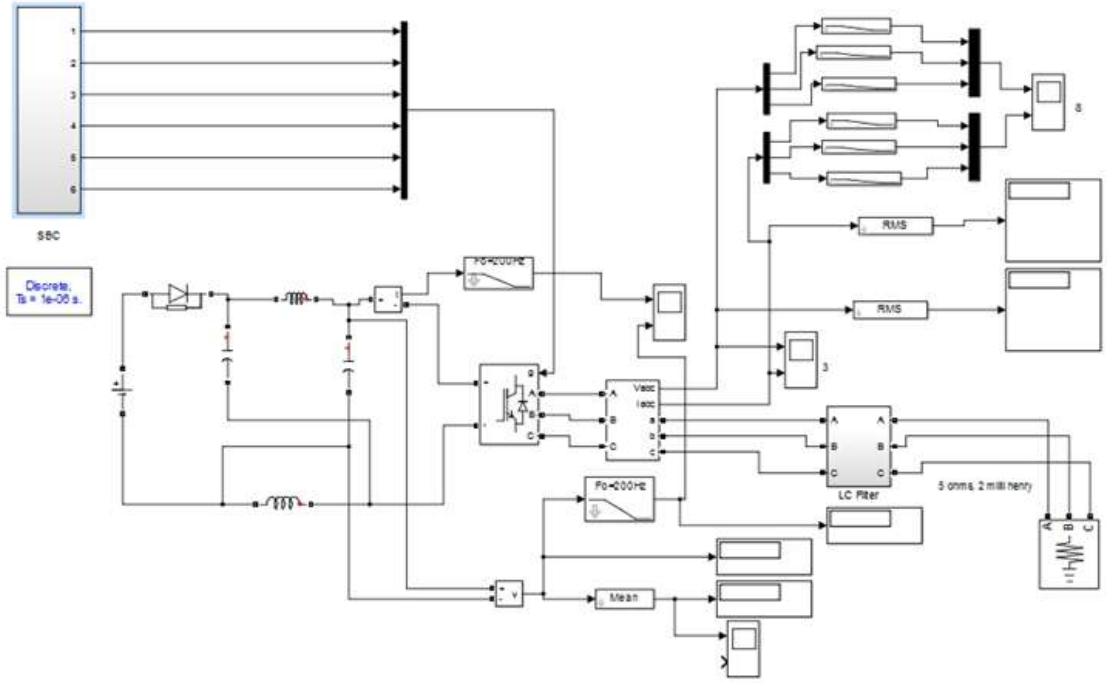


Figure 6 Schema bloc Simple Boost Control SBC (Z-Source)

3. Sous-système circuit SBC :

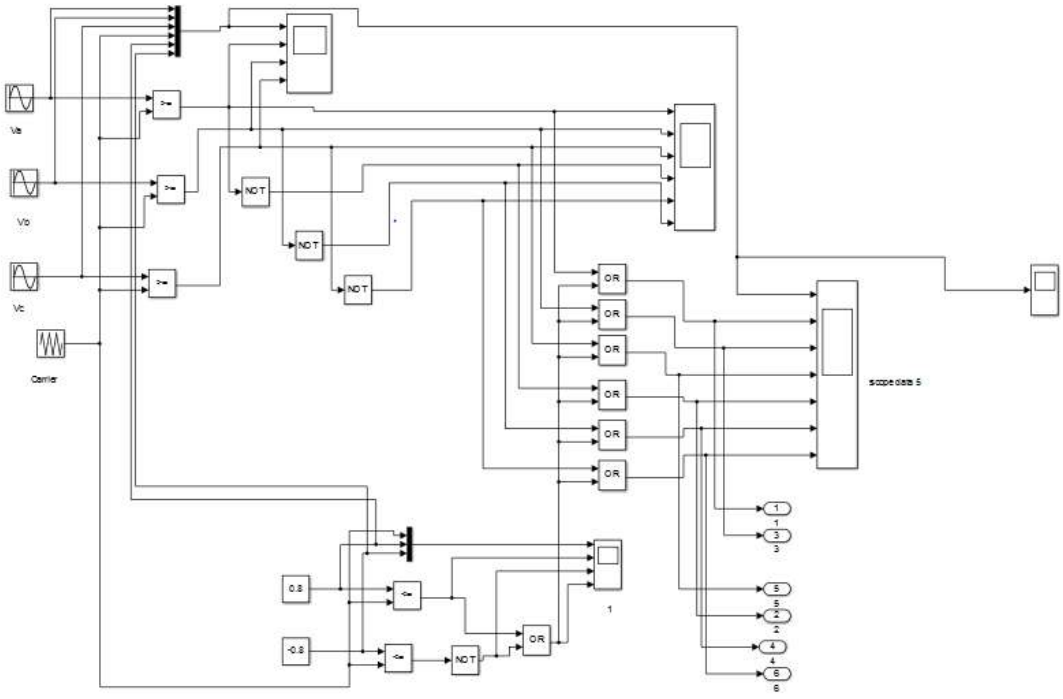


Figure 7 Schema bloc Simple Boost Control SBC

4. Simulation Commande vectorielle des onduleurs Z-Source :

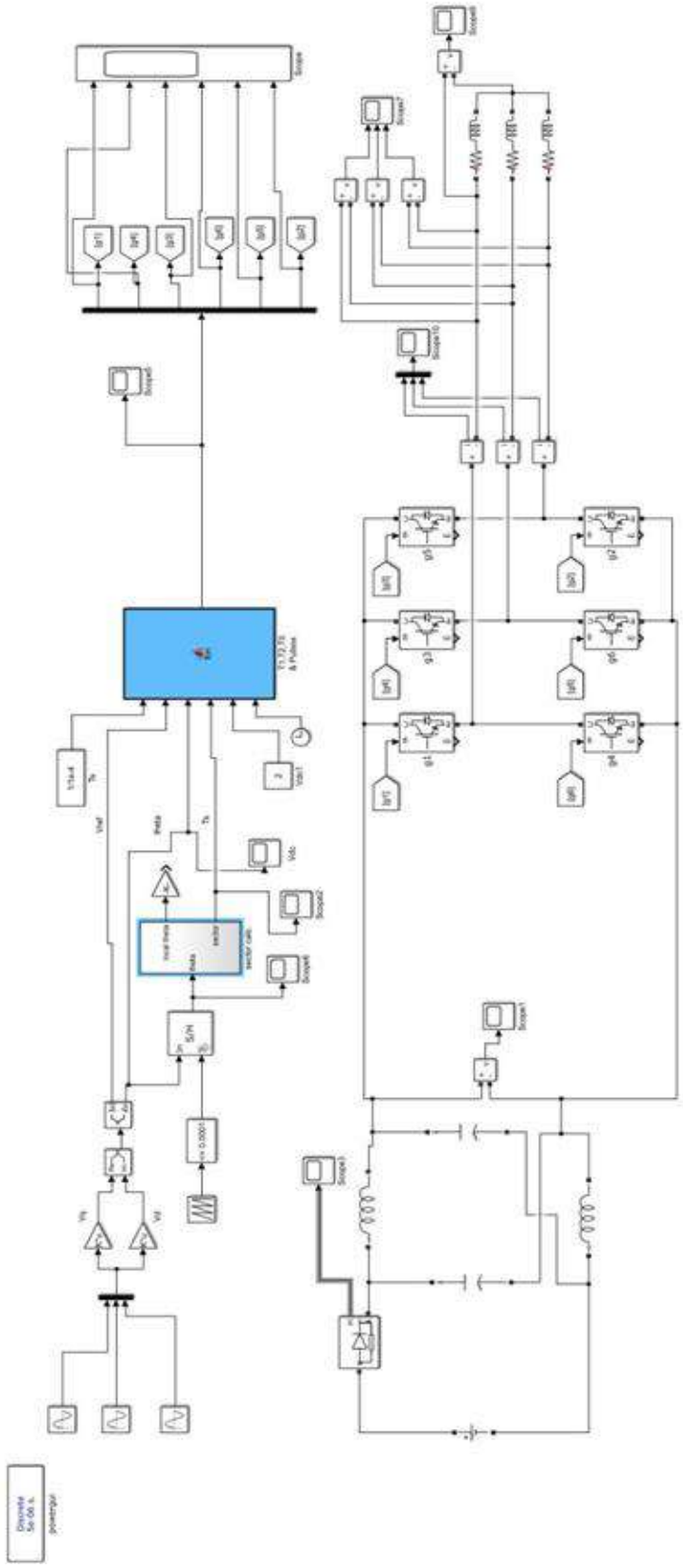


Figure 8 Schema bloc Commande vectorielle des onduleurs Z-Source (SVPWM)

- **Nous présentons les routines essentielles de notre programme :**

```
% T1,T2,T0,timet
function pwm  = fcn(Fs,Mag,ang,Sec,Vdc,clk)

%  Time synchronization with the simulink clock.
t=clk;

% Vdc at workspace
% General expression for the calculation of T1, T2 and
T0.


T1=(sqrt(3)*(Mag/Vdc))*sin(Sec*pi/3 -ang)/Fs;
T2=(sqrt(3)*(Mag/Vdc))*sin(ang - ((Sec-1)*pi/3))/Fs;
T0= (1/Fs -T1- T2)/2;

% Change of sectors
sec_ant=mod(floor(Sec),2);

if(sec_ant~=1)  % detection sector exchange

 T1=(sqrt(3)*(Mag/Vdc))*sin(ang - ((Sec-1)*pi/3))/Fs;
 T2=(sqrt(3)*(Mag/Vdc))*sin(Sec*pi/3 -ang)/Fs;

end


% Sawtooth
ref= 1/Fs * rem(t,1/Fs)/(1/Fs);
 Dcc=0.25;
% Time intervals
Tcc=Dcc*T0;
int1=T0/4-Tcc/4;
int2=int1+Tcc/4;
int3=int2+T1/4;
int4=int3+T2/2;
int5=int4+Tcc/4;
int6=int4+T0/2-Tcc/4;
int7=int6+Tcc/4;
int8=int7+T2/2;
int9=int8+T1/2;
int10=int9+Tcc/4;

timet=1+(ref>=int1)+(ref>=int2)+(ref>=int3)+(ref>=int4)
+(ref>=int5)+(ref>=int6)+(ref>=int7)+(ref>=int8)+(ref>=
int9)+(ref>=int10);
%
%
```

```
sw_array=zeros(6,11,6);  %Initialize table of key states -> 3 rows (arms), 11 columns (times) and 6 vectors (sectors).
%
%              ---------------Arm A ----------------   -------------Arm B ---------------   ---------------Arm C-----------------
sw_array(:,:,1)=[0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0;0 1 0 1 1 1 1 1 0 0 0; 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0;
sw_array(:,:,2)=[0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0;0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0; 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0;
sw_array(:,:,3)=[0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0;0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0; 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0;
sw_array(:,:,4)=[0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0;0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0; 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0;
sw_array(:,:,5)=[0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0;0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0; 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0;
sw_array(:,:,6)=[0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0;0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0; 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0;

 ---------------Arm D-------------  ---------------Arm E---------------   ---------------Arm F-------------
1 0  0  0  1  0  0  0  0 1 1;1 1  1  0  0  0  0  0  1  1  1;1 1  1  1  0  0  1  1  1  1  1]; %setor 1
1 1  1  0  0  0  0  0  1 1 1;1 1  0  0  0  0  0  0  0  1  1;1 1  1  1  1  0  1  1  1  1  1]; %setor 2
1 1  1  1  1  0  1  1  1 1 1;1 1  0  0  0  0  0  0  0  1  1;1 1  1  0  0  0  0  0  1  1  1]; %setor 3
1 1  1  1  1  0  1  1  1 1 1;1 1  1  0  0  0  0  0  1  1  1;1 1  0  0  0  0  0  0  0  1  1]; %setor 4
1 1  1  0  0  0  0  0  1 1 1;1 1  1  1  1  0  1  1  1  1  1;1 1  0  0  0  0  0  0  0  1  1]; %setor 5
1 1  0  0  0  0  0  0  0 1 1;1 1  1  1  1  0  1  1  1  1  1;1 1  1  0  0  0  0  0  1  1  1]; %setor 6
```

```
% if t<1e-6
% Sec=1;
% end;

S1=sw_array(1,timet,Sec);
S2= sw_array(2,timet,Sec);
S3=sw_array(3,timet,Sec);
S4= sw_array(4,timet,Sec);
S5=sw_array(5,timet,Sec);
S6=sw_array(6   ,timet,Sec);
% SVPWM

pwm= [S1 S2 S3 S4 S5 S6]';
Sec,timet,pwm'

End
```

Annexe. C:

- **Simulation Commande vectorielle des onduleurs Z-Source alimenté par un générateur PV :**

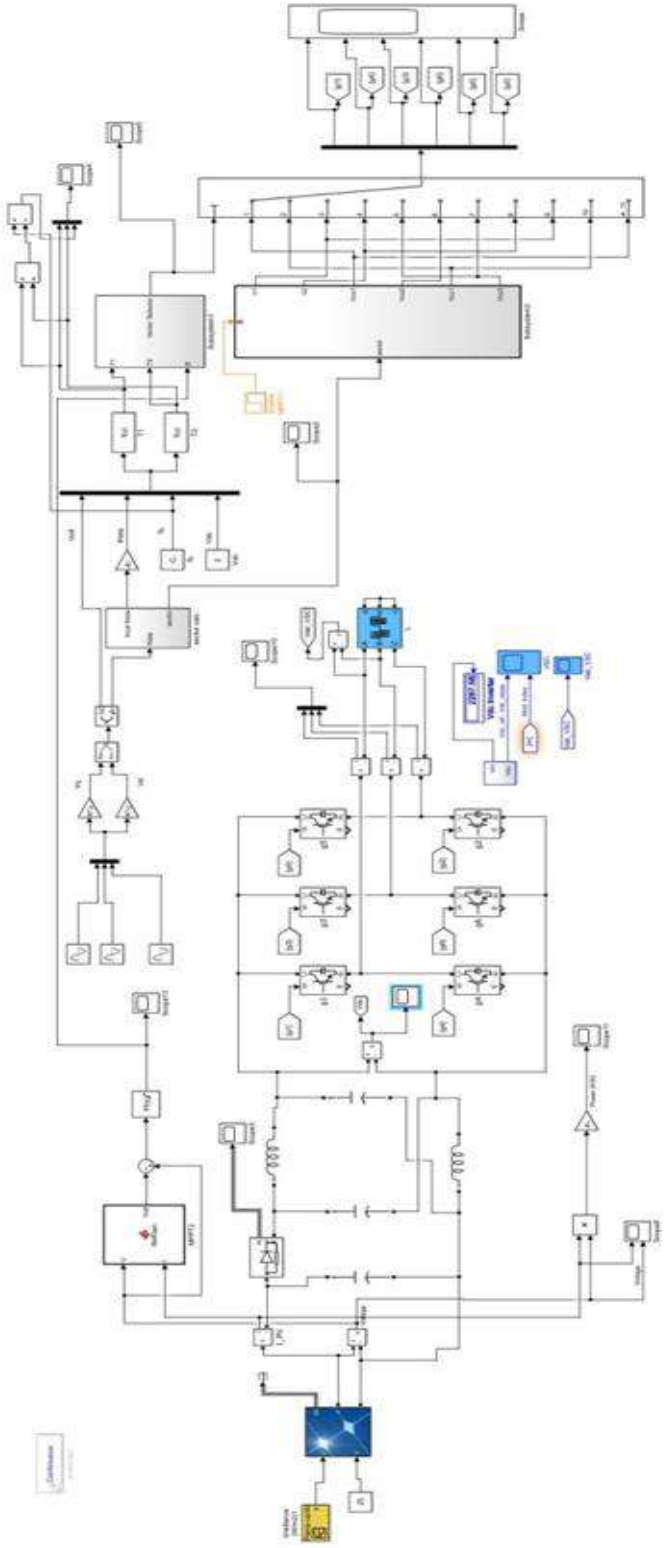


Figure 9 Commande vectorielle des onduleurs Z-Source alimenté par un générateur PV

- **Script Matlab :**

4. MPPT control fonction dans le sous-système

```
abfunction D  = PandO(Param, Enabled, V, I)

% MPPT controller based on the Perturb & Observe
algorithm.

% D output = Duty cycle of the boost converter (value
between 0 and 1)
%
% Enled input = 1 to enable the MPPT controller
% V input = PV array terminal voltage (V)
% I input = PV array current (A)
% Param input:
Dinit = Param(1);  %Initial value for D output
Dmax = Param(2);   %Maximum value for D
Dmin = Param(3);   %Minimum value for D
deltaD = Param(4); %Increment value used to
increase/decrease the duty cycle D
% ( increasing D = decreasing Vref )
persistent Vold Pold Dold;
dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0 & Enabled ~=0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    else
        if dV < 0
```

```
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    end
else D=Dold;
end

if D >= Dmax | D<= Dmin
    D=Dold;
end

Dold=D;
Vold=V;
Pold=P
```