

République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE AMAR TELIDJI-LAGHOUCAT

**FACULTE de Technologie
DÉPARTEMENT d'Électrotechnique**

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par :

BOULEHIA Ahmed Madani

BABAGHAYOU Siham

DOMAINE : Sciences et Technologie

FILIERE : Électrotechnique

OPTION : Électrotechnique Industrielle

Thème

Commande d'une Centrale PV Connectée au Réseau Via un Onduleur à Source d'Impédance

Soutenu devant le jury composé de :

Nom et Prénom		Grade	Qualité
Mr. OMRANE	Mohamed	M.C.A	Président
Mr. OUAI	Atallah	M.C.A	Examineur
Mr. MOKRANI	Lakhdar	Prof.	Encadreur
Mme. BENLARBI	Keltoum	M.C.B	Co-encadreur
Mr. DELASSI	Abdelmoumène	Dr.	Invité

Promotion : 2021/2022

ملخص:

تعنى هذه المذكرة بدراسة نظام كهروضوئي موصول بالشبكة الكهربائية عبر موج ذي منبع بممانعة (*Z-Source*). يتيح مكيف الطاقة هذا إمكانية رفع جهد المولد الكهروضوئي والتحكم في القوى المحقونة في الشبكة. الجزء الأول مخصص للمولد الكهروضوئي، مكوناته، مبدأ التشغيل، خصائصه ونمذجته. بعد ذلك، تم عرض و مقارنة المموج (*Z-Source*) بمقلبات ذات منابع الجهد و التيار على حد سواء. ثم تم تقديم مختلف التركيبات واستراتيجيات التحكم لهذا النوع من مكيفات الطاقة. بالإضافة إلى ذلك، تم وصف وتفصيل التحكم المتنوع لنقطة الإستطاعة العظمى (*MPPT*) المبني على أساس طريقة تغيرات الناقلية (*CI*) وكذلك التحكم في الإستطاعات التي يتم حقنها في الشبكة، من خلال تعديل جهد الطابق المستمر والتيارات الفعالة والمتفاعلة. تمت محاكاة سلسلة التحويل الكهروضوئية هذه باستخدام برنامج *SIMULINK / MATLAB*. ثم تم إجراء العديد من عمليات المحاكاة من أجل إظهار مساهمة مموج (*Z-Source*) في تحسين جودة الطاقة المحقونة في الشبكة في ظروف تشغيل مختلفة تتعلق بتغير شدة الضوء ودرجة الحرارة، و ذلك مقارنة بالموجات ذات 2 و 3 مستويات جهد.

كلمات مفتاحية : خلايا كهروضوئية، مولد الطاقة الكهروضوئية، موجات ذات 2 و 3 مستويات جهد، مموج (*Z-Source*)، مموج (*Q-Z-Source*)، نظام كهروضوئي موصول بالشبكة الكهربائية، تقنية (*IC-MPPT*) ، التحكم غير المباشر في الإستطاعة ، جودة الطاقة.

Résumé :

Ce mémoire présente une étude concernant un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique via un onduleur à source d'impédance (*Z-Source*). Ce conditionneur de puissance permet à la fois d'élever la tension du générateur *PV* et de commander les puissances injectées au réseau. La première partie est consacrée au générateur photovoltaïque, ses composants, son principe de fonctionnement, ses caractéristiques et sa modélisation. Ensuite, l'onduleur *Z-Source* a été comparé aux onduleurs aux sources de tension et de courant. Puis les différents topologies et stratégies de commande de ce conditionneur de puissance ont été présentées. En outre, la commande *MPPT* par la méthode de l'Incrémentation de la Conductance (*IC*) ainsi que la commande des puissances injectées au réseau, à travers le réglage de la tension du bus continu et des courants actif et réactif, ont été décrites et élaborées. Cette chaîne de conversion *PV* a été simulée sous le logiciel *MATLAB/Simulink*. Plusieurs simulations ont été effectuées afin de montrer l'apport du convertisseur *Z-Source* à la qualité d'énergie injectée au réseau pour différentes conditions de fonctionnement correspondant à un ensoleillement et une température variables comparativement aux onduleurs à 2 et 3 niveaux.

Mots clés : Cellules *PV*, Générateur *PV*, Onduleurs à 2 et 3 niveaux, Onduleur *Z-source*, Onduleur *Quasi-Z-source*, Système *PV* connecté au réseau, *MPPT* à *IC*, Commande indirecte des puissances, Qualité d'énergie.

Abstract :

This memoir presents a study concerning a photovoltaic system connected to the electrical network via an impedance source inverter (*Z-Source*). This power conditioner allows the *PV* generator voltage boosting and the control of the powers injected into the grid at the same time. The first part is devoted to the photovoltaic generator, its components, its operating principle, its characteristics and its modeling. Next, the *Z-Source* inverter has been compared to the voltage and current source inverters. Then, the different topologies and control strategies of this power conditioner have been presented. In addition, the *MPPT* control by the Conductance Increment (*CI*) method as well as the control of the powers injected into the grid, through the adjustment of the *DC* bus voltage and the active and reactive currents, have been described and elaborated. This *PV* plant has been simulated using *MATLAB/SIMULINK* software. Several simulations have been carried out in order to show the contribution of the *Z-Source* converter to improve the quality of energy injected into the grid for different operating conditions corresponding to variable light intensity and temperature.

Keywords: *PV* cells, *PV* generator, 2 and 3 level inverters, *Z*-source inverter, Quasi-*Z*-source inverter, Grid-connected *PV* system, *CI-MPPT*, Indirect power control, Power quality.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- *A celle qui s'est sacrifiée pour que je grandisse, qui a supporté mes caprices sans se fatiguer avec un savoir-faire et une patience irremplaçable, à ma chère mère «OUMELKHER TAIBI» ;*
- *A celui qui a tout fait pour mon bien, qui influe sur ma personnalité, oriente mon chemin avec ses conseils, à mon cher père «SADEK BABAGHYAOU» ;*
- *A mes chère sœurs «HOUDA HASNA et IMAN», ;*
- *A mes chers frères «MAHMOUD et MOHAMED EL AMIN» ;*
- *A mes amies MANAL et KHADIDJA qui m'ont toujours encouragée ;*
- *A mon binôme, mon ami AHMED et sa famille ;*
- *A tous ceux que j'aime.*

Siham.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- *A l'âme de ma très bien aimée « FATIMA » ma mère, Allah yarhmha, elle aurait été bien fière de moi ;*
- *A celui qui a tout fait pour mon bien, qui influe sur ma personnalité, oriente mon chemin avec ses conseils, à mon cher père « LAZHARI » ;*
- *A ma chère sœur « ROUFAIDA » ;*
- *A mon cher frère « ABDELKADER » ;*
- *A mon binôme, mon amie SIHAM et sa famille ;*
- *A tous ceux que j'aime.*

Ahmed.

Remerciements

Avant tout, nous remercions ***ALLAH***, le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur ***Mr MOKRANI Lakhdar*** pour avoir accepté notre encadrement et l'opportunité d'aborder un sujet très intéressant et pour ces conseils et son soutien. Nous remercions également ***Mme BENLARBI Keltoum*** pour son aide surtout dans la partie simulation.

Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté à notre travail : ***Mr OMRANE Mohamed*** en tant que président de jury, ***Mr OUAI Atallah*** en qualité d'examineur et ***Mr DELLASSI Abdelmoumène*** en tant qu'invité.

Nos remerciements vont également à tous nos enseignants et collègues qui nous ont aidés de près ou de loin pour le bon déroulement de ce travail et toute personne qui nous a aidés à atteindre notre objectif.

Liste des Symboles et Abréviations

Liste des Symboles et Abréviations

- *Symboles*

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
A	Facteur d'idéalité de la diode	-
α_{sc}	Coefficient de variation du courant due à la température (A /°C)	(°C)
β_{oc}	Coefficient de variation de la tension due à la température (V/°C)	(°C)
C	Capacité du condensateur	(F)
E	Ensoleillement	(W/m ²)
E_g	Tension de seuil de la diode	(V)
ΔE	Variation de l'ensoleillement	(W/m ²)
E_{ref}	Ensoleillement de référence (1000 W/m ²)	(W/m ²)
F_e	Fréquence de découpage	(Hz)
FF	Facteur de forme	-
I_o	Courant de saturation de la diode	(A)
I_{cc}	Courant de court-circuit	(A)
I_m	Courant maximal	(A)
I_{mpp}, I_{opt}	Courant au point de puissance maximale ou optimal	(A)
I_{ph}	Photo-courant	(A)
I_{sat}	Courant de saturation	(A)
I_d	Courant de diode	(A)
I_{sh}	Courant shunt	(A)
I_{pv}	Courant délivré par le module photovoltaïque	(A)
ΔI_{pv}	Variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température	(A)
K	Constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/°K)	(°K)

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
η	Rendement de la cellule	-
η_{conv}	Rendement de conversion d'un étage d'adaptation	-
η_{mppt}	Rendement au point de puissance maximale	-
η_{tot}	Rendement global de la chaîne de conversion photovoltaïque	-
P_m	Puissance maximale	(W)
P_{mpp}, P_{opt}	Puissance au point de puissance maximale ou puissance optimale	(W)
P_{out}	Puissance de sortie	(W)
P_{pv}	Puissance photovoltaïque	(W)
P_{pv-opt}	Puissance photovoltaïque optimale	(W)
q	Charge électrique d'un électron ($1.6 \times 10^{-19}C$)	(°C)
R_s	Résistance série	(Ω)
R_{sh}	Résistance shunt	(Ω)
S	Surface de la cellule	(m ²)
T_c	Température dans des conditions quelconques	(°C)
ΔT_c	Variation de la température	(°C)
T_{ref}	Température de référence (25°C)	(°C)
T_{stc}	Température dans les conditions standards de fonctionnement	(°C)
T_j	Température de la cellule	(°K)
T_a	Température ambiante	(°C)
ΔV_{pv}	Variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température	(V)
V_m	Tension maximale	(V)
V_{mpp}, V_{opt}	Tension au point de puissance maximale ou tension optimale	(V)
V_d	Tension aux bornes de la diode	(V)
V_{pv-opt}	Tension photovoltaïque optimale	(V)
V_{pv}	Tension photovoltaïque	(V)
V_{co}	Tension de circuit ouvert	(V)

- **Abréviations**

<i>Abréviation</i>	<i>Signification</i>
<i>AC</i>	<i>Alternative Current</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i>
<i>GPV</i>	Générateur Photovoltaïque
<i>IGBT</i>	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
<i>MLI</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>
<i>PPM</i>	Point à Puissance Maximale
<i>MPPT</i>	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
<i>NPC</i>	<i>Neutral Point Clamping</i>
<i>PO</i>	Perturbation et Observation
<i>PV</i>	Photovoltaïque
<i>PLL</i>	<i>Phase Locked Loop</i>
<i>QZS</i>	<i>Quasi-Z-Source</i>
<i>VSC</i>	<i>Voltage Source Converter</i>
<i>ZS</i>	<i>Z-Source</i>

Liste des Figures

Liste des Figures

<i>Figure</i>	<i>Page</i>
<i>Figures du Chapitre I</i>	
Figure I.1 Le premier satellite scientifique américain muni de panneaux solaires	6
Figure I.2 Schéma équivalent d'un module PV : Modèle à une diode	12
Figure I.3 Schéma équivalent d'un module PV : Modèle à deux diodes	13
Figure I.4 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module PV pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$	15
Figure I.5 Caractéristique puissance-tension et courant-tension d'un module PV pour différents éclairements	16
Figure I.6 Caractéristique courant-tension et puissance-tension pour différents niveaux de température	17
<i>Figures du Chapitre II</i>	
Figure II.1 Chaîne de puissance du système PV étudié	19
Figure II.2 Schéma d'un hacheur <i>boost</i>	21
Figure II.3 Schéma de l'hacheur <i>boost</i> pendant la première séquence de fonctionnement	22
Figure II.4 Schéma de l'hacheur <i>boost</i> pendant la deuxième séquence de fonctionnement	22
Figure II.5 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque muni d'une commande <i>MPPT</i>	24
Figure II.6 Principe de la méthode <i>MPPT-IC</i>	24
Figure II.7 Organigramme de la méthode <i>MPPT-IC</i>	26
Figure II.8 Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux raccordé au réseau	27
Figure II.9 Schéma d'un bras de l'onduleur à trois niveaux de type <i>NPC</i>	28
Figure II.10 Amplitude de la composante fondamentale de tension de sortie en fonction du taux de modulation	31
Figure II.11 Bloc de commande d'un onduleur triphasé conventionnel	33
<i>Figures du Chapitre III</i>	
Figure III.1 Schéma du principe d'un convertisseur ' <i>boost</i> '	36
Figure III.2 Schéma fonctionnel général d'un convertisseur <i>DC-AC</i>	36

Figure III.3 Onduleur de tension triphasé	37
Figure III.4 Conditionneur de puissance traditionnel à deux étages	38
Figure III.5 Schéma d'un onduleur à source de courant	39
Figure III.6 Conditionneur de puissance à un étage à base d'un onduleur <i>Z-Source</i>	40
Figure III.7 Structure générale d'un onduleur à source d'impédance	42
Figure III.8 Schéma équivalent d'un onduleur à source d'impédance vu du côté bus continu	45
Figure III.9 Circuit équivalent du <i>ZSI</i> fonctionnant en mode 'shoot through'	46
Figure III.10 Circuit équivalent du <i>ZSI</i> fonctionnant en mode 'not shoot through'	47
Figure III.11 Circuit équivalent d'un onduleur <i>Quasi-Z-source</i>	49
Figure III.12 Schémas des deux modes d'opération du <i>QZSI</i>	49
Figure III.13 Tension de référence, onde porteuse et signal de la commande à <i>MLIS</i>	51
Figure III.14 Commande à <i>MLIS</i> du <i>ZSI</i> à survoltage simple	52
Figure III.15 Commande à <i>MLIS</i> du <i>ZSI</i> à survoltage maximal	53
Figure III.16 Commande à <i>MLIS</i> du <i>ZSI</i> à survoltage constant et maximal	53
Figure III.17 Commande <i>MLIS</i> à amplification constante maximale avec injection de la troisième harmonique	54

Figures du Chapitre IV

Figure IV.1 Profils de l'éclairement et de la température appliqués au <i>GPV</i> du système <i>PV</i> étudié	57
Figure IV.2 Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du module <i>PV</i> étudié pour différents éclaircements	57
Figure IV.3 Schéma bloc sous <i>SIMULINK</i> du système <i>PV</i> étudié à base d'un onduleur à deux niveaux	59
Figure IV.4 Allure de la puissance du <i>GPV</i> et la puissance active injectée au réseau dans le cas d'un onduleur à deux niveaux	60
Figure IV.5 Allure du courant et de la tension du réseau dans le cas d'un onduleur à deux niveaux	61
Figure IV.6 Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à deux niveaux	62
Figure IV.7 Analyse spectrale par <i>FFT</i> du courant injecté au réseau dans le cas du <i>PCS</i> à base d'un onduleur à deux niveaux	62
Figure IV.8 Schéma bloc sous <i>SIMULINK</i> du système <i>PV</i> étudié à base d'un onduleur à trois niveaux	64

Figure IV.9 Allure de la puissance de <i>GPV</i> et la puissance active injectée au réseau dans le cas d'un onduleur à trois niveaux	65
Figure IV.10 Allure du courant et de la tension du réseau dans le cas d'un onduleur à trois niveaux	66
Figure IV.11 Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à trois niveaux	66
Figure IV.12 Analyse spectrale par <i>FFT</i> du courant injecté au réseau dans le cas du <i>PCS</i> à base d'un onduleur à trois niveaux	67
Figure IV.13 Schéma bloc sous <i>SIMULINK</i> du système <i>PV</i> étudié à base d'un onduleur <i>Z-source</i>	68
Figure IV.14 Schémas blocs sous <i>SIMULINK</i> de la partie commande de l'onduleur <i>Z-Source</i>	69
Figure IV.15 Allure de la puissance du <i>GPV</i> et la puissance active injectée au réseau dans le cas d'un onduleur <i>Z-source</i>	70
Figure IV.16 Allure de la tension et du courant du réseau dans le cas d'un <i>PCS</i> à base d'un onduleur <i>Z-Source</i>	71
Figure IV.17 Allure de la tension d'entrée moyenne de l'onduleur <i>Z-Source</i>	71
Figure IV.18 Analyse spectrale par <i>FFT</i> du courant injecté au réseau dans le cas d'un <i>PCS</i> à base d'un onduleur <i>Z-Source</i>	72
Figure IV.19 Schéma bloc sous <i>SIMULINK</i> du système <i>PV</i> étudié à base d'un onduleur <i>Quasi-Z-Source</i>	73
Figure IV.20 Allure de la puissance active et la puissance de <i>GPV</i> injectée au réseau dans le cas d'un onduleur <i>Quasi-Z-Source</i>	74
Figure IV.21 Allure du courant injecté et de la tension du réseau dans le cas d'un <i>PCS</i> à base d'un onduleur <i>Quasi- Z-Source</i>	75
Figure IV.22 Allure de la tension d'entrée moyenne d'un onduleur <i>Quasi- Z-Source</i>	76
Figure IV.23 Analyse spectrale par <i>FFT</i> du courant injecté au réseau dans le cas d'un <i>PCS</i> à base d'un onduleur <i>Quasi-Z-source</i>	76

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

<i>Tableau</i>	<i>Page</i>
<i>Tableaux du Chapitre II</i>	
Tableau (II.1) Configurations d'un bras de l'onduleur <i>NPC</i> à trois niveaux	29
<i>Tableaux du Chapitre III</i>	
Tableau (III.1) Comparaisons entre les onduleurs de tension, de courant et à sources d'impédance	41
Tableau (III.2) États de commutation de l'onduleur Z-source triphasé	44
<i>Tableaux du Chapitre IV</i>	
Tableau (IV.1) Comparaison de la qualité et l'efficacité énergétique du système <i>PV</i> dans le cas des onduleurs étudiés	77

Sommaire

Sommaire

<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
<i>Chapitre I Généralités sur les Systèmes Photovoltaïques</i>	<i>4</i>
I.1 Introduction	5
I.2 Généralités sur les systèmes Photovoltaïques	5
I.2.1 Historique	5
I.2.2 Effet photovoltaïque	7
I.3 Le rayonnement solaire	8
I.4 Cellule photovoltaïque	8
I.4.1 Principe de la conversion photovoltaïque	8
I.4.2 Différentes technologies des cellules solaires	10
I.4.2.1 Cellules à base du silicium monocristallin	10
I.4.2.2 Cellules à base du silicium poly-cristallin	11
I.4.2.3 Silicium en couche mince	11
I.5 Modélisation du générateur photovoltaïque	11
I.5.1 Modèle à une diode d'un module PV réel	11
I.5.2 Modèle d'un module PV réel à deux diodes	13
I.6 Caractéristiques des modules photovoltaïques	14
I.6.1 Influence de l'irradiation sur les caractéristiques des modules PV	15
I.6.2 Influence de la température sur les caractéristiques des modules PV	16
I.7 Conclusion	17
<i>Chapitre II Modélisation et Commande d'une Chaîne de Conversion Photovoltaïque</i>	<i>18</i>
II.1 Introduction	19
II.2 Constitution de chaîne de la puissance du système photovoltaïque étudié	19
II.3 Modèle du générateur photovoltaïque	20
II.4 Modélisation et commande du convertisseur DC/DC	20
II.4.1 Types des hacheurs	20

II.4.2 Modélisation de l'hacheur <i>boost</i>	21
II.4.3 Poursuite du point a maximum de puissance	23
II.4.3.1 Techniques de recherche du point de puissance maximal	23
II.4.3.2 Technique de la conductance incrémentale	24
II.5 Modélisation et commande du convertisseur <i>DC/AC</i>	26
II.5.1 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux	26
II.5.2 Modélisation de l'onduleur triphasé à trois niveaux	27
II.5.3 Commande d'un onduleur à <i>MLI</i>	29
II.5.3.1 Paramètres du MLI sinus-triangle	29
II.6 Présentation du bloc de commande du système <i>PV</i> étudié	31
II.7 Conclusion	33
Chapitre III Conditionneur de Puissance du Système <i>PV</i> étudié à Base d'un Onduleur Z-Source	34
III.1 Introduction	35
III.2 Conditionneurs de puissance d'un système photovoltaïque	35
III.2.1 Conditionneur de puissance a deux étages	36
III.2.1.1 Convertisseurs <i>DC-DC</i>	36
III.2.1.2 Convertisseurs <i>DC-AC</i>	36
III.2.1.2.1 Onduleur de tension	37
III.2.1.2.2 Onduleur de courant	38
III.2.2 Conditionneur de puissance à un étage à base d'un onduleur Z-Source	39
III.2.3 Comparaison entre les différents types d'onduleur	40
III.3 Onduleur à source d'impédance	41
III.3.1 Topologies d'un onduleur triphasé à structure z-source	42
III.3.1.1 Configurations d'un onduleur triphasé avec structure Z-source	43
III.3.2 Principe de fonctionnement d'un onduleur Z-source	44
III.3.3 Fonctionnement en mode "shoot through "	45
III.3.4 Fonctionnement en mode "not-shoot through":	46
III.3.5 Expression du facteur de survoltage	47
III.4 Onduleur quasi-Z-source	48
III.5 Techniques de commande d'un onduleur à sources d'impédances	51
III.5.1 Commande par survoltage simple	52
III.5.2 Commande par survoltage maximal	52

III.5.3 Commande par survoltage constant et maximal	53
III.6 Conclusion	54
Chapitre IV Présentation et Discussion des Résultats de Simulation	55
IV.1. Introduction	55
IV.2. Présentation du système PV étudié	55
IV.3. Présentation et discussion des résultats	58
IV.3.1 Cas du système PV étudié à base d'un onduleur à deux niveaux	58
IV.3.2 Cas du système PV étudié à base d'un onduleur à trois niveaux	63
IV.3.3. Cas du système PV étudié à base d'un onduleur <i>Z-source</i>	67
IV.3.4 Cas du système PV étudié à base d'un onduleur <i>Quasi-Z-Source</i>	72
IV.4 Analyse et comparaison des résultats	77
IV.5 Conclusion	77
Conclusion générale	78
Bibliographie	80
Annexe	87

Introduction

générale

Introduction générale

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci ont été exploitées par l'homme depuis la nuit des temps (autrefois, les moulins à eau, à vent, le bois de feu, la traction animale, le bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité). Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment au milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Mais dans les pays industrialisés, dès le *XIX^{ème}* siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie supposées plus prometteuses. Des récentes estimations ont montré qu'actuellement plus de 2 milliards d'individus ne sont toujours pas raccordés aux grands réseaux d'électricité, pour la plupart situées dans les pays du tiers monde, ou plus de la moitié vivent encore sans électricité.

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout avec une moindre dépendance des ressources fossiles, à condition d'accepter et bien gérer les périodes de leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

Dans ce mémoire, nous allons nous intéresser à la filière photovoltaïque où nous allons nous consacrer essentiellement à une étude concernant la commande d'une chaîne de conversion *PV* connectée au réseau via une topologie récente de convertisseur statique dite à source d'impédance (*Z-source*).

Dans le premier chapitre, nous allons mener une étude concernant l'énergie solaire photovoltaïque, où nous allons brièvement discuter de son historique et du principe de la conversion *PV*. Nous allons également définir la cellule photovoltaïque et ses types et le principe de son fonctionnement. Et nous allons également présenter les modèles et les caractéristiques des modules photovoltaïques ainsi que les paramètres essentiels les caractérisant. Enfin, nous allons modéliser un générateur photovoltaïque (*GPV*) en préparation du chapitre suivant, qui concerne la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter une chaîne de conversion photovoltaïque, où nous allons modéliser tous ces composants (l'hacheur et/ou onduleur). Nous allons également décrire la commande de ces convertisseurs statiques. Ensuite, nous allons nous intéresser au principe et aux différents types de techniques de poursuite du point de puissance maximale (*MPPT : Maximum Power Point Tracking en anglais*).

Nous allons nous concentrer beaucoup plus sur la méthode de la conductance incrémentale. Par ailleurs, nous présentons les techniques de commande de l'onduleur faisant partie du conditionneur de puissance du système étudié (commande à *MLI* sinus-triangle ou de tension).

Dans le troisième chapitre, nous allons d'abord présenter l'onduleur à source d'impédance (*Z-Source*) tout en le comparant aux autres différents types d'onduleurs aux sources de tension et de courant. Nous montrerons leurs avantages et inconvénients. Ensuite nous allons entamer une présentation détaillée des onduleurs *Z-Source*, leurs différentes topologies et structures. Nous allons nous intéresser également aux principes de fonctionnement de ce conditionneur de puissance en expliquant ses deux phases d'opération (état traversant '*shoot through state*' et état non traversant '*not shoot through state*'). Nous décrirons aussi la commande à modulation de largeur d'impulsions sinusoïdale et ses différentes variantes adaptées à l'onduleur à source d'impédance (Commande pour une suralimentation simple / maximale / constante maximale). Ensuite, nous allons présenter l'une des variantes les plus intéressante de ce conditionneur de puissance à savoir l'onduleur '*quasi-Z-Source*'.

Le quatrième chapitre sera consacré à la simulation des différents éléments du système *PV* connecté au réseau étudié (générateur photovoltaïque, convertisseur *DC/DC* et/ou convertisseur *DC/AC* de types 2 niveaux, 3 niveaux, *Z-Source*, *Q-Z-source*, filtre *LC*, réseau et bloc de commande des conditionneurs de puissance) en utilisant le logiciel (*MATLAB/Simulink*). Le bloc de commande est constitué de la technique de *MPPT* basée sur la méthode de la conductance incrémentale, et des boucles de commande indirecte des puissances (active et réactive injectées au réseau) à travers le réglage de la tension du bus continu et des deux courants (actif et réactif) du côté réseau.

Différentes simulations seront effectuées et les résultats obtenus seront présentés et discutés pour montrer l'apport du convertisseur *Z-source* sur la qualité d'énergie injectée au réseau pour différentes conditions de fonctionnement correspondant à un ensoleillement et une température variables, et ceci comparativement aux onduleurs à deux et trois niveaux.

Nous terminons par une conclusion générale qui récapitule l'essentiel des résultats obtenus et propose un ensemble de perspectives de cette étude.

Chapitre I

Généralités sur les Systèmes

Photovoltaïques

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont toutes les énergies que la nature constitue ou reconstitue plus rapidement. Elles peuvent ainsi être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Parmi les sources de ces énergies on trouve :

- Le vent (source de l'énergie éolienne) ;
- Le soleil (qui peut nous fournir de l'énergie thermique, photovoltaïque ou thermodynamique) ;
- La chaleur terrestre (géothermie) ;
- L'eau (qui peut nous donner de l'énergie hydroélectrique, marémotrice) ;
- La biodégradation (biomasse) ;
- Et le biocarburant.

Dans ce chapitre, nous nous limitons à l'énergie solaire photovoltaïque uniquement.

I.2 Généralités sur les systèmes photovoltaïques

L'énergie solaire photovoltaïque (*PV*) provient de la conversion directe de l'énergie des photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des cellules élémentaires fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs qui réalisent cette transformation d'énergie. L'association de plusieurs cellules *PV* en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque, la mise en série et en parallèle de ce dernier forme un générateur photovoltaïque (*GPV*). La puissance extraite du *GPV* dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule.

I.2.1 Historique

La conversion de la lumière en électricité, appelé effet photovoltaïque, a été découverte en 1839 par un physicien français, Antoine César Becquerel (en irradiant une électrode en argent dans un électrolyte, il obtint une tension électrique) [1]. En 1875, le physicien Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs [1].

La première cellule solaire fonctionnelle fut construite en 1883 par Charles Fritts [1]. Mais le rendement de sa cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation. Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium [1].

Après la deuxième guerre mondiale, les recherches après-guerre ont permis d'améliorer les performances de ces cellules et leur taille et ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphone. On envisagea alors la possibilité de fournir de l'électricité grâce à ces cellules. Au même moment, l'industrie spatiale naissante, cherche de nouvelles solutions (autre que le procédé nucléaire) pour alimenter ses satellites [2].

C'est en 1958, que les premiers satellites avec panneaux solaires sont envoyés dans l'espace (voire figure I.1) et au même moment une cellule avec un rendement de 9% est mise au point. Mais il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque. En effet, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres.

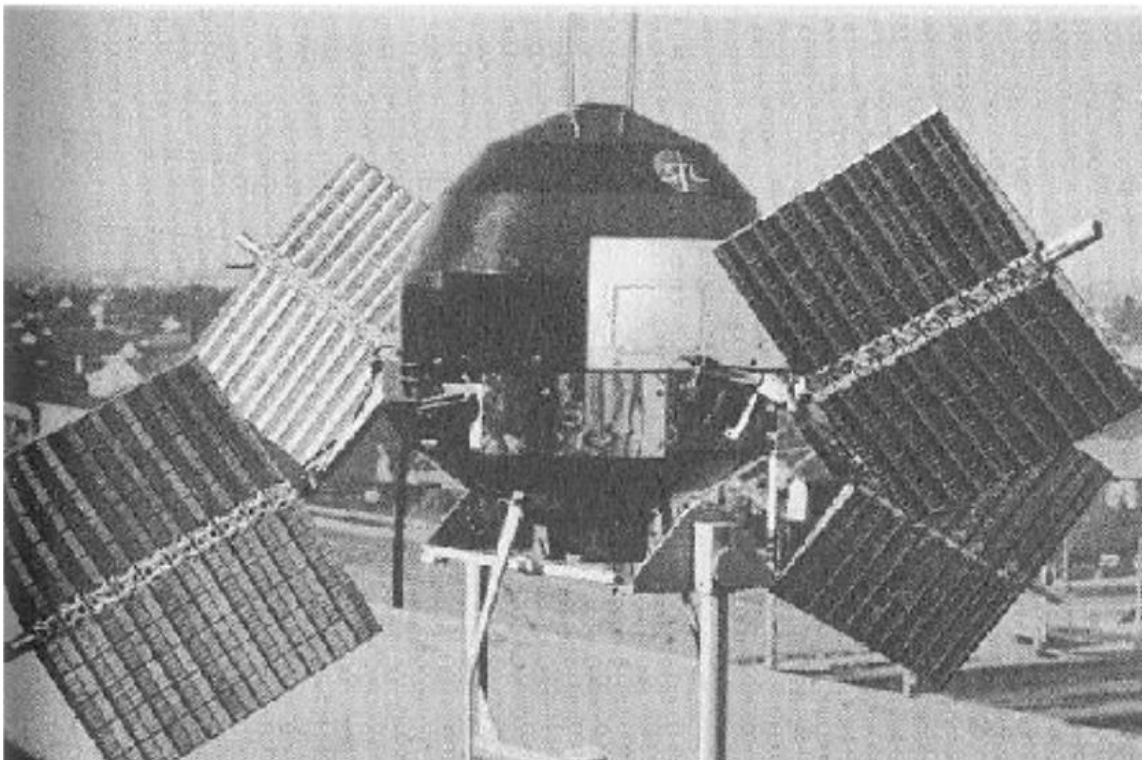


Figure I.1 Le premier satellite scientifique américain muni de panneaux solaires

En 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware aux USA. Ainsi, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales

de quelques mégawatts. La croissance de l'industrie fut spectaculaire, notamment à travers de nombreux produits de faible puissance fonctionnant grâce à l'énergie solaire, tels que les montres, les calculatrices, les balises radio et les stations météorologiques, les pompes et les réfrigérateurs solaires. En 1983, la première voiture, alimentée par énergie photovoltaïque, parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

Bien que le prix soit peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année ne cesse d'augmenter.

I.2.2 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est basé sur la conversion lumineuse en énergie électrique. Cette conversion implique un ensemble de processus physiques :

- Absorption des photons incidents et génération d'excitons : l'absorption des photons par le matériau organique, contrairement à l'inorganique, engendre des excitons fortement liés [Gho78, Yam87]. Un exciton est formé d'une paire électron-trou liée par attraction électrostatique. On peut distinguer deux types d'excitons : exciton petit et fortement lié (approximation de Frenkel) et exciton faiblement lié avec une distance électron-trou importante (approximation de Mott et Wannier) [2].
- Diffusion et dissociation des excitons : le mouvement de l'exciton dans le matériau s'effectue par saut d'une molécule à une autre (transferts de Dexter ou Forster), jusqu'à ce qu'il atteigne un site de dissociation qui permet de séparer les porteurs de charges. Cette séparation peut être obtenue suivant divers processus : une excitation thermique, présence d'impuretés, champ électrique généré, et selon les structures, par la jonction de deux semi-conducteurs de nature et de type différents (hétérojonction), ou par la barrière de potentiel entre un métal et un semi-conducteur (diode Schottky) [2].
- Transport et collection de charges : le transport de charges vers les électrodes est contrôlé par la mobilité des porteurs de ces charges. Celle-ci est affectée par la recombinaison des charges et les interactions avec les atomes et les charges du milieu. Le champ électrique résultant permet la collection des porteurs de charges sur leurs électrodes respectives (électrons sur la cathode et les trous sur l'anode).

I.3 Rayonnement solaire

Le soleil libère en permanence beaucoup d'énergie rayonnante sur le système solaire, la terre intercepte une petite fraction de l'énergie solaire rayonner dans l'espace, d'une moyenne de 1367 Watts par mètre carré au bord extérieur de l'atmosphère terrestre (la distance moyenne entre la terre et le soleil est de 150 millions de kilomètres). C'est ce qu'on appelle la constante solaire qui est égal à 1367 W/m² [3].

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m². Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m² [3].

I.4 Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont de fines tranches planes fabriquées à partir de matériaux appelés semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Plus de 90 % des cellules solaires fabriquées à l'heure actuelle sont en silicium, un semi-conducteur présentant à la fois les propriétés d'un métal et d'un isolant [4].

I.4.1 Principe de la conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité à travers la production et le transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière [5].

Tout rayonnement électromagnétique, y compris le rayonnement solaire, est composé de particules énergétiques appelées photons. Un photon est caractérisé par sa longueur d'onde et

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

donc son énergie exprimée par la relation suivante :

Où h est la constante de Plank, c est la célérité de la lumière et λ est la longueur d'onde du photon.

Cette énergie peut être transmise, réfléchié ou absorbée lorsque le photon rencontre un matériau.

Le rayonnement lumineux composé de plusieurs couleurs (photons d'énergies différentes) aura donc une plage de longueurs d'onde. Par conséquent, une partie du spectre lumineux sera transmise, une partie réfléchié et une autre partie absorbée.

Lorsque la lumière rencontrera un matériau, la partie réfléchié dépend des matériaux traversés. Le silicium, par exemple, a un coefficient de réflexion compris entre 0.25 et 0.36, s'il était en contact direct avec l'air. Plusieurs couches, d'indices intermédiaires, sont placées entre l'air et le silicium pour diminuer la partie réfléchié du rayonnement incident.

D'autre part, la partie absorbée est celle qui permettra la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. La lumière est absorbée par le matériau suivant la loi de Beer-Lambert :

$$E = E_{inc} \times e^{(-\alpha d)} \quad (I.2)$$

Où E_{inc} représente l'intensité lumineuse incidente (W / m^2), α le coefficient d'absorption et d l'épaisseur traversée. Le coefficient d'absorption dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente.

Et enfin, la partie transmise correspond aux photons qui traversent le matériau sans interaction, leur énergie étant trop faible, le matériau est transparent pour ces photons. Nous nous intéresserons tout particulièrement au phénomène d'absorption car c'est grâce à lui qu'une partie du flux lumineux sera restituée sous forme d'électricité.

Pour l'absorption de la lumière, on va s'intéresser à une caractéristique importante du matériau qui est son gap. C'est l'écart entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction d'un matériau. La bande de valence est présumée être entièrement occupée par des électrons et la bande de conduction entièrement vide.

Lorsque l'énergie du photon ($h\nu$) est inférieure à celle du gap du matériau (E_g), la transition n'est pas possible et le photon n'est pas absorbé. L'interaction photon/semi-conducteur, dans le cas d'un photon suffisamment énergétique ($h\nu \geq E_g$), se traduit par la génération d'une paire électron-trou.

Le fait de créer des paires électron-trou ne suffit pas pour générer de l'électricité car celles-ci peuvent se recombinaison naturellement provoquant uniquement de l'énergie thermique. Il faut séparer les charges pour qu'elles puissent circuler sans se recombinaison. Une solution est de créer un champ électrique dans le matériau. Pour cela, on dope une partie d'un semi-conducteur en atomes ayant un électron de valence supplémentaire par rapport à l'atome du semi-conducteur. Il y aura, dans cette partie de semi-conducteur, un excédent de charges négatives. Cette partie sera par conséquent donneuse d'électrons. On dit qu'elle est dopée de type *N*. Une autre partie de semi-conducteur sera dopée en atomes ayant un électron de valence de moins que l'atome du matériau semi-conducteur. Il y aura cette fois un excédent de charges positives. Le matériau deviendra alors accepteur d'électrons. On dit qu'il est dopé de type *P*. La mise en contact de ces deux zones constitue une jonction *P-N* et provoque un champ électrique.

I.4.2 Différentes technologies des cellules solaires

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement [6].

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou polycristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couches minces à base de silicium amorphe ou *CIS* (Cuivre Indium Sélénium) [6].

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique [7]. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque siliciums détaillés ci-après ; d'une part les cellules à base de silicium massif (monocristallin, polycristallin et rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés.

I.4.2.1 Cellules à base du silicium monocristallin

Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal (wafer ou tranche de silicium). Après divers traitement (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction *P-N*, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs) le wafer devient une cellule.

1.4.2.2 Cellules à base du silicium polycristallin

La majorité des modules photovoltaïques sont à base de silicium polycristallin (poly c-Si), plus souvent appelé silicium multi cristallin (mc-Si). L'intérêt du silicium multi cristallin est au niveau de coûts de production plus faibles, du fait de l'utilisation de procédés de coulage des lingots en blocs, beaucoup plus rapides et moins coûteux en énergie que dans le cas de la synthèse de monocristaux (24 à 48 h contre quelques semaines pour ces derniers) [7].

1.4.2.3 Silicium en couches minces

Le silicium amorphe est un semi-conducteur ayant d'excellentes propriétés optiques, mais de faibles propriétés électroniques, ce qui mène à des rendements modules dans l'industrie assez faible, de l'ordre de 6 à 8% (avec un record cellule en laboratoire de 13.4%). Le processus de fabrication présente en revanche des coûts peu onéreux. Les principales différences avec les cellules cristallines reviennent au fait que les couches minces de silicium amorphe ont besoin de support pour leur tenue mécanique et qu'elles ne peuvent pas être basées sur une simple jonction *P-N*.

1.5 Modélisation du générateur photovoltaïque

Pour établir le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source constituée d'un ensemble de panneaux montés en série-parallèle (eux-mêmes constituées de cellules solaire montées en série-parallèle). De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour simuler la caractéristique courant-tension d'un module solaire (ou d'une cellule solaire) [8]. Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de cette caractéristique. Dans notre travail, nous avons retenu deux modèles celui à une diode qui est d'une bonne précision et celui à deux diodes [9].

Le passage d'un modèle de cellule solaire à celui d'un panneau se fait par une simple multiplication du courant par le nombre de bandes en parallèle et de la tension par le nombre de cellules en série.

1.5.1 Modèle à une diode d'un module photovoltaïque

Le schéma équivalent d'un module photovoltaïque réel doit tenir compte des effets résistifs. Dans ce cas, ce schéma équivalent (voir figure I.2) est constitué d'une diode (*D*), une

source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunt (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [10].

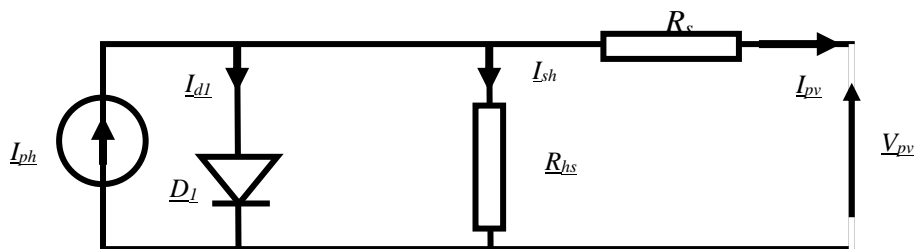


Figure I.2 Schéma équivalent d'un module PV : Modèle à une diode

$$I_{pv} = I_{SC}(1 - K_1(e^{K_2 \times V_{pv}^m} - 1)) \quad (I.3)$$

Le courant photovoltaïque est exprimé par :

Dans cette équation, le photo-courant I_{pv} dépend des paramètres K_1 , K_2 , m et de la tension aux bornes du module PV. Les coefficients K_2 , K_3 et K_4 sont donnés par les équations

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{CO}^m} \quad (I.4)$$

$$K_3 = \ln \left(\frac{I_{CC}(1+K_1) - I_{ppm}}{K_1 \times I_{CC}} \right) \quad (I.5)$$

$$K_4 = \ln \left(\frac{1 + K_1}{K_1} \right) \quad (I.6)$$

$$m = \frac{\ln \left(\frac{K_3}{K_4} \right)}{\ln \left(\frac{V_{ppm}}{V_{CO}} \right)} \quad (I.7)$$

suivantes :

Avec :

$$K_1 = 0.01175;$$

I_{ppm} est le courant au point de puissance maximal ;

V_{ppm} est la tension au point de puissance maximal ;

I_{CC} est le courant de court-circuit ;

V_{CO} est la tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (I.3) est applicable seulement dans les conditions standard de fonctionnement (un éclairement $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et une température $T = 25^\circ\text{C}$). Quand la température et l'ensoleillement changent, le courant et la tension du module *PV* changent

$$\Delta T_S = T_c - T_{stc} \quad (\text{I.8})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) \cdot I_{cc,stc} \quad (\text{I.9})$$

$$\Delta v_{pv} = -\beta_{oc} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad (\text{I.10})$$

$$v_{nouv,pv} = v_{pv,stc} + \Delta v_{pv} \quad (\text{I.11})$$

$$I_{nouv,pv} = I_{pv,stc} + \Delta I_{pv} \quad (\text{I.12})$$

selon les équations suivantes :

Où : G_{stc} , T_{stc} représentent respectivement le niveau d'éclairement et la température dans les conditions standards de fonctionnement ;

G , T_c représentent respectivement le niveau de l'éclairement et la température dans des conditions quelconques ;

ΔT_c représente la variation de la température ;

Δv_{pv} , ΔI_{pv} représentent respectivement la variation de la tension et du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température ;

α_{sc} représente le coefficient d'incrémentatation du courant ;

β_{oc} représente le coefficient d'incrémentatation de la tension.

I.5.2 Modèle d'un module photovoltaïque à deux diodes

Dans ce cas, le module photovoltaïque est représenté par le circuit électrique de la Figure I.6 qui est composé d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation des cellules, une résistance shunt et une résistance série.

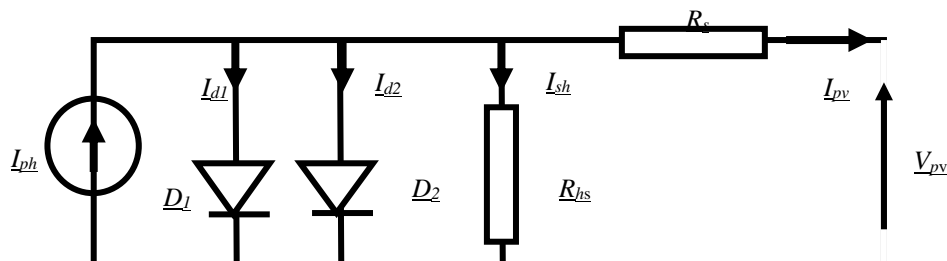


Figure I.3 Schéma équivalent d'un module *PV* : Modèle à deux diodes

D'après le schéma de la figure I.6, on peut déduire l'équation caractérisant la variation du courant en fonction de la tension à l'aide des lois de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \quad (\text{I.13})$$

Avec :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \times \left(e^{\frac{q \times (V_{pv} + R_s \times I_{ph})}{AKT}} - 1 \right) - I_{02} \times \left(e^{\frac{q \times (V_{pv} + R_s \times I_{ph})}{AKT}} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + R_s \times I_{ph})}{AKT} \quad (\text{I.14})$$

Où : I_{01} est le courant de saturation de la diode 1 ;

I_{02} est le courant de saturation de la diode 2 ;

q est la charge électrique élémentaire qui est égale à 1.6×10^{-19} C ;

K est la constante de Boltzmann ($K = 1.3854 \times 10^{-23}$ J/°K) ;

A est le facteur de qualité de la diode ;

(KT/q) est le potentiel thermique ;

I_{ph} est le courant photonique de la diode.

I.6 Caractéristiques des modules photovoltaïques

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation. La figure I.4 montre les courbes caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module solaire de type SunPower SPR-305E-WHT-D dans les conditions standard de fonctionnement.

Les paramètres de ce module PV (SunPower SPR-305E-WHT-D) sont résumés dans le tableau A.1 de l'annexe.

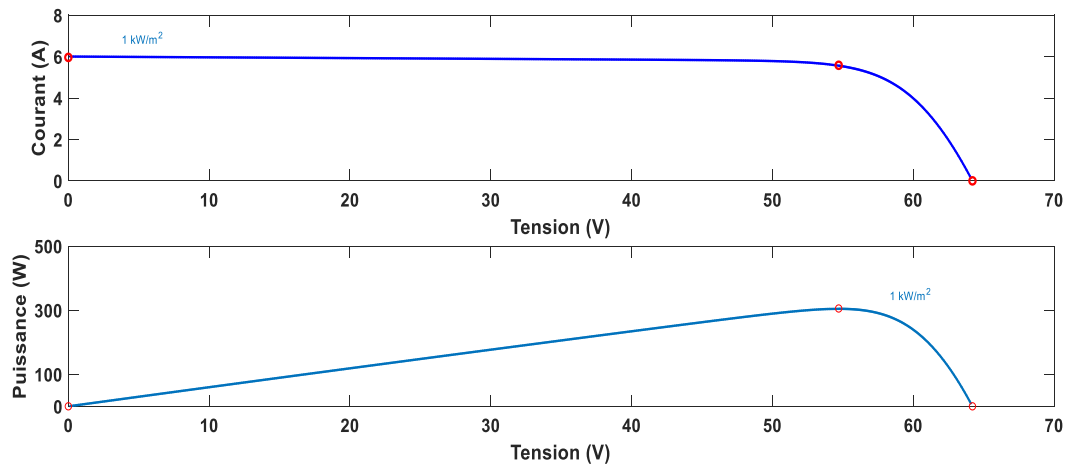


Figure I.4 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un module PV pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ °C}$

I.6.1 Influence de l'irradiation sur les caractéristiques des modules PV

L'augmentation de l'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique I_{pv} (V_{pv}) suivant l'axe des courants. L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique.

La figure I.5 montre bien la variation du courant (I_{pv}) ainsi que la puissance (P_{pv}) en fonction de la tension (V_{pv}) pour différents niveaux d'éclairement et une température constante ($T=25 \text{ °C}$) du modèle SunPower SPR-305E-WHT-D.

En effet, d'après la caractéristique (Courant-Tension), on remarque une forte diminution du courant de court-circuit et une faible diminution de la tension du circuit ouvert lorsque l'éclairement diminue.

On déduit aussi, d'après la caractéristique (Puissance-Tension) que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert d'un générateur photovoltaïque.

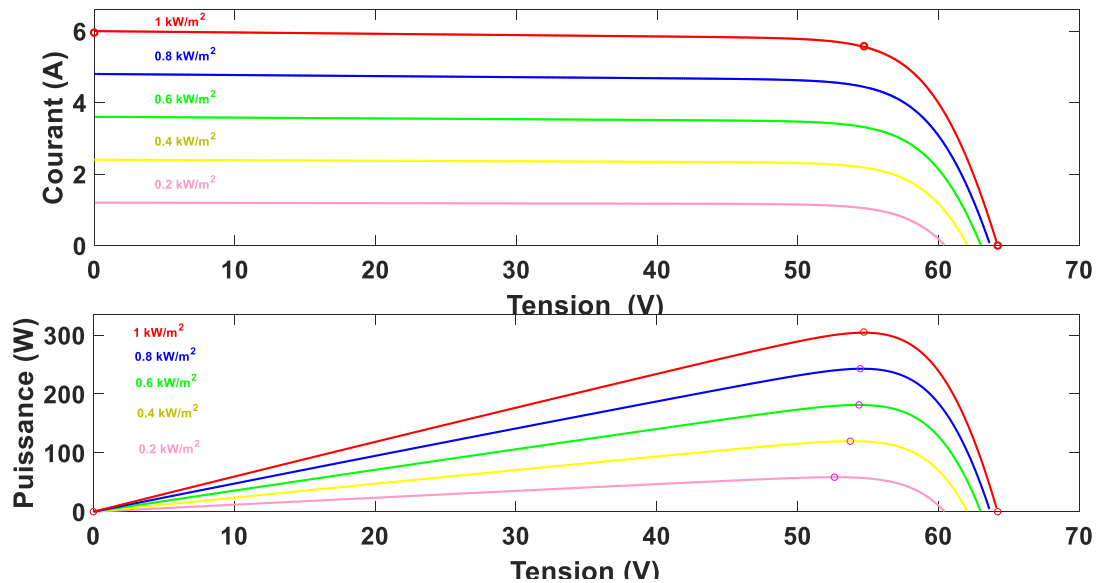


Figure I.5 Caractéristique puissance-tension et courant-tension d'un module *PV* pour différents éclairagements

I.6.2 Influence de la température sur les caractéristiques des modules *PV*

La figure I.6 montre bien la variation du courant (I_{pv}) ainsi que la puissance (P_{pv}) en fonction de la tension (V_{pv}) du module SunPower SPR-305E-WHT-D pour différents niveaux de température, et pour un ensoleillement constant ($G=1000 \text{ W/m}^2$).

On constate d'après la caractéristique (courant-tension) que l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert, contrairement au courant de court-circuit qui reste inchangé. Et d'après la caractéristique (puissance-tension), on note que l'augmentation de la température fait diminuer la puissance et la tension du circuit ouvert du module *PV*.

Si la température de la cellule augmente, le photo-courant I_{ph} augmente également, et cela est dû principalement à la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Cette augmentation est de l'ordre de 0.01% par degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Le courant direct de la jonction augmente aussi, mais beaucoup plus vite entraînant une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 mV par cellule. La diminution de la puissance fournie est estimée à environ de 0.5 % par degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

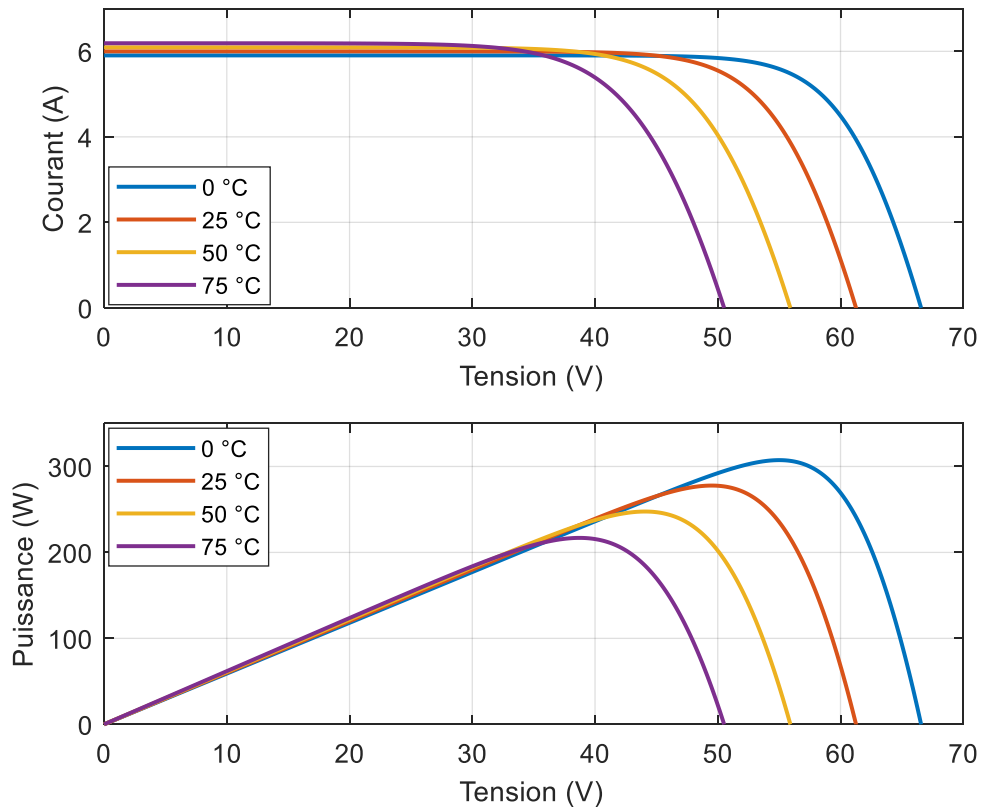


Figure I. 6 Caractéristique courant-tension et puissance-tension pour différents niveaux de température d'un module

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une étude concernant l'énergie solaire photovoltaïque, où nous avons brièvement discuté de son historique et du principe de conversion *PV*. Nous avons également défini la cellule photovoltaïque, ses types et son principe de fonctionnement. Et nous avons aussi présenté les modèles et les caractéristiques des modules photovoltaïques ainsi que les paramètres essentiels les caractérisant. Enfin, nous avons modélisé un générateur photovoltaïque (*GPV*) en préparation du chapitre suivant, qui concerne la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque.

Chapitre II
Modélisation et Commande
d'une Chaîne de Conversion
Photovoltaïque

II.1 Introduction

Dans un système *PV* le conditionneur de puissance est un dispositif électronique servant à transformer la tension continue fournie par le *GPV* ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant sous une tension continue ou alternative. Deux types différents de conditionneur peuvent être placés entre un générateur photovoltaïque et une charge à courant alternatif :

- Un conditionneur de puissance constitue d'un onduleur et permettant un couplage direct entre le *GPV* et la charge. Dans ce cas, on ne peut pas stabiliser la tension du bus continu tout en assurant un fonctionnement ou point maximum de puissance ;
- Un conditionneur de puissance compose d'un hacheur survolteur (permettant un fonctionnement du *GPV* au point à maximum de puissance) et un onduleur (qui permet une commande découplée des puissances à injecter au réseau).

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la deuxième variante du conditionneur de puissance, ou nous présenterons les deux blocs de puissance et de commande.

Cette variante peut être remplacée par un conditionneur de puissance à base d'un seul convertisseur qui assure les deux tâches à la fois (l'onduleur à source d'impédance) que nous allons étudier au troisième chapitre.

II.2 Constitution de chaîne de la puissance du système photovoltaïque étudié

L'énergie tirée du soleil doit passer par plusieurs étapes pour que nous puissions l'exploiter dans notre vie quotidienne, à commencer par le générateur photovoltaïque, et on sait que ce dernier génère une faible énergie continue, il faut donc faire monter cette énergie à travers l'hacheur survolteur, mais notre réseau prend uniquement en charge le signal alternatif, et par conséquent, le dernier arrêt est l'onduleur, la figure II.1 suivante montre cette chaîne.

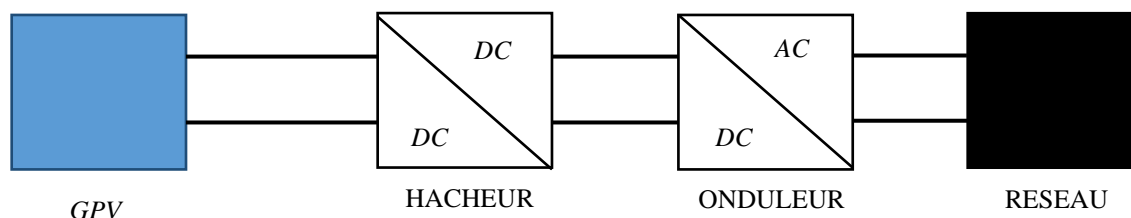


Figure II.1 Chaîne de puissance du système *PV* étudié

II.3 Modèle du générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque (*GPV*) est constitué d'un ensemble de modules solaire mis en série appeler strings, pour renforcer ou booster la tension, ceux-ci sont mis en parallèle sous forme de branches pour augmenter le courant.

C'est pourquoi, le modèle d'un générateur photovoltaïque est peut-être déduit du modèle d'un module photovoltaïque en multipliant le courant par le nombre de branches en parallèle et en multipliant la tension par le nombre de modules mis en série.

On peut écrire alors :

$$V_{GPV} = N_S \times V_{PV} \quad (\text{II.1})$$

$$I_{GPV} = N_P \times I_{PV} \quad (\text{II.2})$$

Où N_S est le nombre de modules en série par 'string' et N_P est le nombre de branches en parallèle.

De plus, (V_{PV}, I_{PV}) et (V_{GPV}, I_{GPV}) sont respectivement la tension et le courant du module et de *GPV*.

II.4 Modélisation et commande du convertisseur *DC/DC*

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe ou variable, permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues avec une tension dans le cas d'un système photovoltaïque [11].

II.4.1 Types des hacheurs

Il existe plusieurs topologies du convertisseur *DC-DC*, qu'on peut classer par catégories (isolée ou non isolée). Les topologies d'isolation fonctionnent à des fréquences élevées. Elles sont souvent utilisées dans les alimentations à découpage. En revanche, les topologies non isolées n'incluent pas les transformateurs d'isolement, elles comprennent :

- Les hacheurs abaisseurs (ou buck) ;
- Les hacheurs élévateurs (ou boost) ;
- Et les hacheurs élévateur-abaisseur (ou buck-boost).

Ces types de convertisseurs sont utilisés dans les variateurs de vitesse variable à courant continu (unités de traction, trains électriques..., etc.) et dans les applications photovoltaïques. Dans le system *PV* étudié, un hacheur boost a été utilisé car il assure la continuité de la connexion entre le réseau et la source *PV*, tout en ajustant la tension de l'étage continu ce qui permet un en mode *MPPT*.

II.4.2 Modélisation de l'hacheur *boost*

L'hacheur boost présenté dans la figure II.2, comporte un condensateur et une bobine d'inductance pour le stockage d'énergie, et deux commutateurs complémentaires. Dans ce, la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Les interrupteurs sont ouverts et fermés alternativement avec un taux (rapport cyclique) de la période de commutation. Tant que le transistor est à l'état *ON*, la diode est bloquée. La tension d'entrée est appliquée directement à l'inductance *L*. Et lorsque le transistor est bloqué, la charge est alimentée par la source d'entrée via le filtre *LC*.

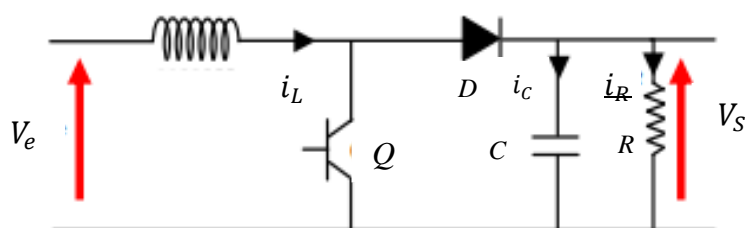


Figure II.2 Schéma d'un hacheur *boost*

Dans ce qui suit, nous allons étudier les deux séquences de fonctionnement de ce convertisseur sur une période de commutation *T* ou *D* est le rapport cyclique.

La première séquence ($0 < t < DT$) : Le transistor est à l'état *ON* et la diode est à l'état *OFF*.

Durant cette période, (le schéma équivalent du circuit est représenté ci-dessous), l'inductance stocker l'énergie.

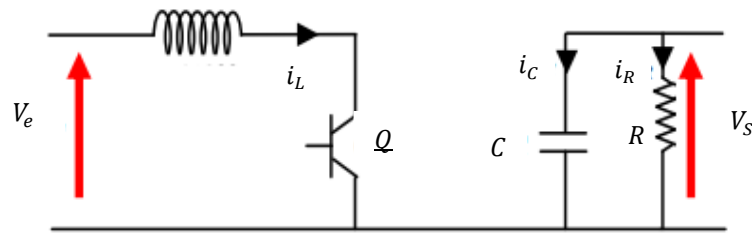


Figure II.3 Schéma de l'hacheur *boost* pendant la première séquence de fonctionnement

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Deuxième période ($DT < t < T$) : Dans ce cas le transistor est à l'état *OFF* et la diode est à l'état *ON*.

Au moment où le transistor est à l'état *OFF*, la tension aux bornes de l'inductance va changer de polarité et la diode deviendra passante (à l'état *ON*). Le schéma équivalent du convertisseur au cours de cette période est indiqué dans la figure ci-dessous :

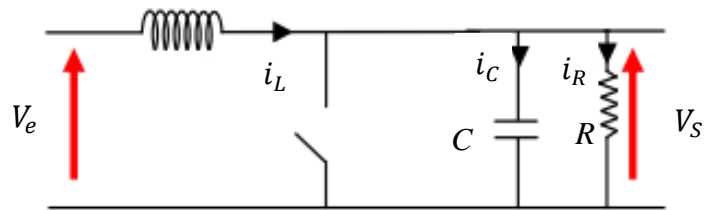


Figure II.4 Schéma de l'hacheur *boost* pendant la deuxième séquence de fonctionnement

Dans ce cas, la tension de sortie et le courant dans l'inductance sont régis par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e - V_c) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

À partir des équations précédentes on obtient le modèle moyen de ce convertisseur conduction continue :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_e - (1 - D) \frac{1}{L} V_c \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left((1 - D) i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

II.4.3 Poursuite du point à maximum de puissance

C'est une technique de commande permettant de tirer le maximum d'énergie d'une installation solaire photovoltaïque.

Un régulateur de poursuite du point à maximum de puissance [*MPPT* : *Maximum Power Point Tracking*] permet d'augmenter le rendement d'un système *PV* de 30% par rapport à un régulateur solaire classique [12].

Un suiveur *MPPT* est utilisé pour la commande de l'hacheur. Cette technique a été développée depuis 1968 et elle a eu un rôle essentiel pour le fonctionnement des systèmes *PV*.

Le principe de cette commande est de faire varier le rapport cyclique D automatiquement jusqu'à ce que l'on obtienne la valeur optimale qui maximise la puissance délivrée par le système *PV*. Ainsi quelles que soient les conditions météorologiques (T et G), cette commande place le système au point de fonctionnement à puissance maximale (V_{mpp} , I_{mpp}) [13].

II.4.3.1 Techniques de recherche du point de puissance maximale

De nombreuses recherches ont été développées concernant les différents algorithmes de suivi du point de puissance maximale (*MPP*) tenant compte des variations des paramètres du système et/ou des changements climatiques. Le schéma fonctionnel de la figure II.5 présente un générateur *PV* avec *MPPT*.

Ce problème de poursuite fait, jusqu'à nos jours, l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées pour assurer une commande *MPPT*. Nous citons :

- La méthode de conductance Incrémentale (*IC* : *Incremental Conductance*) ;
- La méthode de perturbation et observation (*PO* : *Perturb and Observe*).

Dans cette section, nous allons présenter l'aspect théorique de l'une de ces méthodes de suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque à savoir la méthode *IC* que nous avons utilisée dans ce travail.

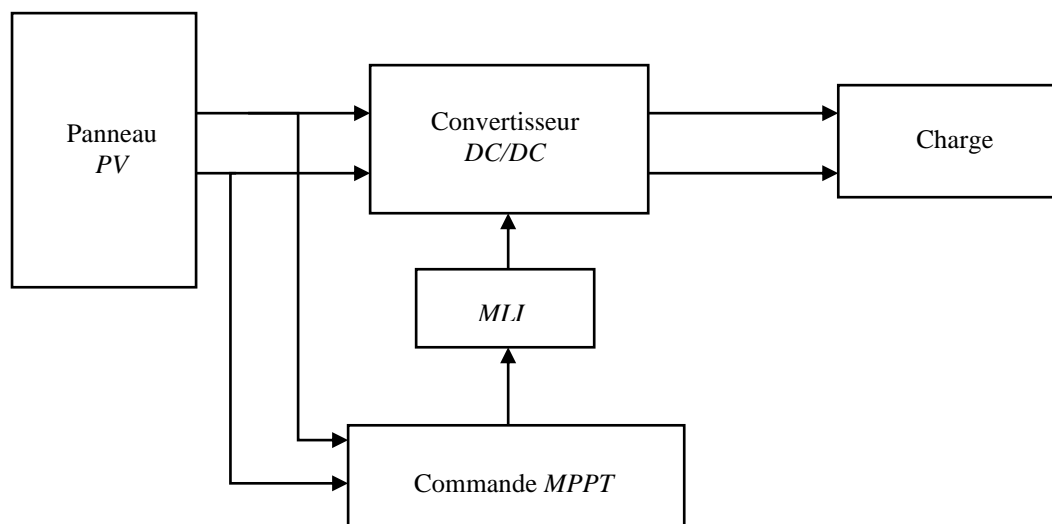


Figure II.5 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque muni d'une commande *MPPT*

II.4.3.2 Technique de la conductance incrémentale

Dans la méthode de la conductance incrémentale, la tension aux bornes du *GPV* est toujours ajustée en fonction de la tension *MPP*. Elle est basée sur la conductance incrémentale et instantanée du générateur *PV*.

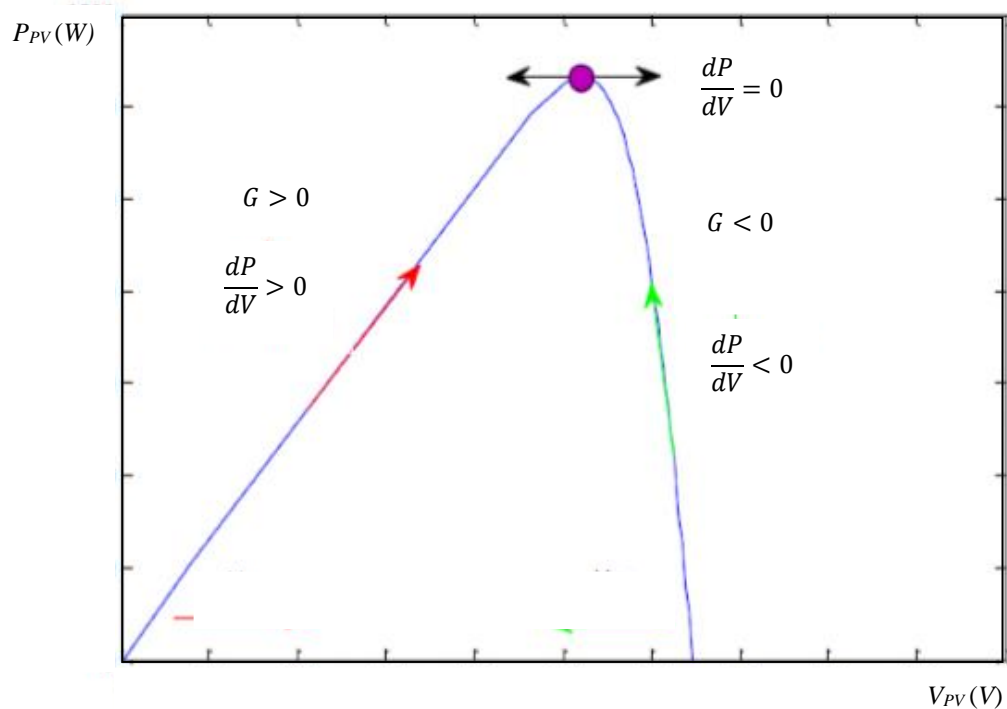


Figure II.6 Principe de la méthode *MPPT-IC*

Cette méthode permet de chercher le point à maximum de puissance dont la dérivée de puissance est nulle. De la figure précédente, en comparant la conductance ($G = \frac{I}{V}$) à la conductance incrémentale. Précisément, la puissance à la sortie de la source *PV* peut s'écrire :

$$P = V \times I \quad (\text{II.6})$$

En dérivant, on peut écrire :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + \frac{dV}{dV} \times I$$

Ce qui donne : (II.7)

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + I$$

Alors :

$$\text{Au point du MPP } \frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{donc} \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad (a)$$

$$\text{A gauche du MPP } \frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{donc} \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad (b) \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Et à droite du MPP } \frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{donc} \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad (c)$$

Les deux équations (b) et (c) de II.8, sont employées pour déterminer la direction à prendre pour localiser le point de fonctionnement *MPP*.

À partir des équations (II.8), l'algorithme de *MPPT-IC* peut être représenté par l'organigramme suivant :

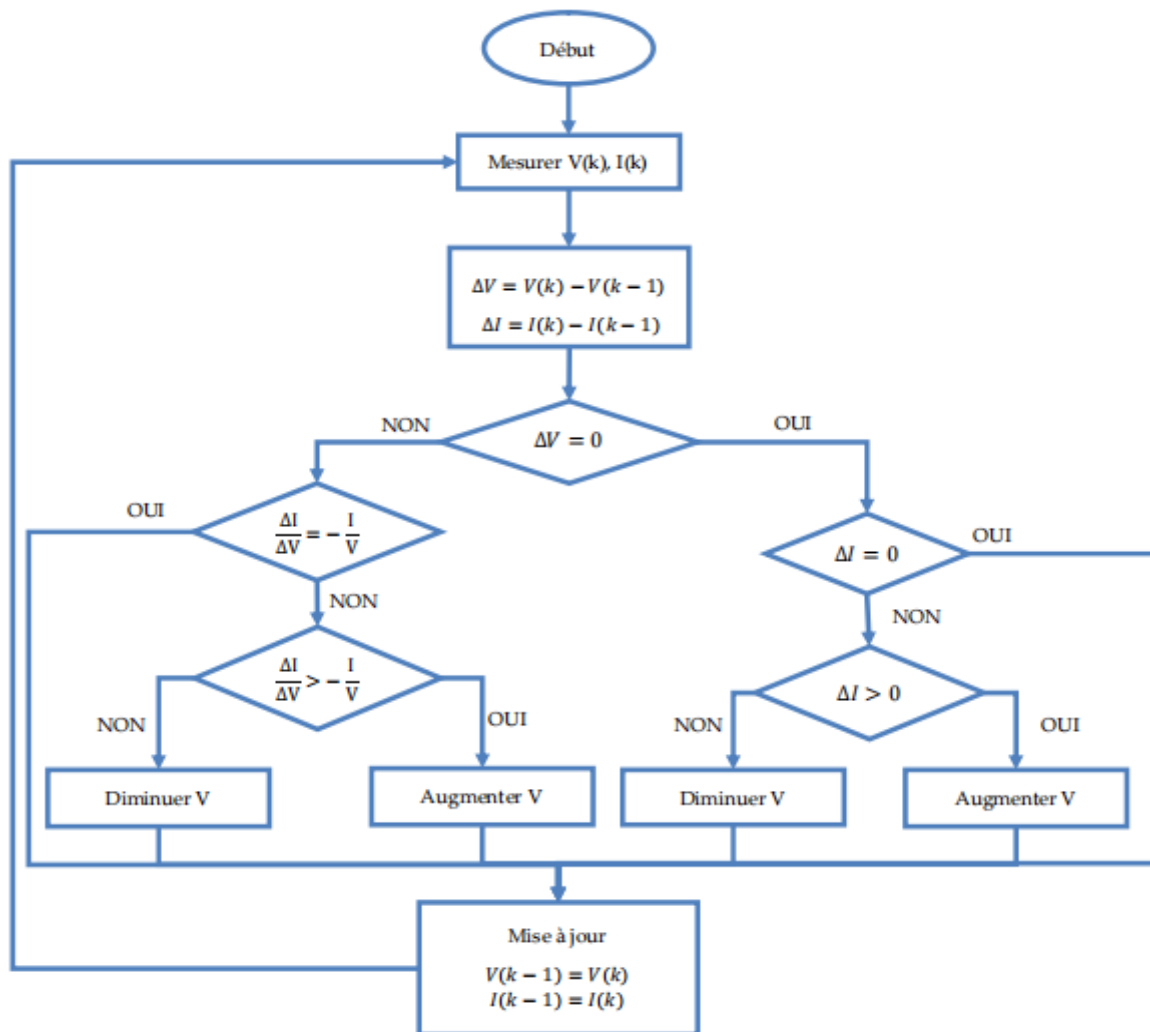


Figure II.7 Organigramme de la méthode MPPT-IC

II.5 Modélisation et commande du convertisseur DC/AC

Les convertisseurs *DC/AC* permettent aux alimentations *DC* de s'adapter aux charges *AC*. Dans le cas des systèmes *PV* de puissance, ces convertisseurs sont des onduleurs triphasés à *MLI* constitués de transistors *IGBT*.

Dans cette section, nous allons présenter la modélisation et la commande d'un convertisseur *DC-AC* (onduleur) qui est l'élément clé du conditionneur de puissance du système *PV* étudié.

II.5.1 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux

La plupart des onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent de transistors de type *IGBT* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Le choix de ce type de composant relève,

d'une part de sa particularité à pouvoir commuter de très grandes valeurs de courant et tension à des fréquences de découpage de plusieurs dizaines de kHz et d'autre part, parce qu'il permet la suppression de tous les circuits d'aide à la commutation des montages à thyristors [14].

L'onduleur de tension triphasé est composé de trois cellules de commutations C_1 , C_2 et C_3 , le total donne six interrupteurs. Chaque cellule comporte deux interrupteurs K_{11} et K_{21} pour la cellule C_1 , K_{12} et K_{22} pour la cellule C_2 , K_{13} et K_{23} pour la cellule C_3 . Le schéma de l'onduleur de tension triphasé raccordé au réseau électrique est le suivant [15].

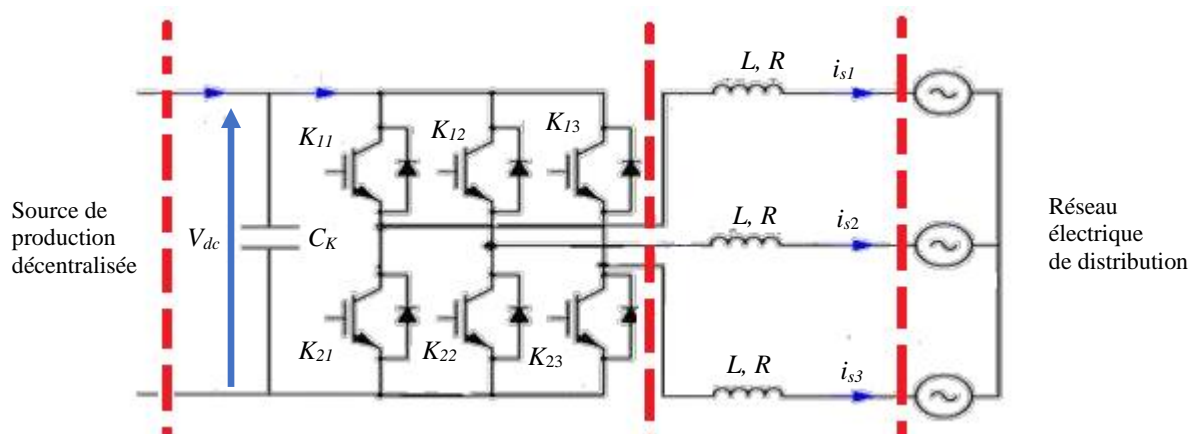


Figure II.8 Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux raccordés au réseau

Cet onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique. Les états des interrupteurs peuvent être définis par trois grandeurs booléennes de commande S_i avec $i \in \{a, b, c\}$

- Si le transistor supérieur est en conduction, les variables $S_i = 1$;
- Si le transistor inférieur est en conduction, les variables $S_i = 0$;

Les tensions de sortie de l'onduleur peuvent être exprimées par les équations suivantes :

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.9})$$

II.5.2 Modélisation de l'onduleur triphasé à trois niveaux

L'onduleur triphasé à trois niveaux est constitué de trois bras et de deux sources de tension continue. Chaque bras comporte quatre interrupteurs en série et deux diodes

médianes. Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche [16].

Les deux sources d'alimentation peuvent être remplacées par une seule source munie d'un demi-pont capacitif constitué de deux condensateurs.

La figure (II.9) fournit une représentation schématique d'un bras de cet onduleur :

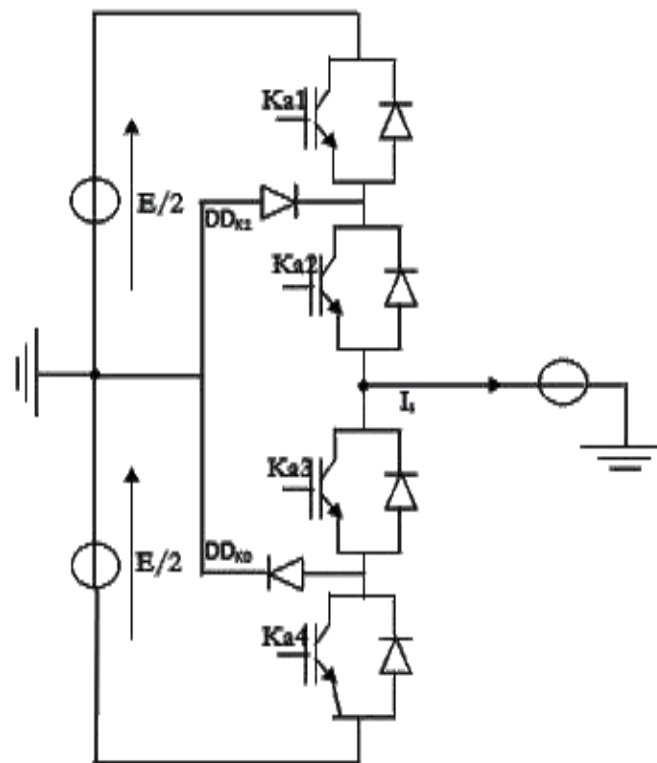


Figure II.9 Schéma d'un bras de l'onduleur à trois niveaux de type NPC

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne (a) de la charge et le point neutre O . Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} et K_{a4} du bras.

L'onduleur à trois niveaux étant symétrique, l'étude peut se limiter au fonctionnement d'un bras (où on distingue trois configurations possibles).

On donne ci-dessous un tableau récapitulatif qui représente la tension de sortie V_{ao} d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction des états des quatre interrupteurs. La tension aux bornes des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié de la tension du bus d'entrée [17].

A la différence de l'onduleur à deux niveaux, chaque demi-bras de l'onduleur possède trois niveaux de tension délivrés par la fermeture de deux interrupteurs [18].

Tableau (II.1) Configurations d'un bras de l'onduleur NPC à trois niveaux

Etat des interrupteurs				Tension de sortie
K_{a1}	K_{a2}	K_{a3}	K_{a4}	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

Par la suite, on symbolisera ces différents états par la notation 1, 0 ou -1 correspondant respectivement aux niveaux de tension $E/2$, 0 et $-E/2$.

Ainsi, les transitions de ce bras entre l'état 1 et l'état 0 s'effectuent par commutation entre les interrupteurs K_{a1} et K_{a3} , avec K_{a2} toujours fermé et K_{a4} toujours ouvert. De la même manière, les transitions entre l'état 0 et l'état -1 s'effectuent par commutation entre les interrupteurs K_{a2} et K_{a4} , avec K_{a1} ouvert et K_{a3} fermé. Chacun des trois bras de l'onduleur pouvant prendre indépendamment les trois états 1, 0 ou -1.

II.5.3 Commande d'un onduleur à MLI

La technique de commande à MLI consiste à reproduire un signal à fréquence constante en comparant un signal de référence avec un signal porteur triangulaire de fréquence plus élevée. Le signal de référence est le signal modulant, il détermine la forme d'onde de la tension de sortie. De nombreuses versions de cette méthode existent, avec des formes d'onde spéciales non sinusoïdales, avec lesquelles le niveau des harmoniques bien spécifiques peut être réduit. Nous nous intéressons à la technique de MLI la plus utilisée (MLI sinus-triangle)

II.5.3.1 Paramètres de la MLI sinus-triangle

Cette technique est caractérisée par le taux de modulation et l'indice de modulation. La largeur d'impulsion d'une technique MLI sinus-triangle dépend du ratio du signal de la référence au signal triangulaire (porteuse). Cette ration définit le taux de modulation :

$$M_a = \frac{A_r}{A_p} \quad (\text{II.10})$$

Où : A_r est l'amplitude du signal de référence ;

A_p est l'amplitude du signal de la porteuse (triangulaire).

On peut exprimer l'amplitude de la tension fondamentale de tension simple d'un onduleur par :

$$V_{an1} = M_a \frac{E}{2} \quad (\text{II.11})$$

La figure II.10 représente la dépendance de l'amplitude de composante fondamentale de tension de sortie au taux de modulation M_a .

Lorsque M_a varie de 0 à 1, V_{an1} varie linéairement en fonction du taux de modulation. La valeur limite de M_a est déterminée par la technique de modulation utilisée, selon laquelle la valeur maximale de V_{an1} est égale à $E/2$. Pour des valeurs de M_a supérieures à 1, V_{an1} augmente de façon non linéaire et se stabilise à la valeur maximale. Dans cette, région l'onduleur est dit en état de sur-modulation.

A partir de développement en série de Fourier de l'onde rectangulaire, l'amplitude maximale de la première harmonique de tension est :

$$V_{an1} = \frac{4}{\pi} \times \frac{E}{2} = \frac{2}{\pi} E \quad (\text{II.12})$$

La valeur de la rotation M_a qui correspond à la valeur maximale de V_{an1} est environ 3,2 [19] [20].

D'autre part, la fréquence f_p du signal de la porteuse triangulaire est généralement considérablement supérieure à la fréquence f_r du signal de modulation ou de référence. Le rapport de f_r et f_p est un paramètre très important de la commande *MLI* sinus-triangle.

Il est aussi désigné indice de modulation, est exprimé par :

$$M_f = f_p f_r \quad (\text{II.7})$$

Pour les petites valeurs de M_f , le signal de la porteuse et celui de la référence doivent être synchronisés, afin d'éliminer les subharmoniques indésirables dans la tension de sortie. Si ces signaux sont synchronisés, M_f est un nombre entier.

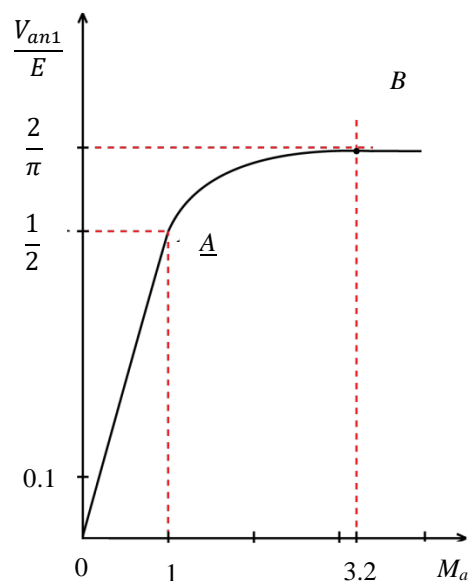


Figure II.10 Amplitude de la composante fondamentale de tension de sortie en fonction du taux de modulation

La valeur de M_f dépend de la fréquence du signal de référence et affecte de manière significative la performance de l'onduleur. En augmentant la fréquence, les pertes de commutation dans l'onduleur augmentent, mais le spectre de tension de sortie est amélioré et il est plus facile de filtrer les harmoniques de haute fréquence produit à cause de la modulation.

II.6 Présentation du bloc de commande du système PV étudié

Dans cette section, nous allons présenter et décrire le bloc de commande du système PV étudié où l'étage *DC-AC* du conditionneur de puissance est constitué d'un onduleur triphasé conventionnel (à deux niveaux).

Dans ce cas, le bloc de commande du système PV étudié est constitué de deux boucles internes de réglage des courants (actif et réactif) injectés au réseau. Il est à noter que la référence du courant réactif est choisie nulle, ceci suppose un fonctionnement à facteur de puissance unitaire du côté réseau ou encore une puissance réactive (injectée au réseau) nulle. Ces deux boucles délivrent les références des deux composantes de tension (d (active) et q (réactive)) qu'on transforme dans le repère abc pour calculer les références des tensions de l'onduleur à *MLI*.

Par ailleurs, la commande de la tension du bus continu de l'onduleurs est constituée d'une seule boucle externe qui règle la tension du bus continu issue du hacheur 'boost'. Cette boucle délivre à sa sortie la référence du courant actif injecté au réseau.

Tout d'abord voici l'expression des puissances active et réactive injectées au réseau dans le repère dq :

$$\begin{aligned} P_g &= \frac{3}{2} (V_d \times I_{dg} + V_q \times I_{qg}) \\ Q_g &= \frac{3}{2} (V_q \times I_d + V_d \times I_q) \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

L'orientation de la tension du réseau sur l'axe (d) du repère dq ($V_d=V_g$ et $V_q=0$), nous permet une commande découplée de la puissance active est réactive. En effet, P_g peut être réglée par I_d et Q_g par I_q .

Par ailleurs, nous avons les équations des tensions du côté alternatif du système PV dans le repère dq :

$$\begin{aligned} V_{ondd} &= R_{tot}I_{dg} - L_{tot} \frac{dI_d}{dt} - \omega L_{tot}I_{qg} + V_d \\ V_{ondq} &= R_{tot}I_{qg} + L_{tot} \frac{dI_q}{dt} + \omega L_{tot}I_{dg} + V_q \end{aligned} \quad (\text{II.15})$$

Où : $V_{ondd,q}$ sont les composantes des tensions de l'onduleur dans le repère dq ;

R_{tot} et L_{tot} sont respectivement la résistance et inductance totales et en série représentant le filtre, les lignes et le transformateur de couplage au réseau ;

ω est la pulsation du réseau.

Et comme la puissance moyenne à l'entrée du bus continu est égale à la puissance active échangée avec l'onduleur (c'est-à-dire le réseau), alors on peut régler la tension du bus continu V_{dc} en agissant sur la composante directe (I_d) du courant de la ligne.

Ainsi, le bloc de commande de l'onduleur triphasé conventionnel est présenté par la figure suivante :

Le bloc PLL (*Phase Locked Loop*) reçoit les trois tensions du réseau et permet de synchroniser la commande de l'onduleur avec la fréquence et la phase du réseau.

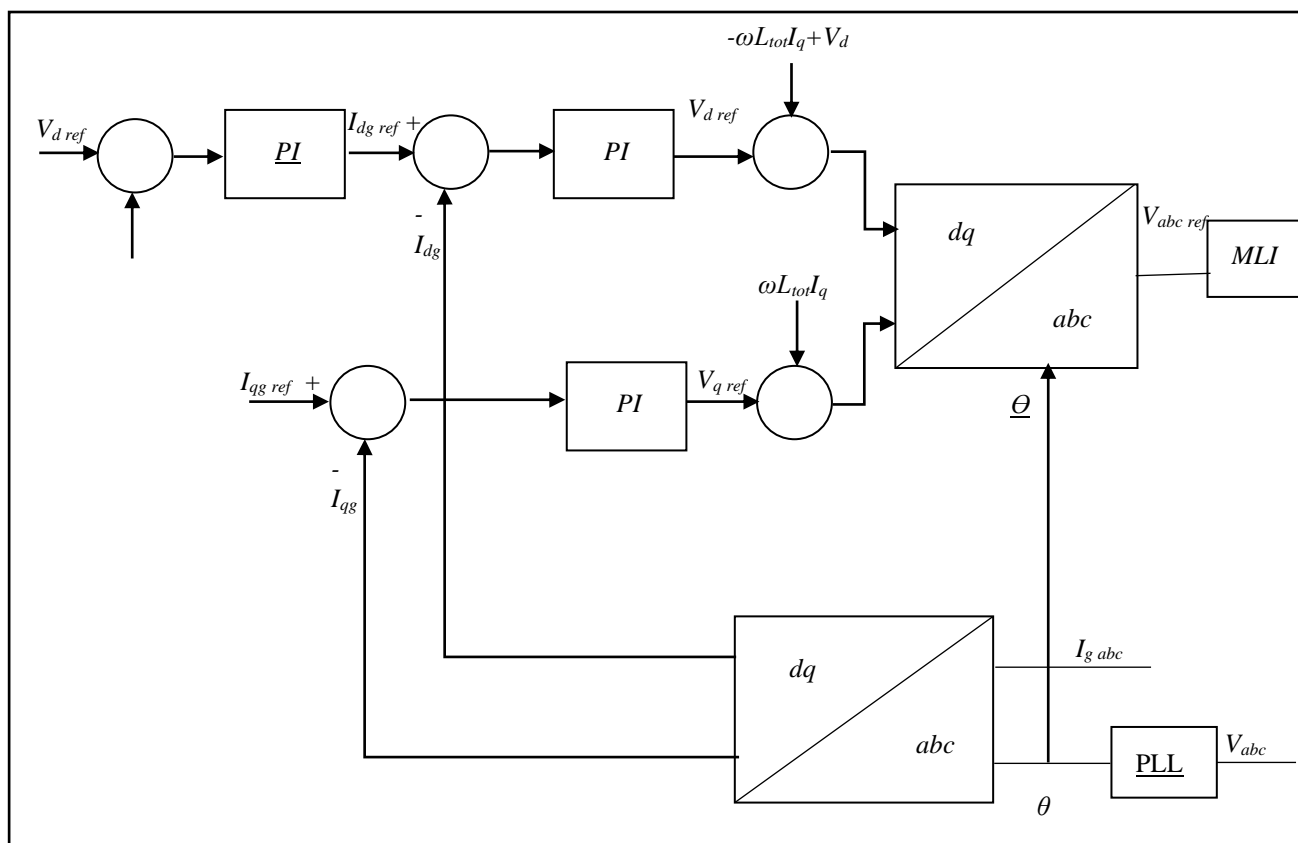


Figure II.11 Bloc de commande d'un onduleur triphasé conventionnel

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une chaîne de conversion photovoltaïque, où nous avons modélisé ces éléments (l'hacheur et l'onduleur) constituant le conditionneur de puissance. Nous avons également décrit la commande de ces deux convertisseurs : la *MPPT-IC* appliquée à l'hacheur pour exploiter la puissance maximale du *GPV*, et la commande de l'onduleur qui permet de gérer indirectement les puissances active et réactive à injecter au réseau.

Chapitre III

Onduleurs à Source

d'Impédance

III.1 Introduction

Les systèmes *PV* connectés aux réseaux sont composés d'un conditionneur de puissances à base de convertisseurs de l'électronique de puissances. On distingue plusieurs types de conditionneurs de puissances, parmi lesquels on cite ceux à deux étages composés d'un hacheur *boost* assurant un fonctionnement en mode *MPPT* et un onduleur garantissant une commande découplée de puissances injecter aux réseaux. On trouve également des conditionneurs de puissances à un seul étage à base d'un onduleur *Z-source* qui peut assurer les deux opérations à la fois.

L'onduleur à source d'impédance *Z* (ou encore *Z-source*) a été proposé pour la première fois en 2003 [21].

C'est une topologie de conversion de puissance *DC-AC* qui peut à la fois abaisser ou augmenter la tension. Il utilise un réseau d'impédance *LC* particulier 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 le cas des onduleurs conventionnels.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'onduleur à source d'impédance, son principe de fonctionnement, ses principales variantes et ses techniques de commande.

III.2 Conditionneurs de puissance d'un système photovoltaïque

Pour injecter l'énergie générée par les systèmes *PV* au réseau, on doit la conditionner par un ou plusieurs convertisseurs statiques assurant une conversion *DC-AC* tous en garantissant une synchronisation avec le réseau.

Un conditionneur de puissance à base d'un onduleur de tension à deux niveaux est généralement composé de deux convertisseurs. Chacun de ces deux convertisseurs nécessite sa propre commande : l'hacheur assure la commande *MPPT* et l'onduleur contrôle les puissances injectées au réseau.

Cette double opération peut être effectuée par un *PCS* à un seul étage composé d'un onduleur à source d'impédance (*Z-Source*).

III.2.1 Conditionneur de puissance à deux étages

Dans cette section nous allons nous intéresser à un conditionneur de puissance à deux étages constitué d'un hacheur et un onduleur.

III.2.1.1 Convertisseurs *DC-DC*

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits à courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Il existe plusieurs types de convertisseurs *DC-DC* (dévolteur, survolteur et mixte). On s'intéresse aux survolteurs (*boost*), dont celui-ci est largement utilisé dans les systèmes *PV* pour booster la tension du *GPV* et l'adapter à la tension du bus continu de l'onduleur voir la figure (III.1) [21].

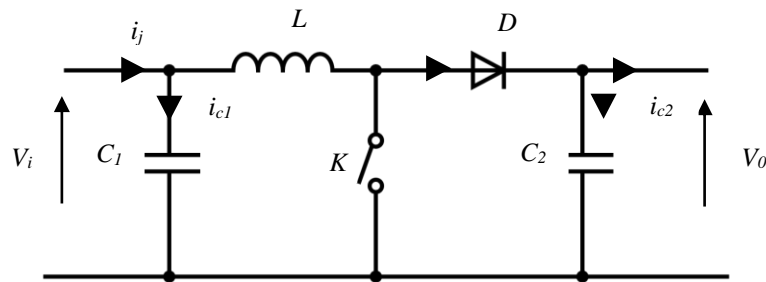


Figure III.1 Schéma du principe d'un convertisseur 'boost'

III.2.1.2 Convertisseurs *DC-AC*

Un onduleur est un convertisseur de l'électronique de puissance de type *DC/AC* qui transforme une tension ou un courant continu (*DC*) en une tension ou un courant alternatif de fréquence et amplitude variables.

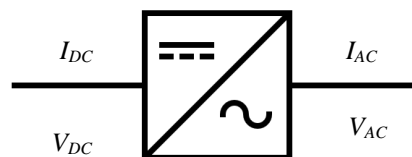


Figure III.2 Schéma fonctionnel général d'un convertisseur *DC-AC*

Il existe plusieurs types d'onduleur tels que l'onduleur de tension, de courant et à sources d'impédance (*Z-source*)

III.2.1.2.1 Onduleur de tension

L'onduleur de tension (*VSI*: Voltage Source Inverter) est un convertisseur pont (triphase) alimenté à partir d'une source de tension continue ou d'une source de tension alternative en cascade avec un redresseur à diodes, comme il est illustré par la figure (III.3).

Un condensateur de grande capacité est connecté aux bornes d'entrée de l'onduleur permet de stabiliser la tension continue d'entrée constante. Six commutateurs sont utilisés dans le circuit principal ; chacun est composé d'un transistor de puissance et d'une diode antiparallèle pour fournir un courant bidirectionnel et une capacité de blocage de tension unidirectionnelle [22].

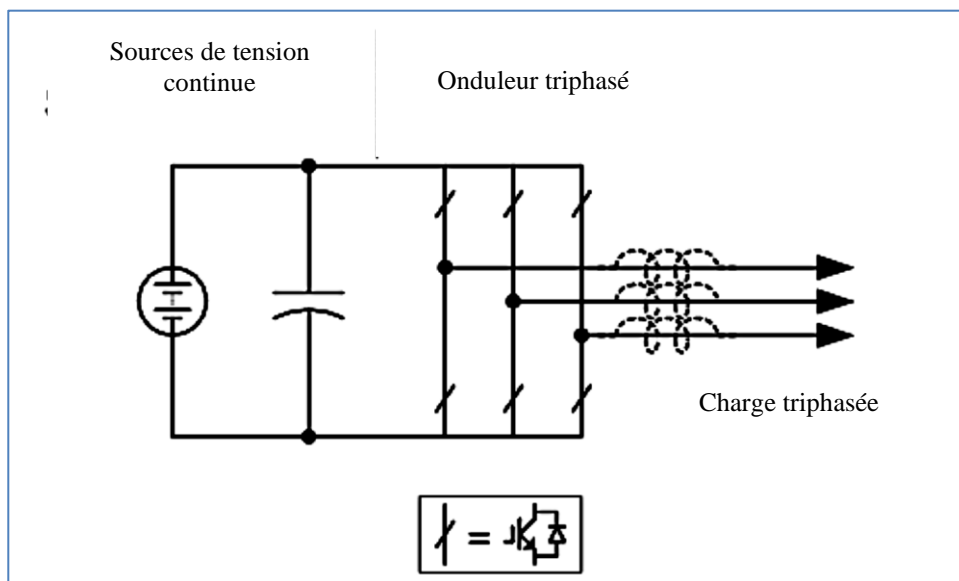


Figure III.3 Onduleur de tension triphasé

Ainsi, un conditionneur de puissance à base d'un onduleur de tension comporte généralement deux étages de fréquence de commutation élevée.

Le premier onduleur est un convertisseur *DC-AC* régulant la tension d'entrée et le deuxième étage est un onduleur à source de tension triphasée (voir figure III.4).

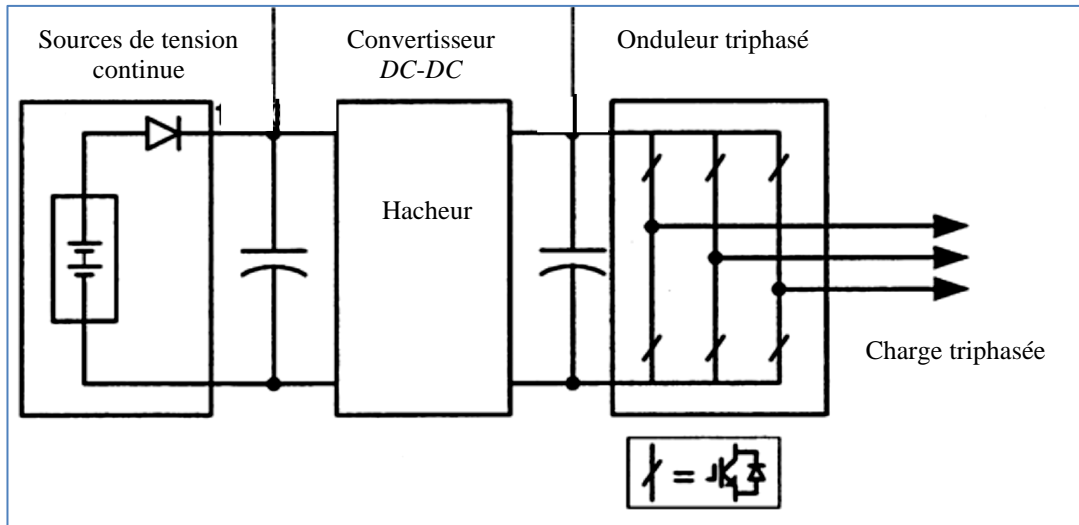


Figure III.4 Conditionneur de puissance traditionnel à deux étages

Configuration du conditionneur de puissance est caractérisée par :

- Une tension de sortie de l'onduleur qui ne peut pas dépasser la tension d'entrée *DC* ;
- Un convertisseur *DC-DC* est nécessaire pour augmenter la tension, ce qui augmente le coût et réduit l'efficacité globale du système ;
- Le court-circuit de l'un des bras de l'onduleur est destructif.

III.2.1.2.2 Onduleur de courant

Un onduleur à source de courant (*CSI* : Current Source Inverter) est un convertisseur en pont triphasé alimenté à partir d'une source de courant, c'est-à-dire une source de tension en série avec une grande inductance, comme il est illustré par la figure (III.5).

Six commutateurs sont utilisés, chacun est composé d'un transistor bipolaire à grille isolée (*IGBT*) ou d'un transistor à effet de champ semi-conducteur à oxyde métallique (*MOSFET*) avec une diode en série pour permettre une circulation de courant unidirectionnelle et un blocage de tension bidirectionnel. Contrairement au *VSI*, un *CSI* possède neuf états de commutation dont six états actifs et trois états nuls. De plus la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée [22]

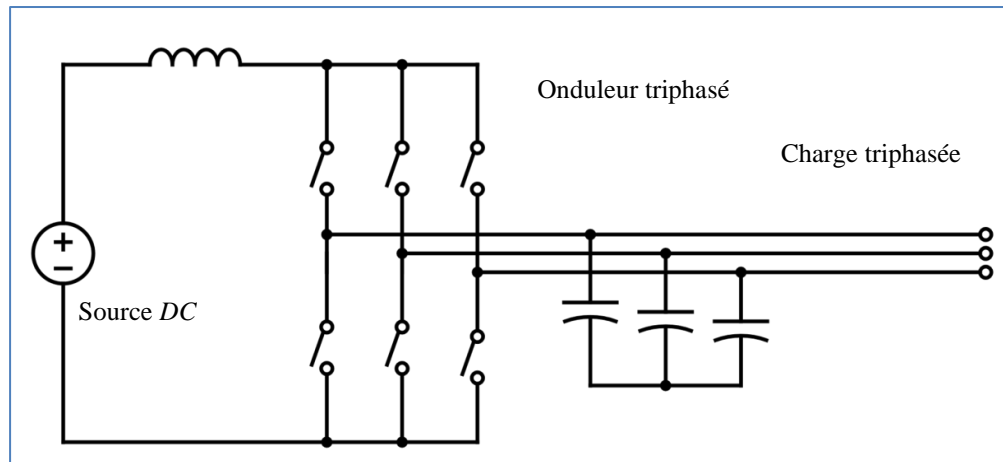


Figure III.5 Schéma d'un onduleur à source de courant

Cependant, un onduleur à source de courant présente les limitations conceptuelles et théoriques suivantes :

- Il s'agit d'un onduleur élévateur, c'est-à-dire que le courant alternatif de sortie est supérieur au courant d'entrée donc il ne peut pas être utilisé comme onduleur abaisseur ;
- Son coût est élevé ;
- Son facteur de puissance de fonctionnement est faible à la sortie du côté alternatif ;
- Il est vulnérable au bruit *EMI* en termes de fiabilité ;
- Sa réponse dynamique est lente.

III.2.2 Conditionneur de puissances à un étage à base d'un onduleur Z-source

Dans ce cas, le conditionneur est constitué d'un seul convertisseur *DC-AC* de type Z-Source. Cette configuration est une technologie innovante développée ces dernières années. C'est un nouveau type de convertisseurs en plus des deux autres types de convertisseurs *DC-AC* traditionnels : les convertisseurs onduleur à source de tension onduleur à source de courant.

Il utilise un réseau d'impédance spécifique pour coupler le circuit principal du convertisseur à la source d'alimentation. La figure (III.6) illustre la structure générale d'un onduleur Z-Source.

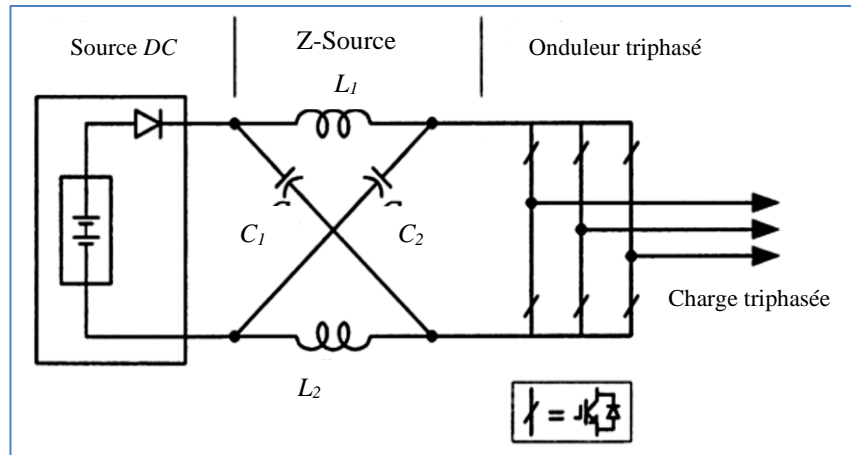


Figure III.6 Conditionneur de puissance à un étage à base d'un onduleur Z-Source

L'utilisation de ce type de convertisseur *DC-AC* est intéressante en raison de deux avantages spécifiques rajoutés à ceux d'un convertisseur à source de tension de base [23] :

- Possibilité de court-circuit d'un bras d'onduleur appelé fonctionnement en mode *shoot-through*, ce qui est interdit dans le cas des convertisseurs conventionnels ;
- Le réseau d'impédance en forme de *X* qui comprend deux paires de condensateurs et d'inductances, permet le maintien d'énergie pendant les séquences d'alimentation (or les séquences du *shoot-through*).

III.2.3 Comparaison entre les différents types d'onduleurs

Le tableau suivant récapitule une comparaison entre les trois variantes d'onduleurs présentées précédemment

Tableau III.1 Comparaisons entre les onduleurs de tension, de courant et à source d'impédance [24]

<i>Onduleurs de courant</i>	<i>Onduleurs de tension</i>	<i>Onduleurs Z-source</i>
1. Le <i>CSI</i> agit comme une source de courant constant ou un courant rigide puisqu'une grande inductance est utilisée en série avec la source de tension.	Le <i>VSI</i> agit comme une source de tension constante ou une source rigide en tension puisqu'un grand condensateur est utilisé en parallèle avec la source de tension.	Le <i>ZSI</i> agit comme une source de tension constante à haute impédance. Car il dispose de condensateurs et inductances dans la liaison DC.
2. Un <i>CSI</i> est capable de résister aux courts-circuits sur deux de ses bornes de sortie.	Un <i>VSI</i> présente une situation plus dangereuse en cas de court-circuit car le condensateur parallèle alimente plus le défaut.	Dans un <i>ZSI</i> , l'allumage retardé des interrupteurs sont parfois également acceptables.
3. IL ne peut pas être utilisé en fonctionnement abaisseur ou élévateur en même temps.	Il est utilisé uniquement en mode d'opération <i>buck</i> ou <i>boost</i> .	Il Peut être utilisé en mode fonctionnement <i>buck</i> et <i>boost</i> à la fois.
4. Les circuits principaux ne peuvent pas être interchangeables.	Le circuit principal ne peut pas être interchangeable ici aussi.	Dans ce cas, les circuits principaux sont interchangeables.
5. Il est affecté par le bruit <i>EMI</i> .	Il est affecté par le bruit <i>EMI</i> .	Il est moins affecté par le bruit <i>EMI</i> .
6. Il a une quantité considérable de distorsion harmonique.	Il a une quantité considérable distorsion harmonique aussi.	La distorsion des harmoniques est plus basse.
7. La perte de puissance peut être élevée à cause du filtre.	La perte de puissance est élevée.	La perte de puissance peut être faible
8. Le rendement diminue en raison de la perte de puissance élevée.	Une perte de puissance élevée diminue le rendement dans ce cas aussi.	Un plus grand rendement car il y'a moins de perte de puissance.

III.3 Onduleur à source d'impédance

L'onduleur à source d'impédance est un onduleur qui utilise un réseau d'impédance spécifique intercalé entre le circuit principal de l'onduleur et la source d'alimentation. Cet onduleur présente des caractéristiques uniques en termes de tension (à la fois *buck* et *boost*) par rapport aux onduleurs traditionnels.

Un réseau de deux inductances et de deux condensateurs connectés en forme de X est utilisé pour fournir une source d'impédance (source Z) couplant l'onduleur à la source DC ou à un autre convertisseur voir la figure (III.7)

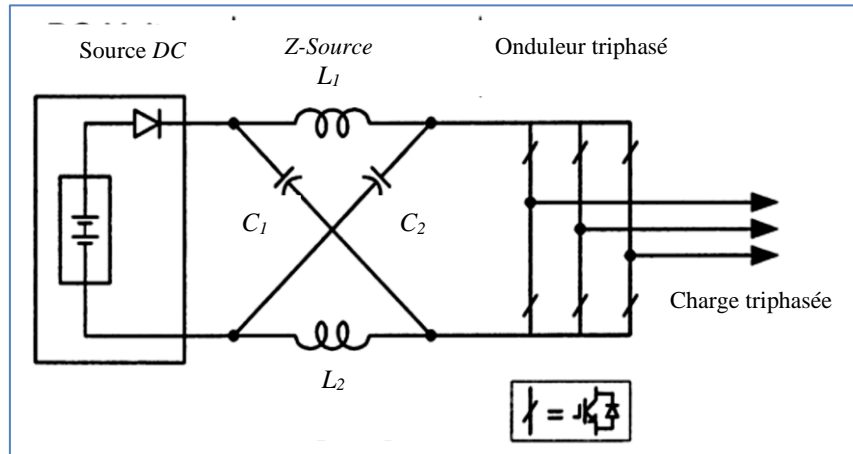


Figure III.7 Structure générale d'un onduleur à source d'impédance

III.3.1 Topologie d'un onduleur triphasé à structure z-source

Un onduleur de tension triphasé à source d'impédance est un pont triphasé constitué de 3 bras reliés à une source de tension via un réseau d'impédance (Z -source) ainsi qu'une diode de protection qui sert à empêcher la décharge des deux condensateurs dans la source de tension continue [25].

Chaque branche de l'onduleur constitue une cellule de commutation. Elle est constituée de deux interrupteurs réversibles en courant, chaque un est constituée d'un transistor *IGBT* et une diode montée en antiparallèle [26].

L'insertion d'un réseau d'impédance entre la source DC et l'onduleur triphasé, nous permet de fermer simultanément deux interrupteurs du même bras, ce qui est impossible dans un onduleur traditionnel. Ceci donne lieu à un nouveau mode de fonctionnement "Shoot-through State" ou "état de court-circuit". Ainsi un bras l'onduleur peut remplacer un interrupteur externe indépendant à l'entrée de ce dernier pour le faire fonctionner en ce mode. Cet état de court-circuit sert à contrôler le rapport cyclique du réseau d'impédance, et ainsi ajuster le rapport entre la tension de la source et celle du bus continu à l'entrée de l'onduleur [25].

Ainsi, le réseau d'impédance (*Z*-source) a deux rôles à la fois

- Le premier est celui d'un hacheur *boost*, une fois couplé à l'onduleur triphasé, le tout fonctionne en *buck-boost* ;
- La deuxième fonction est celle d'un filtre de tension et de courant.

En effet, le réseau d'impédance sert à réduire les ondulations de courant autour de sa valeur moyenne pendant une période de commutation, tandis que le condensateur est destiné à absorber ces ondulations et sert à limiter les fluctuations de tension, et ainsi fournir une tension crête plus ou moins stable à l'entrée des trois bras du pont onduleur, afin d'obtenir des tensions sinusoïdales d'amplitude et fréquence réglables à la sortie de l'inverseur

III.3.1.1 Configurations d'un onduleur triphasé avec structure *Z*-source

Pour un *VSI* traditionnel, il existe (06) six configurations actives caractérisée par un transfert d'énergie entre la source et la charge, et (02) deux configurations passives où il n'y a pas de transfert de puissance entre la source et la charge dites séquences nulles.

Pour le *ZSI*, il existe également un neuvième état qui correspond à plusieurs configurations, dédié au contrôle de la partie réseau d'impédance (source *Z*). Cet état est caractérisé par le court-circuit d'un ou plusieurs bras, parmi les trois bras disponibles de l'onduleur [25]. Toutes les configurations possibles de l'onduleur *Z*-source sont illustrées dans le tableau III.2.

Où S_i est l'état de l'interrupteur S_i et \bar{S}_i son complément. Si $S_i = 1$ alors S_i est fermé et si $S_i = 0$ alors S_i est ouvert, avec $i=1, 2 \dots, 6$.

Une analyse de ce tableau montre que l'état de court-circuit du *ZSI* 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 réalisées par le court-circuit de deux bras ;
- Une configuration est obtenue par le court-circuit des trois bras.

Les expressions des tensions alternatives à la sortie de l'onduleur ne sont pas affectées par l'insertion de ces configurations [28]. Par contre la tension d'entrée v_{in} dépend des deux modes de fonctionnement spécifique du *ZSI*.

Tableau III.2 États de commutation de l'onduleur z-source triphasé [27]

État	S_1	S_4	S_3	S_6	S_2	S_5
Séquence active {100}	1	0	0	1	1	0
Séquence active {110}	1	0	1	0	1	0
Séquence active {010}	0	1	1	0	1	0
Séquence active {011}	0	1	1	0	0	1
Séquence active {001}	0	1	0	1	0	1
Séquence active {101}	1	0	0	1	0	1
Séquence active {000}	0	1	0	1	1	0
Séquence nulle {111}	1	0	1	0	0	1
Shoot-through E_1	1	1	S_3	$\overline{S_3}$	S_2	$\overline{S_2}$
Shoot-through E_2	S_1	$\overline{S_1}$	1	1	S_2	$\overline{S_2}$
Shoot-through E_3	S_1	$\overline{S_1}$	S_3	$\overline{S_3}$	1	1
Shoot-through E_4	1	1	1	1	S_2	$\overline{S_2}$
Shoot-through E_5	1	1	S_3	$\overline{S_3}$	1	1
Shoot-through E_6	S_1	$\overline{S_1}$	1	1	1	1
Shoot-through E_7	1	1	1	1	1	1

III.3.2 Principe de fonctionnement d'un onduleur Z-source

Un onduleur z-source à deux modes de fonctionnement tout comme l'onduleur de tension classique, à savoir, état actif (ou état d'alimentation) et état de roue libre court-circuitant la charge.

Le premier mode peut être généré par six états de commutation où la tension continue est appliquée directement sur la charge. Par contre, le deuxième mode peut être produit par deux états de commutation où les bornes de charge sont court-circuitées via trois interrupteurs inférieurs ou supérieurs. En plus, un onduleur z-source possède un état de court-circuit

supplémentaire, nommé le « shoot-through zéro state », Cet état spécifique à ce type d'onduleur peut être obtenu en fermant à la fois l'interrupteur supérieur et l'interrupteur inférieur du même bras simultanément. Ce scénario est interdit dans les onduleurs de source de tension conventionnels et peut endommager ces appareils.

Ainsi, un onduleur a source d'impédance à deux modes d'opérations : mode franchissement en mode « shoot through » ou de court-circuit et mode franchissement ordinaire [29]. La figure (III.8) illustre le circuit équivalent de l'onduleur source d'impédance.

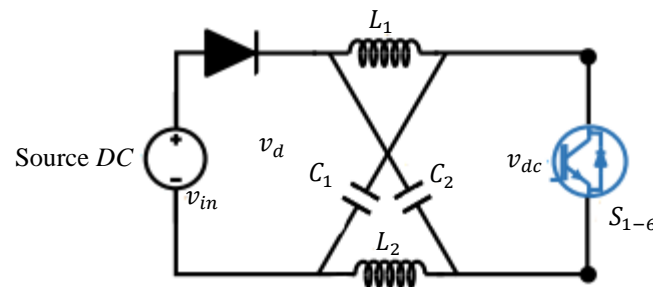


Figure III.8 Schéma équivalent d'un onduleur à source d'impédance vu du côté bus continu

Les inductances L_1 , L_2 et les condensateurs C_1 , C_2 du réseau d'impédance Z ont les mêmes valeurs deux à deux, ce qui nous permet d'écrire :

$$v_{L1} = v_{L2} = v_L \quad (\text{III.1})$$

$$v_{C1} = v_{C2} = v_C \quad (\text{III.2})$$

Dans ce qui suit nous allons étudier les deux modes de fonctionnement de cet onduleur.

III.3.3 Fonctionnement en mode 'shoot through'

La figure (III.9) illustre le schéma de l'onduleur Z-source fonctionnant en mode 'shoot through'. Ce convertisseur utilise avantageusement ce mode de fonctionnement pour augmenter la tension du bus DC en activant les interrupteurs supérieur et inférieur d'un même bras [30].

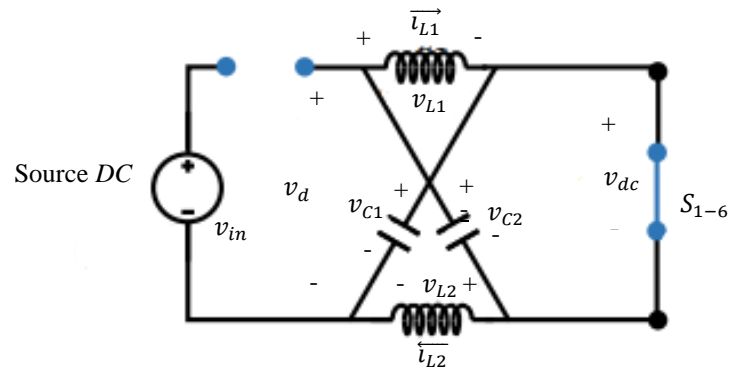


Figure III.9 Circuit équivalent de l'onduleur à source d'impédance fonctionnant en mode 'shoot through'

Dans ce cas, le réseau d'impédance est court-circuité et les condensateurs se déchargent pendant ce mode d'opération.

La tension des deux condensateurs est supérieure à la tension de la source continue ($v_C > v_{in}$) par conséquent la diode est polarisée en inverse, et les condensateurs chargent les inductances. Les tensions aux bornes des inductances sont [31] :

$$v_{L1} = v_{C1} \quad (\text{III.3})$$

$$v_{L2} = v_{C2} \quad (\text{III.4})$$

Ainsi, le courant d'inductance augmente linéairement si on suppose que la tension du condensateur est constante pendant cette période [31].

Vu la symétrie du montage, on a :

$$L_1 = L_2 \quad (\text{III.5})$$

$$C_1 = C_2 \quad (\text{III.6})$$

Ce qui donne : $v_{L1} = v_{L2} = v_L$, $i_{L1} = i_{L2} = i_L$ et $v_{C1} = v_{C2} = v_C$. On obtient alors :

$$v_C = v_L \quad (\text{III.7})$$

$$v_d = 2v_C \quad (\text{III.8})$$

$$v_{dc} = 0 \quad (\text{III.9})$$

III.3.4 Fonctionnement en mode 'not-shoot through'

Dans ce cas de fonctionnement en mode traversant, le réseau d'impédance et le pont d'onduleur ne sont pas court-circuités. La diode se met à conduire et le ZSI est schématisé par la figure suivante :

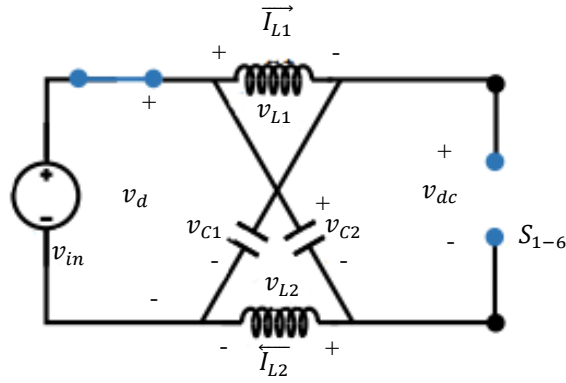


Figure III.10 Circuit équivalent du ZSI fonctionnant en mode ‘not shoot through’

Lorsque le ZSI fonctionne en ce mode non traversant, on peut écrire :

$$v_L = v_{in} - v_C \quad (\text{III.10})$$

$$v_d = v_{in} \quad (\text{III.11})$$

$$v_{dc} = v_C - v_L = 2v_C - v_{in} \quad (\text{III.12})$$

III.3.5 Expression du facteur de survoltage

Le fonctionnement d'un onduleur à source d'impédance en deux modes d'opérations ‘*shoot through*’ et ‘*not shoot-through*’ se fait périodiquement. En effet pendant une période de commutation (T), le ZSI fonctionne durant (T_0) en mode ‘*shoot-through*’ et pendant (T_1) en mode traversant ou ‘*not-shoot-through*’. Avec : $T = T_0 + T_1$

La tension moyenne aux bornes des inductances est nulle pendant une période de commutation en régime permanent [29]. Alors on peut écrire :

$$v_L = \bar{v}_L = \frac{T_0 \times v_C + T_1 \times (v_{in} - v_C)}{T} \quad (\text{III.13})$$

Ce qui donne :

$$\frac{v_C}{V_{in}} = \frac{T}{(T_1 - T_0)} \quad (\text{III.14})$$

La tension de crête de l'étage intermédiaire peut être exprimée comme suit [29] :

$$v_C = \beta V_{in} \quad (\text{III.15})$$

Où β est le facteur de survoltage (*boosting factor*), donné par :

$$\beta = \frac{T}{(T_1 - T_0)} \quad (\text{III.16})$$

Ainsi, la valeur crête de tension de phase à la sortie du ZSI vaut :

$$\widehat{v}_{ac} = M\beta \frac{v_{in}}{2} \quad (\text{III.17})$$

Où M est l'indice de modulation.

Enfin, la tension aux bornes de chaque condensateur peut être exprimée par l'équation suivante :

$$v_c = \frac{1 - D_0}{1 - 2D_0} v_{in} \quad (\text{III.18})$$

Où D_0 est le rapport cyclique, il est égal à T_0/T .

III.4 Onduleur quasi-Z-source

L'onduleur quasi-Z-source est une variante de l'onduleur Z-source, qui présente des différences au niveau des configurations, tout en conservant le même principe de fonctionnement.

En résumé, les avantages du *QZSI* par rapport au *ZSI* de base concernent le sous dimensionnement des composants du réseau d'impédance, des ondulations de courant et de tension réduites et un courant d'entrée qui ne subit pas des discontinuités [32].

Un onduleur quasi-Z-source possède tous les avantages de l'onduleur à source d'impédance de base. En plus, il a ses propres caractéristiques suivantes [33] :

- Courant d'entrée continu,
- Diminution du stress à la source,
- Composants de taille plus faible,
- Courant d'appel plus faible au démarrage,
- Contrainte de tension réduite sur le second condensateur,
- Ondulation plus petites et facteur de 'boosting' du voltage inférieur.

Le circuit équivalent d'un *QZSI* est schématisé par la figure (III.11).

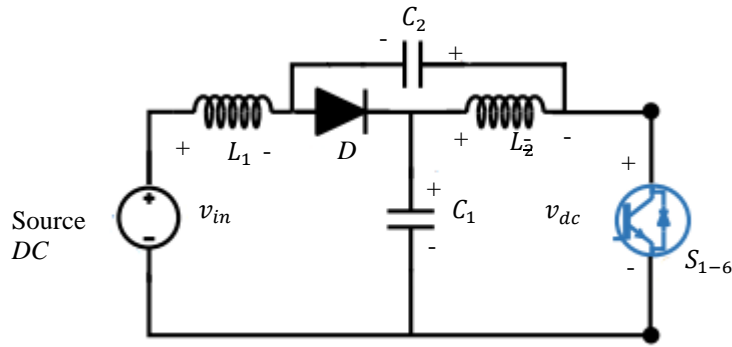


Figure III.11 Circuit équivalent d'un onduleur *Quasi-Z-source*

Cette topologie a aussi deux états de fonctionnement spécifiques : état de '*not-shoot through*' et état de '*shoot through*' tout comme le ZSI de base.

L'état de '*not-shoot through*' comprend six états actifs et deux états nul du VSI conventionnel, tandis que l'état du '*shoot through*' peut être généré en activant les interrupteurs supérieur et inférieur d'un même bras en même temps [32]. Les circuits équivalents de ces deux états sont illustrés par les figures (III.12.a) et (III.12.b).

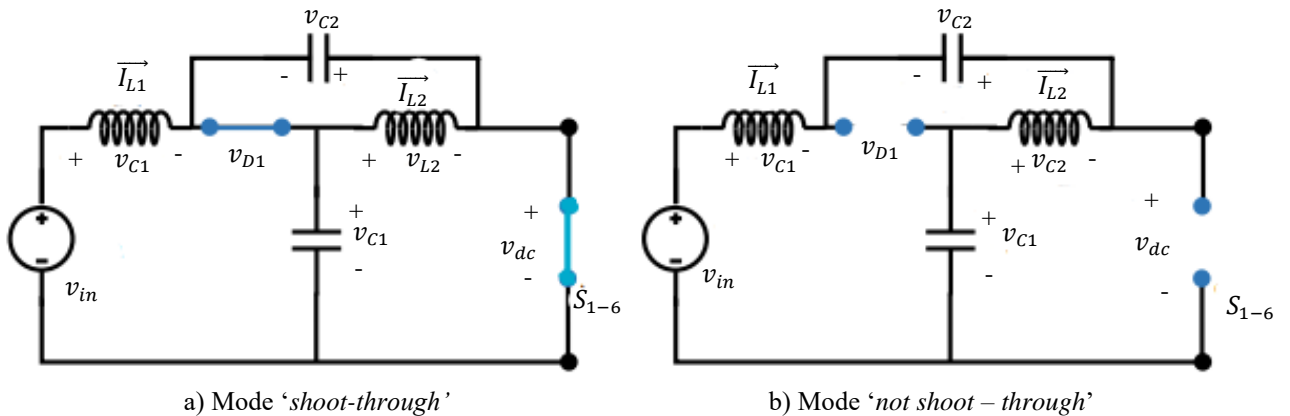


Figure III.12 Schémas des deux modes d'opération du *QZSI*

D'après le circuit de la figure (III.12), concernant le mode '*not-shoot-through*', on peut écrire :

$$v_{L1} = v_{in} - v_{C1} \tag{III.19}$$

$$v_{L2} = -v_{C2} \tag{III.20}$$

Et :

$$v_{dc} = v_{C1} + v_{C2} \quad (\text{III.21})$$

$$v_{D1} = 0 \quad (\text{III.22})$$

Maintenant, en mode '*shoot through*', on a :

$$v_{L1} = v_{C2} + v_{in} \quad (\text{III.23})$$

$$v_{L2} = v_{C1} \quad (\text{III.24})$$

Et :

$$v_{dc} = 0 \quad (\text{III.25})$$

$$v_{D1} = -v_{C1} - v_{C2} \quad (\text{III.26})$$

Ainsi sur une période de commutation complète T , les tensions moyennes aux bornes des inductances sont nulles en régime établi Ceci permet d'écrire les équations suivantes :

$$v_{L1} = \overline{v_{L1}} = \frac{T_0(v_{C2} + v_{in}) + T_1(v_{in} - v_{C1})}{T} = 0 \quad (\text{III.27})$$

$$v_{L2} = \overline{v_{L2}} = \frac{T_0(v_{C1}) + T_1(-v_{C2})}{T} = 0 \quad (\text{III.28})$$

Alors :

$$v_{C1} = \frac{T_0}{(T_1 - T_0)} v_{in} \quad (\text{III.29})$$

$$v_{C2} = \frac{T_0}{(T_1 - T_0)} v_{in} \quad (\text{III.30})$$

T_0 est la durée du mode '*shoot-through*' et T_1 est la durée du mode traversant.

Et β est le facteur de survoltage, il peut être exprimé par :

$$\beta = \frac{1}{1 - 2D_0} \quad (\text{III.31})$$

Avec D_0 le rapport cyclique exprimé par $D_0 = T_0/T$.

D'autre part, la tension de crête du bus continu peut-être exprimée par l'équation suivante :

$$\widehat{v}_{dc} = v_{C1} + v_{C2} = \beta v_{in} \quad (\text{III.32})$$

III.5 Techniques de commande d'un onduleur à source d'impédance

La technique de modulation de largeur d'impulsions (*MLI*) est une méthode utilisée pour générer des tensions aux amplitudes et fréquences variables en contrôlant la durée d'impulsions à chaque période complète [33]. Cette technique de *MLI* est très courante dans la conversion *DC/AC*. En utilisant cette technique de commutation à haute fréquence, il est possible d'éliminer les harmoniques de basses fréquences indésirables et les harmoniques de commutation de haute fréquence sont faciles à filtrer [31].

L'onduleur triphasé à source d'impédance peut être commandé par plusieurs stratégies tout comme le *VSI* et le *VCI*. Ces stratégies sont développées à partir des techniques de *MLI* classique (sinus-triangulaire et vectorielle) utilisées dans les onduleurs conventionnels. Nous nous limiterons dans cette section à la *MLI* sinus-triangulaire (*MLIS*) dédiée à la commande d'un *ZSI*.

Une technique de *MLIS* est une méthode de modulation basée sur la porteuse. L'idée principale de la *MLIS* est d'utiliser un signal de modulation sinusoïdal compare à un signal porteur (normalement une onde triangulaire a haute fréquences) pour produire les durées de marche/arrêt des six interrupteurs de l'onduleur qui dépendent des intersections entre l'onde de référence (onde sinusoïdale) et l'onde porteuse [33], comme l'illustre la figure (III.13) suivante :

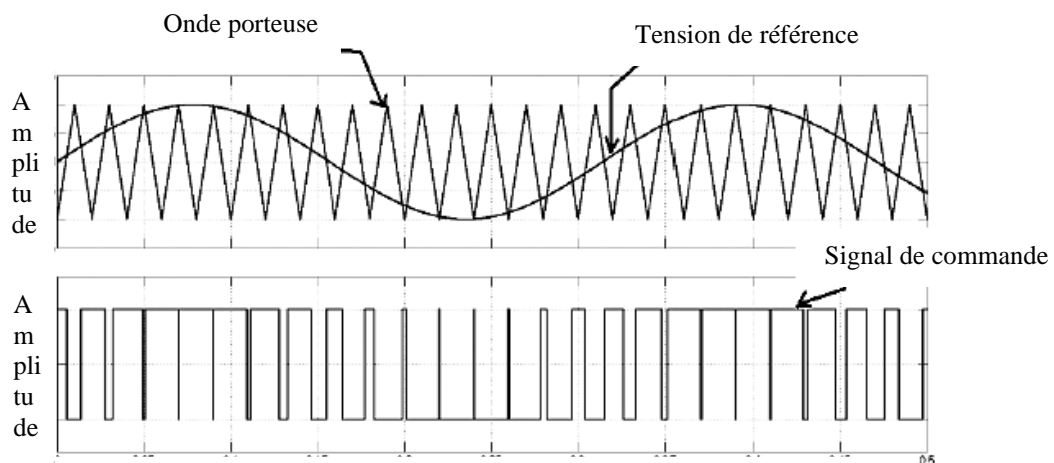


Figure III.13 Tension de référence, onde porteuse et signal de la commande à *MLIS*

L'indice de modulation (M) qui est l'un des deux principaux paramètres d'un *MLIS* s'exprime comme suit :

$$M = \frac{v_{refm}}{v_{pm}} \quad (\text{III.33})$$

Où v_{refm} et v_{pm} sont les valeurs de crête de la tension de références et de l'onde porteuse.

Cet indice de modulation sert au réglage de la valeur efficace de la tension ($M < 1$). La *MLIS* a été adaptée pour la commande du *ZSI* de trois manières distinctes : Commande par survoltage simple (*Simple Boost Control : SBC*), commande par survoltage maximal (*MBC*) et commande par survoltage constant maximal (*MCBC*).

III.5.1 Commande par survoltage simple

Dans ce cas, des impulsions de déclenchement sont générées en corrélant les trois signaux de référence sinusoïdaux et deux enveloppes de tensions constantes avec l'onde triangulaire porteuse. Les signaux de référence sont déphasés de 120 degrés et ces deux enveloppes de tension sont identiques d'amplitude de crête des signaux de référence, voir la figure (III.14) [34].

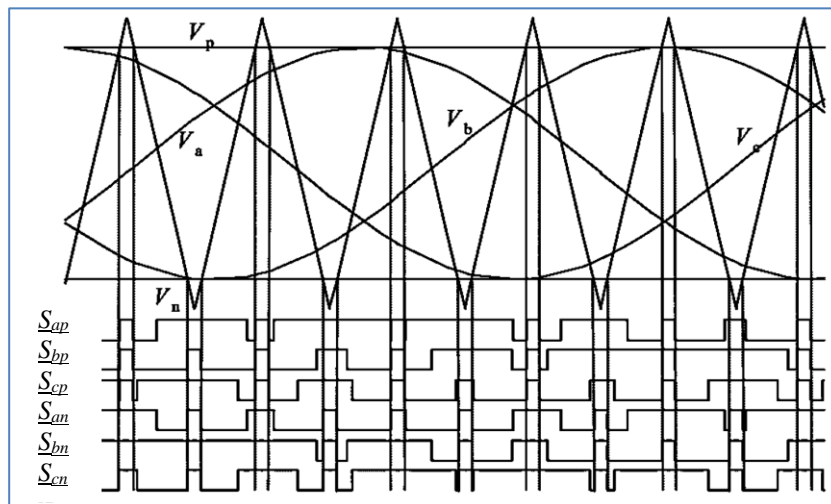


Figure III.14 Commande du *ZSI* à *MLIS* à survoltage simple

III.5.2 Commande par survoltage maximal

Dans cette stratégie de commande, le mode de court-circuit '*shoot-through*' est amorcé lorsque l'onde porteuse triangulaire est soit supérieure aux tensions de référence (V_a, V_b, V_c) soit inférieure à ces mêmes tensions de référence.

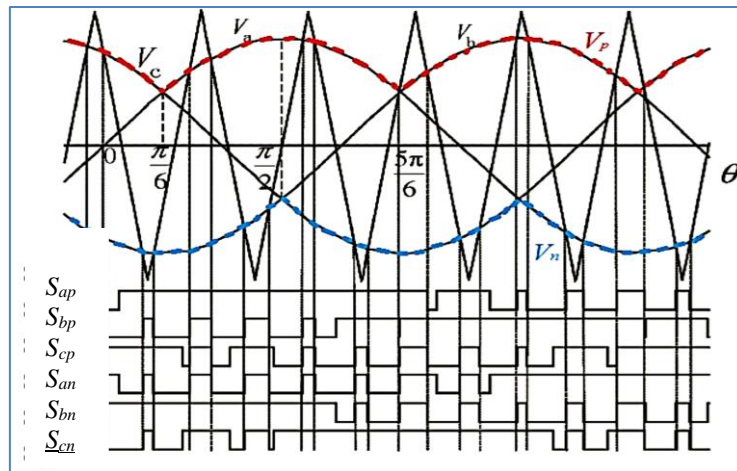


Figure III.15 Commande à MLIS du ZSI par survoltage maximal

III.5.3 Commande par survoltage constant et maximal

Afin de réduire le volume et le coût du convertisseur, il est important de maintenir toujours un taux du mode de fonctionnement traversant constant. La figure (III.16) montre le schéma de principe de la méthode MCBC, qui permet d'obtenir un facteur de 'boosting' de tension maximal tout en maintenant constant le rapport cyclique du mode 'not-shoot-through' [35].

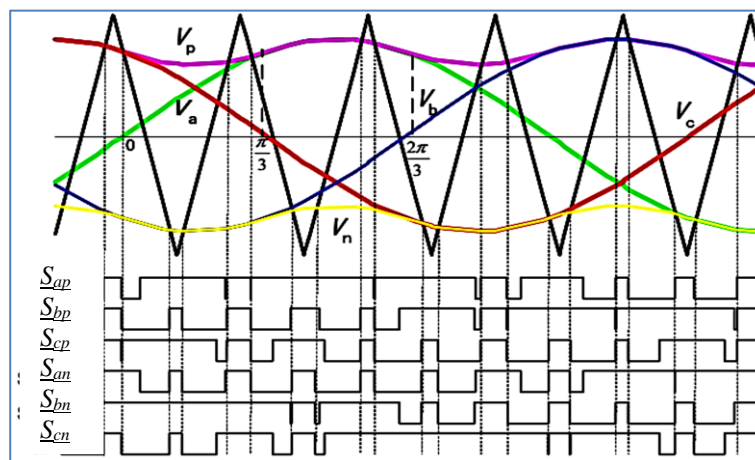


Figure III.16 Commande à MLIS du ZSI à survoltage constant et maximal [35]

Il existe 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, V_p et V_n . Lorsque l'onde triangulaire porteuse est supérieure à l'enveloppe V_p , ou inférieure à l'enveloppe inférieure V_n , l'onduleur est mis en état 'shoot-through', sinon l'onduleur commute de la même manière que dans le cas d'une commande MLI traditionnelle basé sur la porteuse [36].

Pour l'intervalle $[0, \pi/3]$ de la figure (III.16), les enveloppes supérieure et inférieure peuvent être exprimées respectivement par les équations suivantes :

$$V_{p1} = \sqrt{3}M + M\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad 0 < \theta < \frac{\pi}{3} \quad (\text{III.34})$$

$$V_{n1} = M\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad 0 < \theta < \frac{\pi}{3} \quad (\text{III.35})$$

Et pour l'intervalle $[\pi/3, 2\pi/3]$, elles s'expriment respectivement par :

$$V_{p2} = M\sin(\theta) \quad \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{2\pi}{3} \quad (\text{III.36})$$

$$V_{n2} = M\sin(\theta) - \sqrt{3}M \quad \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{2\pi}{3} \quad (\text{III.37})$$

L'injection de la troisième harmonique est couramment utilisée dans la commande d'un onduleur triphasé pour augmenter la plage de l'indice de modulation. Cela peut également être utilisé ici pour augmenter la plage du gain de survoltage de ZSI, voir la figure (III.17) [27].

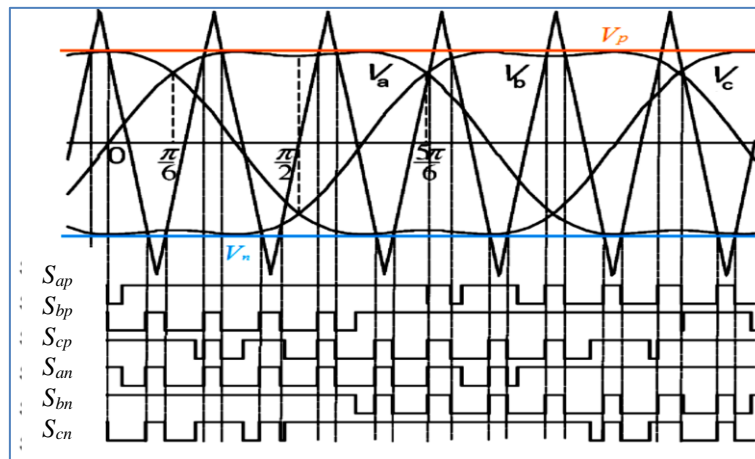


Figure III.17 Commande MLIS à amplification constante maximale avec injection de la troisième harmonique [37]

Le principe de fonctionnement est identique au cas précédent, la seule différence est que la forme de l'onde de modulation est modifiée. Dans cette commande, l'indice de modulation maximal peut être atteint par l'injection de la troisième harmonique [38].

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la présentation du conditionneur de puissances d'un système PV à base d'un seul étage composé d'un onduleur Z-sources et ces différents types de commandes.

Au chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la simulation d'un système *PV* connecté au réseau à base d'un onduleur *Z*-source et comparer les résultats de simulation avec ceux d'un système *PV* connecté au réseau à base d'un onduleur quasi-*Z*-sources et un conditionneur de puissance à base d'un hacheur '*boost*' associé à un onduleur de tension conventionnel (à deux et trois niveaux).

Chapitre IV

Présentation et Discussion des

Résultats de Simulation

IV.1 Introduction

MATLAB/SIMULINK est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui donnent la possibilité de voir le système à différents niveaux. *SIMULINK* offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système.

La simulation nous a permis de faciliter l'évaluation des performances théoriques du système *PV* étudié par le contrôle facile des conditions ainsi les performances peuvent être surveillées facilement.

Dans ce chapitre, nous allons introduire le système *PV* étudié qu'on a simulé sous *MATLAB/SIMULINK*. Ensuite, nous allons présenter et discuter les résultats de simulation obtenus pour différentes conditions de fonctionnement (éclairage et température variables), et Ceci dans le cas d'un conditionneur de puissance à base d'un onduleur conventionnel (à deux niveaux), un onduleur à trois niveaux et un onduleur à source d'impédance (de type *Z*-source et de type *Q-Z*-source)

IV.2 Présentation du système *PV* étudié

Le système *PV* étudié a été simulé sous *MATLAB/SIMULINK*, voir figures (IV.1 et IV.2). Les paramètres des différentes parties de ce système *PV* (modules photovoltaïques, convertisseur *DC/DC*, convertisseurs *DC/AC*, filtre *LC*).

Le générateur photovoltaïque est constitué de ($N_p=66$) branches parallèles chacune de ($N_s=5$) modules d'une puissance de 305 Wc (calculée pour un éclairage $E=1000$ W/m² et une température $T=25^\circ\text{C}$) en série. Ceci correspond à une puissance nominale d'environ 100 kWc.

Pour simuler notre système, nous avons considéré deux profils de l'éclairage et de la température, illustrés par la figure suivante :

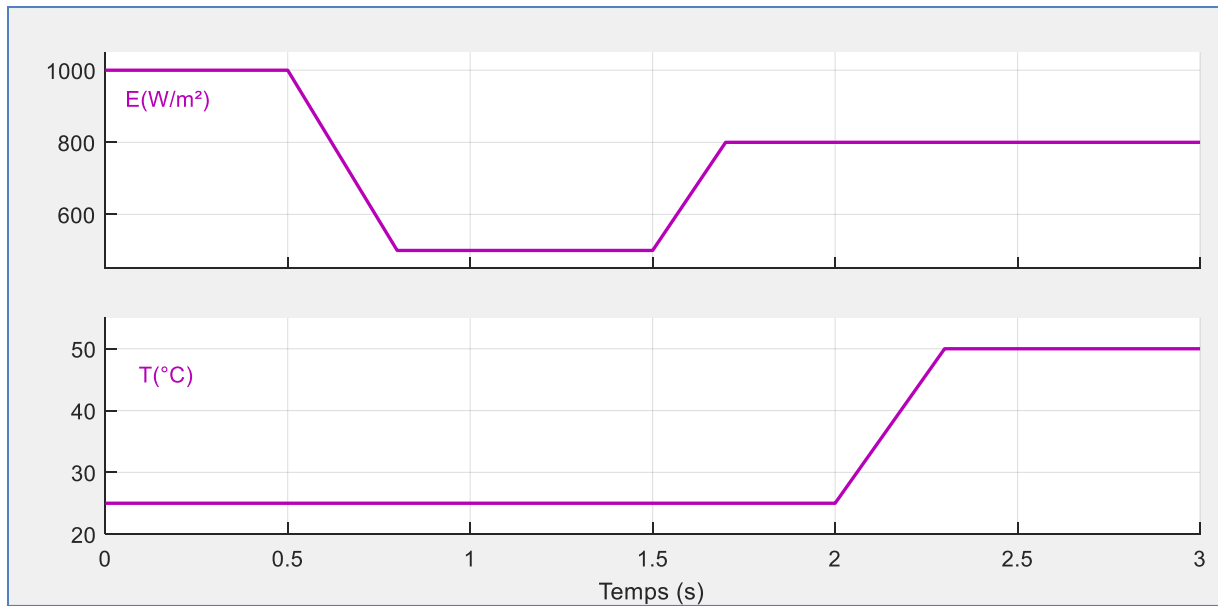


Figure IV.1 Profils de l'éclairement et de la température appliqués au *GPV* du système *PV* étudié

La figure (IV.2) illustre les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du *GPV* du système étudié pour différents éclairements et températures.

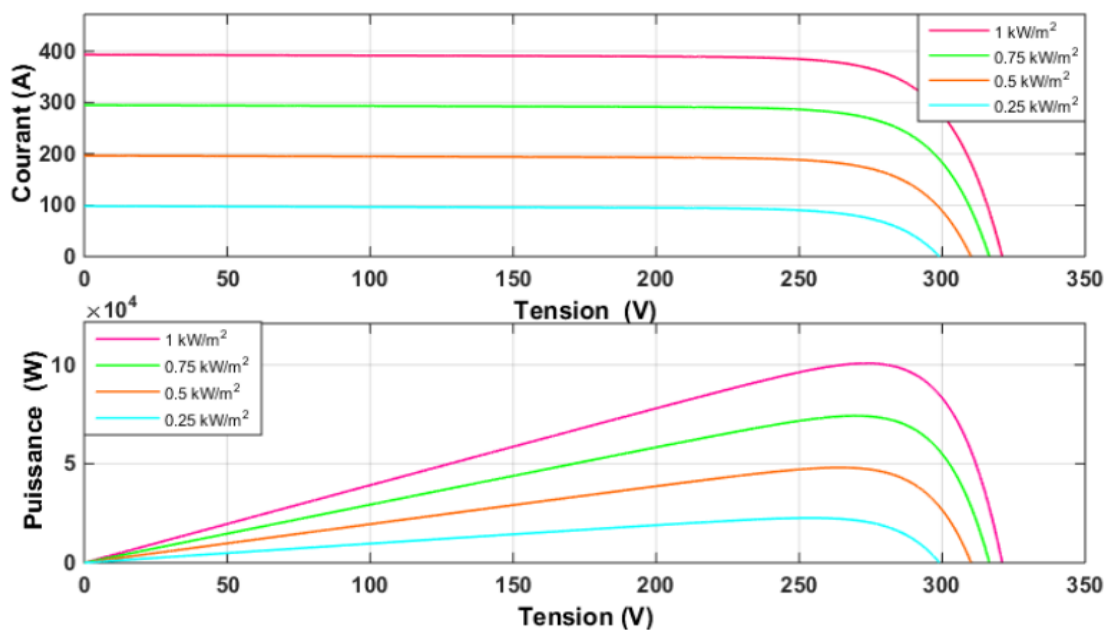


Figure IV.2 Caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du module *PV* étudié pour différents éclairements

IV.3 Présentation et discussion des résultats

Le système *PV* étudié est composé tantôt d'un onduleur conventionnel (à deux niveaux ou à trois niveaux) et tantôt d'un onduleur à source d'impédance (*Z*-source ou Quasi-*Z*-source).

Dans le cas de l'onduleur à source d'impédance, nous avons utilisé une commande *MPPT* de type (inductance incrémentale) pour gérer les séquences du mode 'shoot through'. Ceci permet de déterminer la durée du court-circuit de l'entrée de l'onduleur et 'booster' la tension v_{dc} au niveau désiré pour assurer un fonctionnement en mode *MPPT*.

Rappelons que dans le cas d'un conditionneur de puissance à base d'un onduleur classique, c'est l'hacheur 'boost' qui garantit un fonctionnement en mode *MPPT* en utilisant la méthode de inductance incrémentale.

Dans ce qui suit, nous allons présenter et discuter les résultats de simulation de ces deux cas, puis nous allons les comparer en termes de qualité d'énergie.

IV.3.1 Cas du système *PV* étudié à base d'un onduleur à deux niveaux

Dans ce cas, le schéma bloc du système *PV* étudié, simulé sous *MATLAB/SIMULINK*, est illustré par la figure IV.3.

Les résultats de simulation obtenus dans ce cas sont illustrés par les figures (IV.4) à (IV.7).

On remarque que la puissance injectée au réseau suit sa valeur de référence qui change en fonction du profil de l'éclairement et de la température et qui est égale à la puissance du *GPV* aux pertes près dans le *PCS*, le filtre, le transformateur de couplage et les lignes.

Remarquons aussi qu'une augmentation de la température et une diminution de l'éclairement provoquent (logiquement) une diminution de la puissance délivrée par le *GPV* et vice versa. Par ailleurs, cette même puissance s'établit et reste stable pendant les intervalles où la température et l'éclairement sont constants.

En outre, le courant injecté au réseau (celui du coté haute tension) varie en amplitude dans le même sens des variations de la puissance, car la tension du réseau est pratiquement constante (source de tension), comme montre la figure (IV.5).

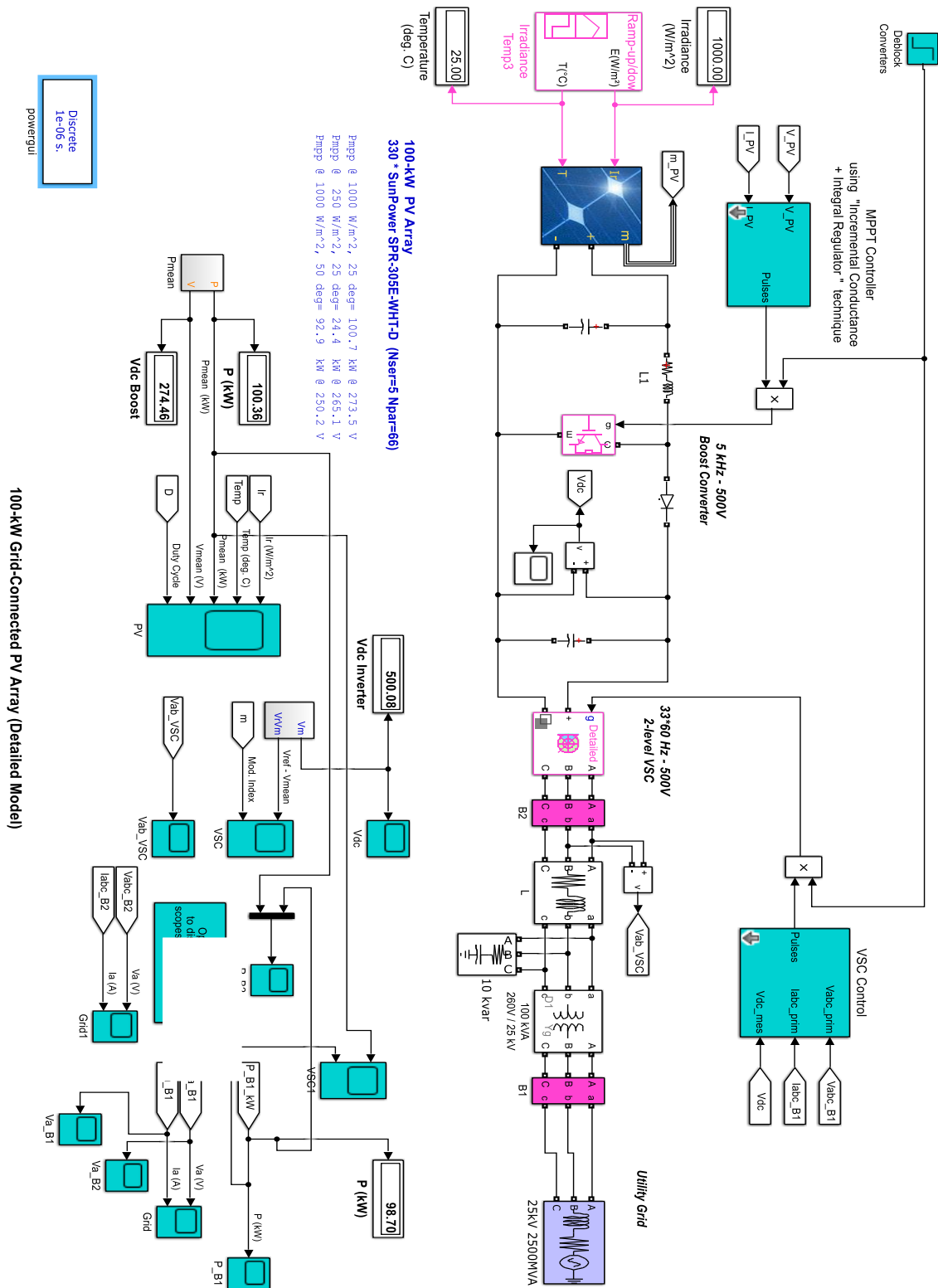


Figure IV.3 Schéma bloc sous SIMULINK du système PV étudié à base d'un onduleur à deux niveaux

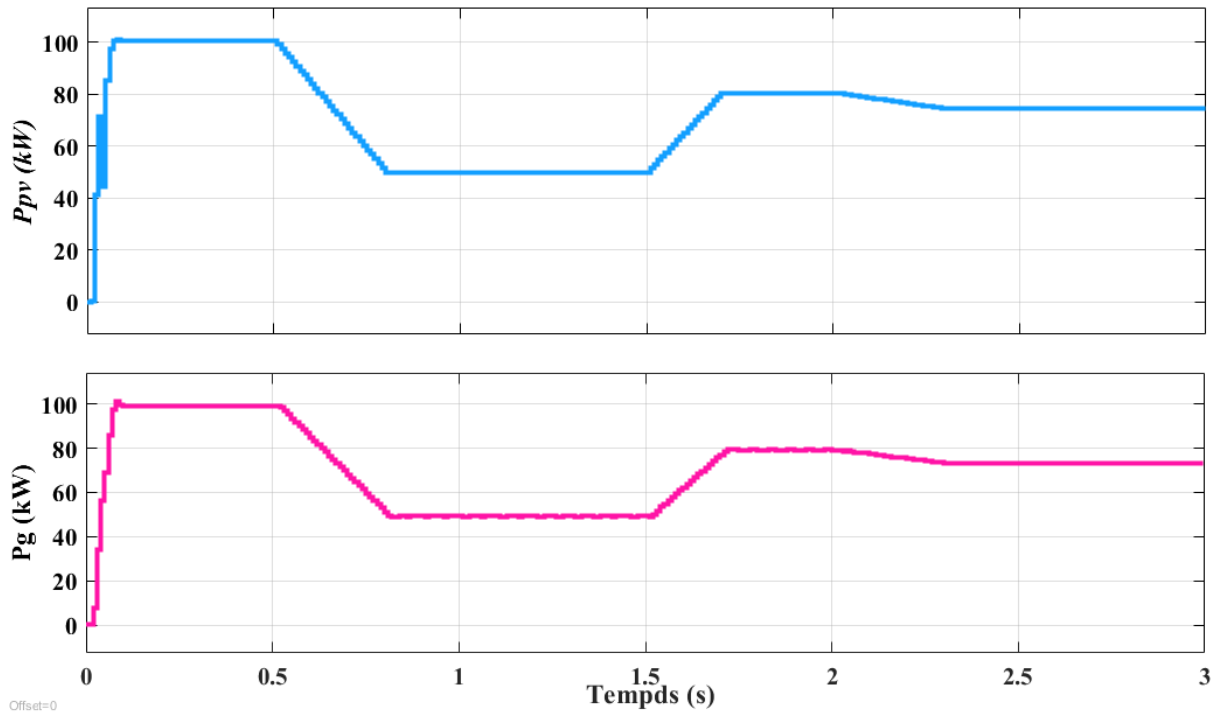
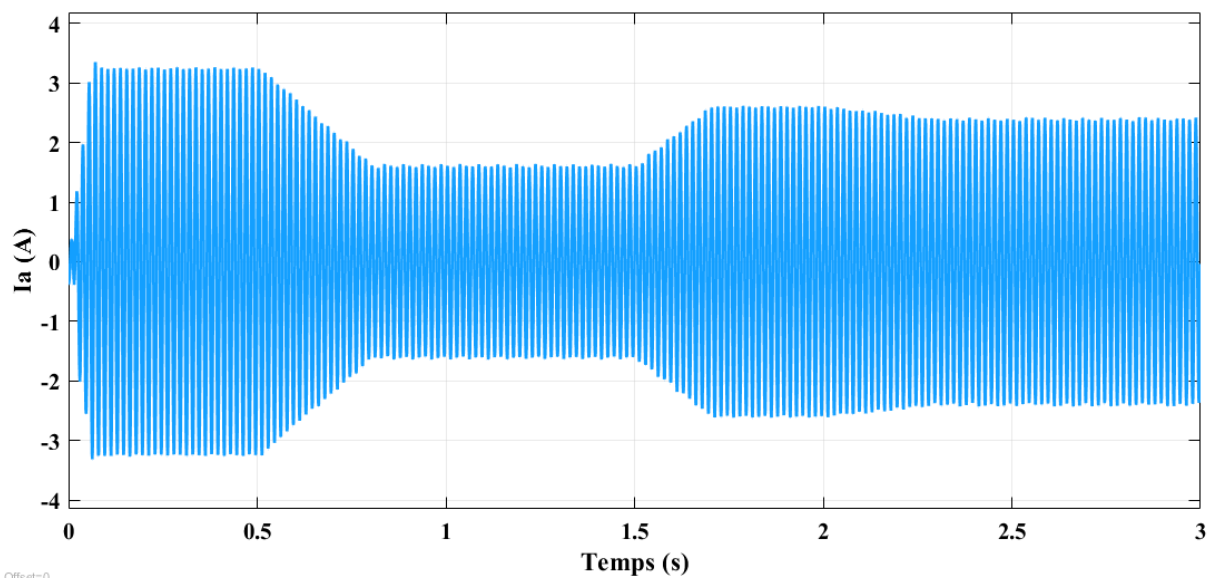
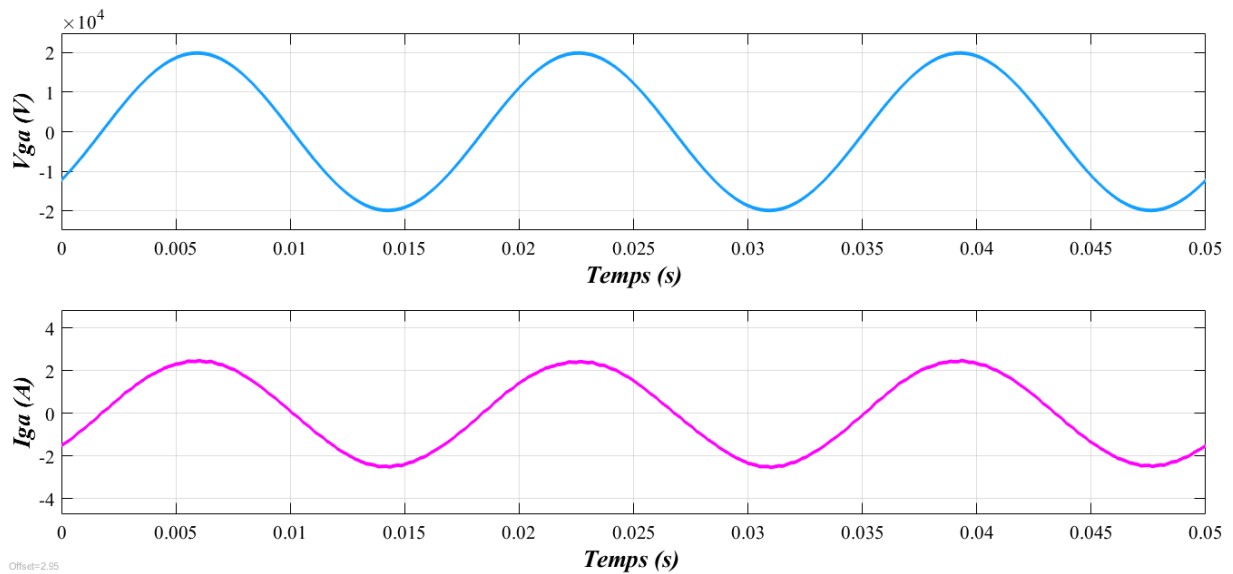


Figure IV.4 Allure de la puissance du GPV et la puissance active injectée au réseau PV dans le cas d'un onduleur à deux niveaux

On remarque également que le courant injecté au réseau est pratiquement en phase avec la tension du réseau ce qui confirme le bon réglage des courants et assure un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.



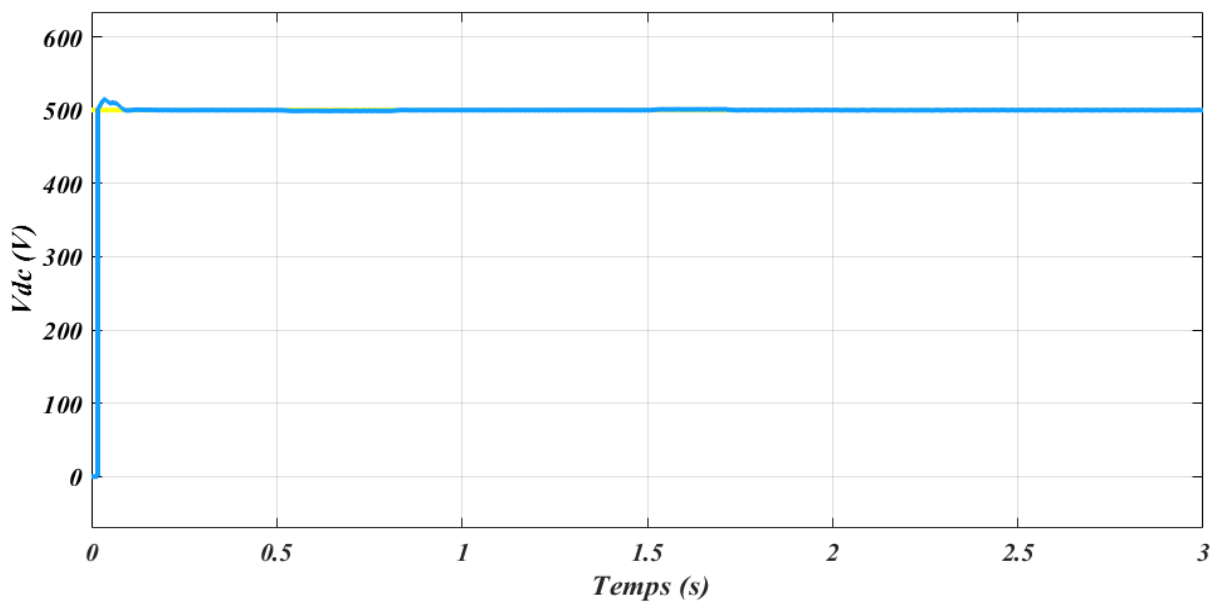
a) Courant injecté au réseau



b) Zoom du courant et de la tension

Figure IV.5 Allure du courant et de la tension du réseau dans le cas d'un onduleur à deux niveaux

Par ailleurs, la figure suivante montre aussi l'évolution de la tension d'entrée de ce même convertisseur, qui marque un petit pic au début, puis reste pratiquement collée à sa référence (500V) pour différents niveaux de puissance, malgré les larges variations de l'éclairement et de la température. Ceci montre le bon réglage de la tension du bus continu.

**Figure IV.6** Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à deux niveaux

L'analyse spectrale par *FFT* du courant injecté au réseau nous a permis de savoir la qualité d'énergie injectée par le système *PV* au réseau à travers le taux de distorsion harmonique (*THD%*), voir figure (IV.7). La fenêtre d'analyse par *FFT* commence l'échantillonnage des signaux analysés à $t=0.3$ s et tient compte de deux cycles.

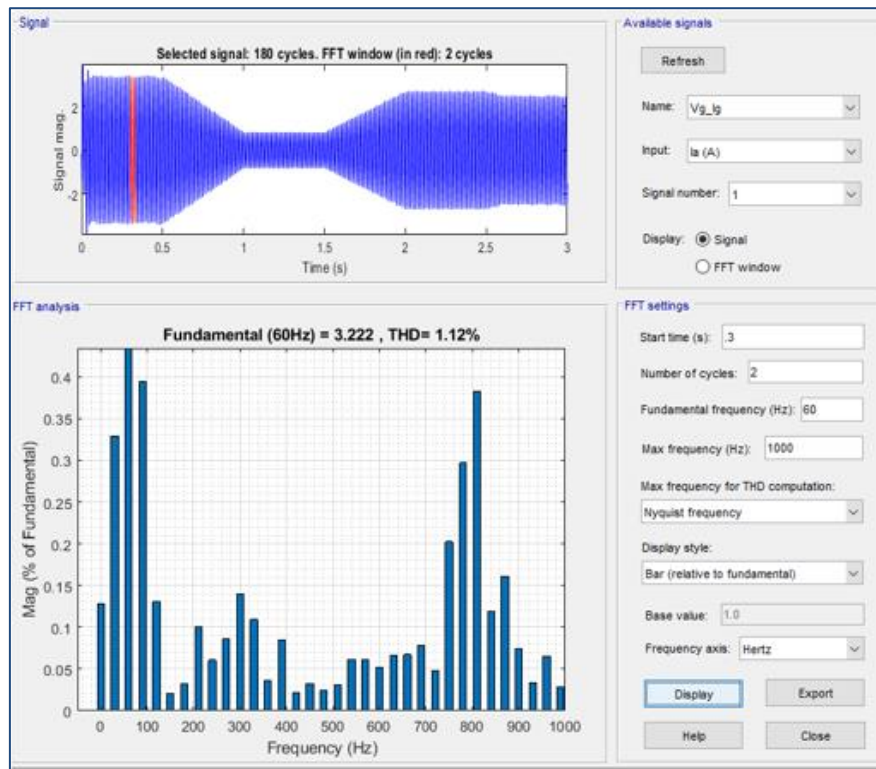


Figure IV.7 Analyse spectrale par *FFT* du courant injecté au réseau dans le cas d'un *PCS* à base d'un onduleur à deux niveaux

On note que la forme périodique du courant injecté au réseau dans ce cas est ($THDI=1.12\%$). Ce niveau de distorsion harmonique est en dessous de la norme requise qui est de 5%. Ceci est grâce à la grande fréquence de commutation de l'onduleur et à la présence du filtre passif à sa sortie.

IV.3.2 Cas du système *PV* étudié à base d'un onduleur à trois niveaux

On remarque que la puissance injectée au réseau suit sa valeur de référence qui change en fonction du profil de l'éclairément et de la température et qui est égale à la puissance du *GPV* aux pertes près dans le *PCS*, le filtre, le transformateur de couplage et les lignes.

Remarquons aussi qu'une augmentation de la température et une diminution de l'éclairément provoquent (logiquement) une diminution de la puissance délivrée par le *GPV* et

vice versa. Par ailleurs, cette même puissance s'établit et reste stable pendant les intervalles où la température et l'éclairage sont constants.

En outre, le courant injecté au réseau (celui du côté haute tension) varie en amplitude dans le même sens des variations de la puissance, car la tension du réseau est pratiquement constante (source de tension), comme montre la figure (IV.10).

On remarque que le courant injecté au réseau est pratiquement en phase avec la tension du réseau ce qui confirme le bon réglage des courants et assure un fonctionnement à facteur de puissance unitaire (figure IV.10).

De même, l'analyse spectrale par *FFT* du courant injecté au réseau nous a permis de savoir la qualité d'énergie injectée par le système *PV* au réseau à travers le taux de distorsion harmonique (THD%), voir figure (IV.12). La fenêtre d'analyse par *FFT* commence l'échantillonnage des signaux analysés à $t=0.3$ s et tient compte de deux cycles.

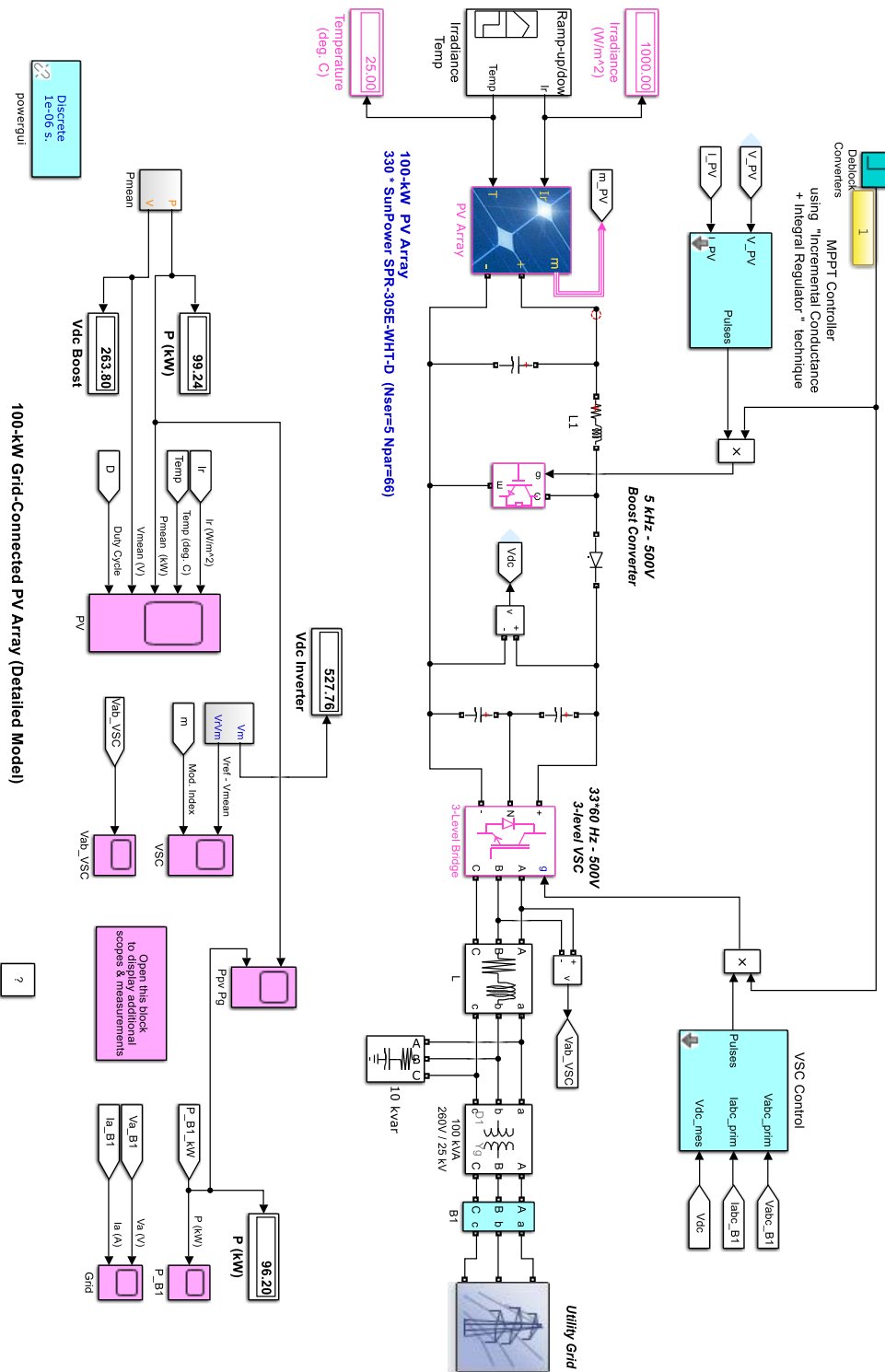


Figure IV.8 Schéma bloc sous SIMULINK du système PV étudié à base d'un onduleur à trois niveaux

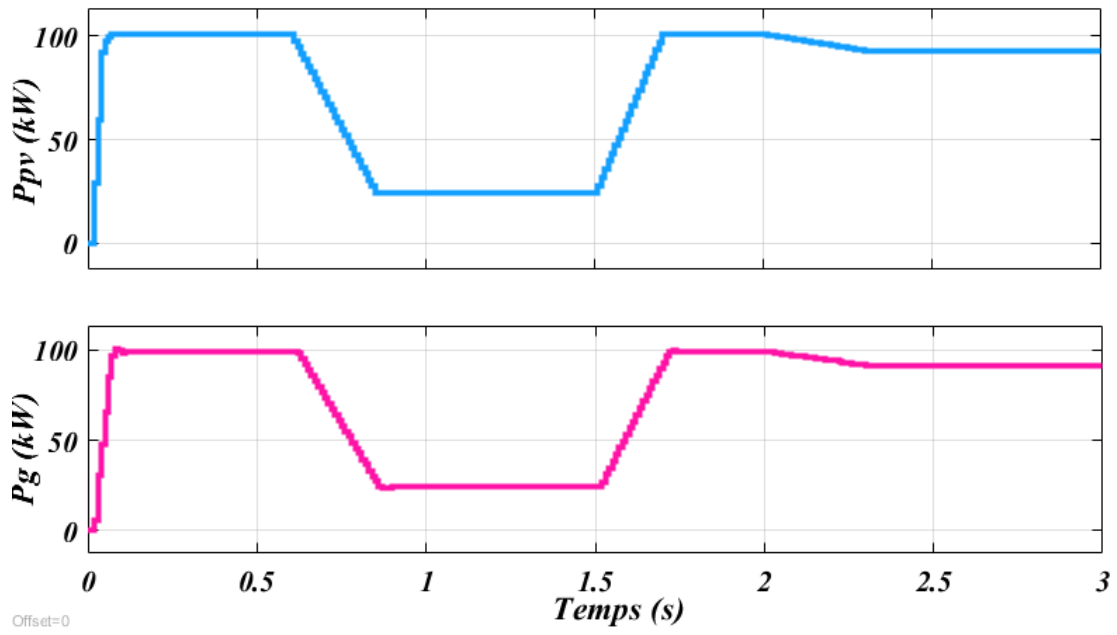
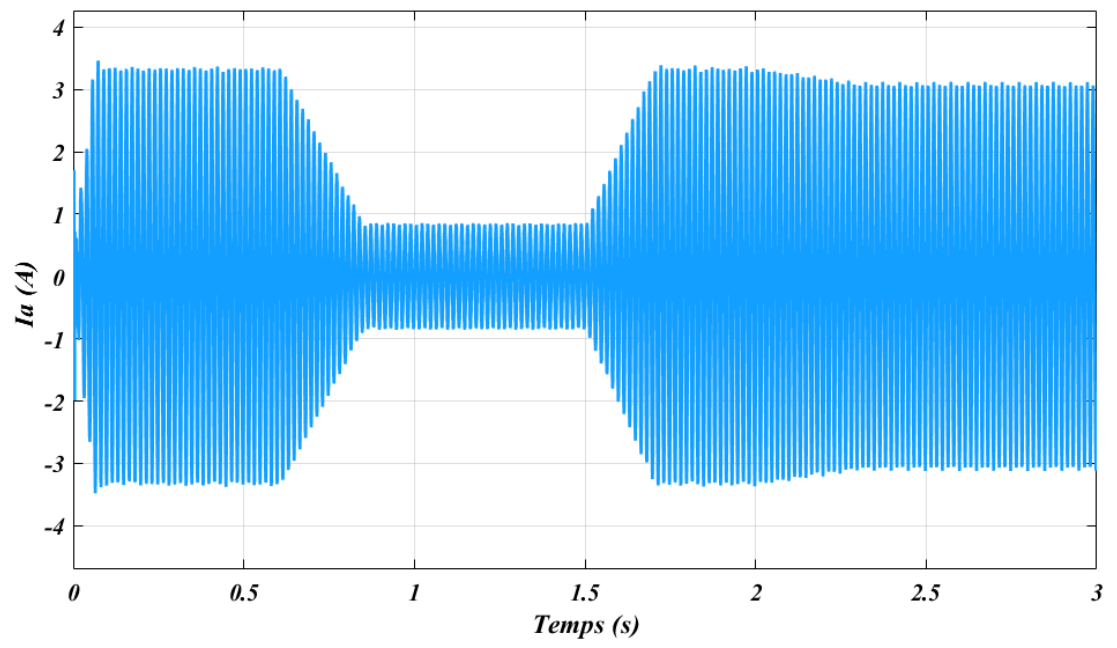
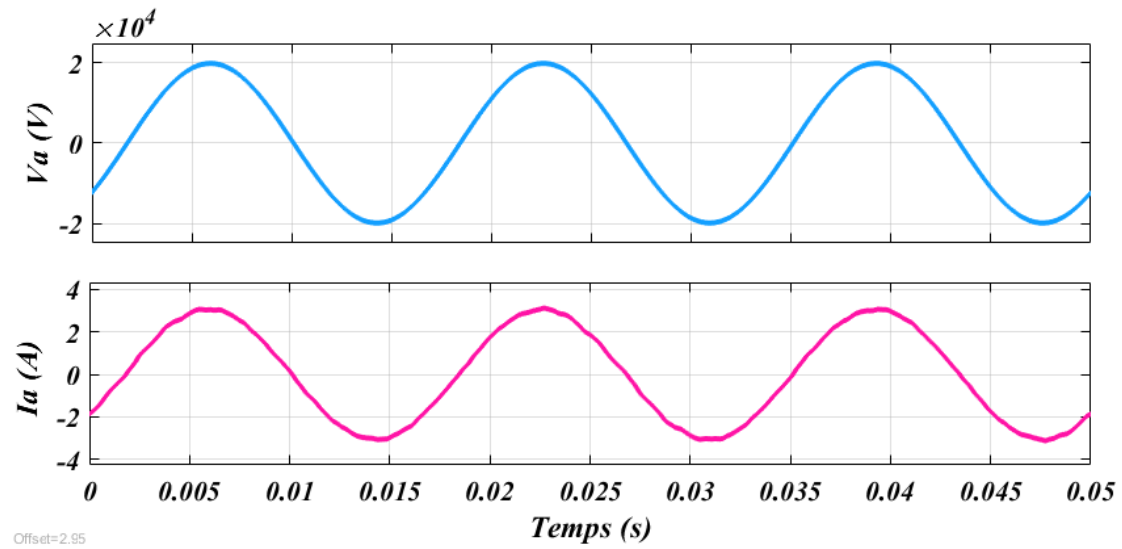


Figure IV.9 Allure de la puissance du GPV et la puissance active injectée au réseau dans le cas d'un onduleur trois niveaux



a) Courant injecté au réseau



b) Zoom du courant et de la tension

Figure IV.10 Allure du courant et de la tension du réseau dans le cas d'un onduleur à trois niveaux

Par ailleurs, la figure suivante

montre aussi l'évolution de la tension d'entrée de ce même convertisseur, qui marque un pic au début, puis reste collée à sa référence (500V) pratiquement pour différents niveaux de puissance, malgré les larges variations de l'éclairement et de la température. Ceci montre le bon réglage de la tension du bus continu.

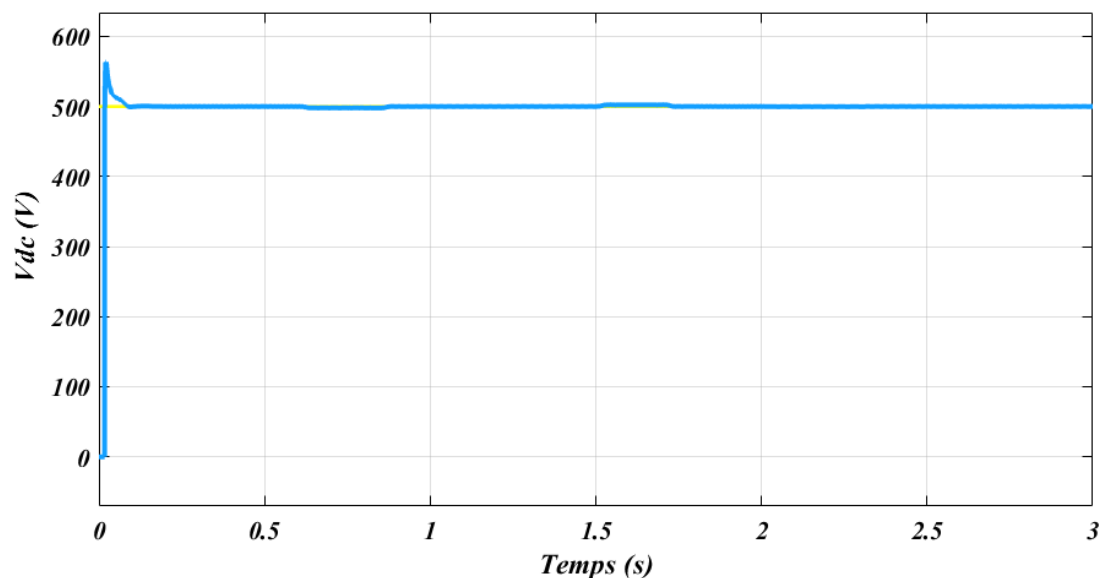


Figure IV.11 Allure de la tension d'entrée (du bus continu) d'un onduleur à trois niveaux

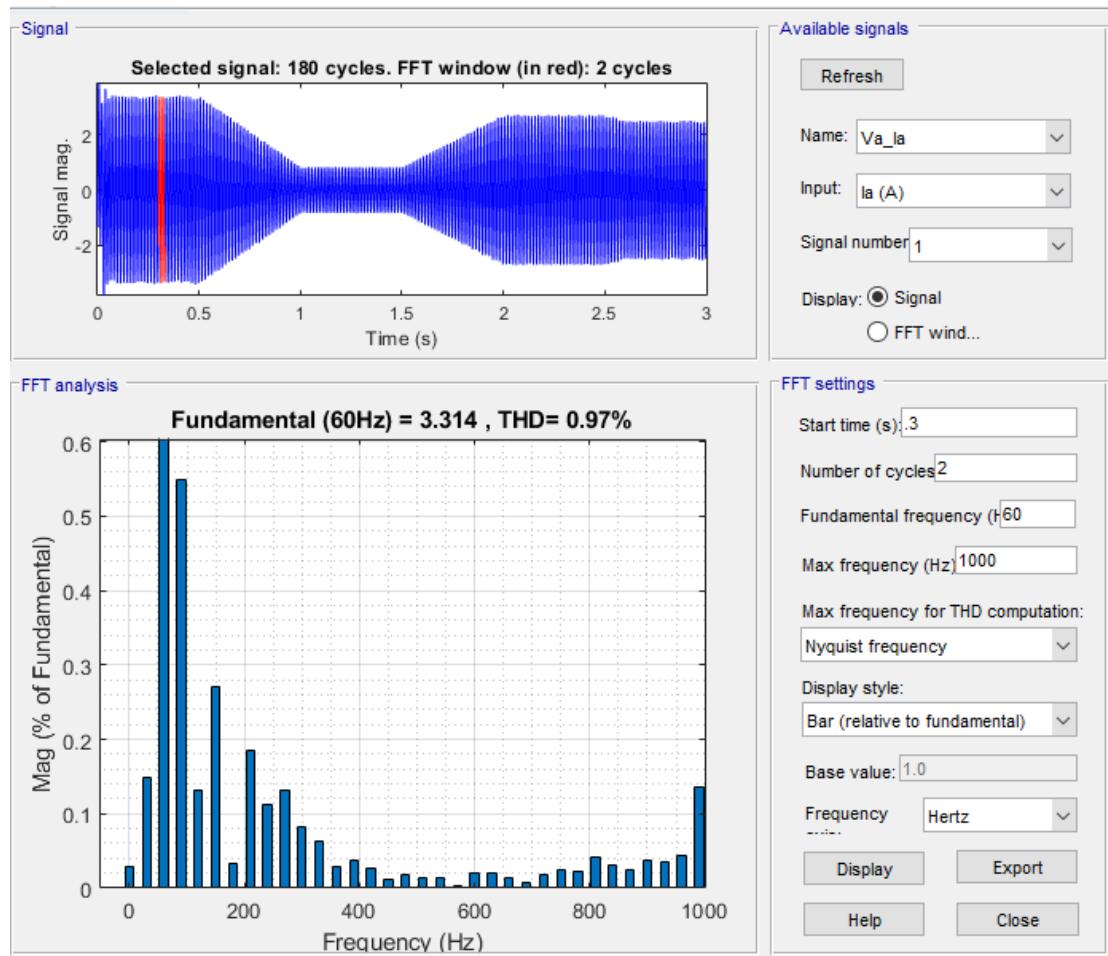


Figure IV.12 Analyse spectrale par *FFT* du courant injecté au réseau dans le cas du *PCS* à base d'un onduleur trois niveaux

On note une bonne forme périodique et sinusoïdale du courant injecté au réseau dans ce cas avec un taux d'harmonique ($THDI=0.97\%$). Ce niveau de distorsion harmonique est en dessous de la norme requise qui est de 5%. Ceci est grâce à la la topologie du convertisseur, à sa grande fréquence de commutation et à la présence du filtre passif à sa sortie.

IV.3.3. Cas du système *PV* étudié à base d'un onduleur *Z-source*

La figure (IV.13) illustre le schéma bloc du système *PV* étudié à base d'un onduleur *Z-source* simulé sous *MATLAB/SIMULINK*. Les simulations sont effectuées dans les mêmes conditions de fonctionnement de la section précédente.

Dans ce cas, nous avons initialisé le rapport cyclique ($D_0=0.67$) correspondant au mode *MPPT* puis le bloc de la *MPPT* se charge de son ajustement en temps réel, voir la figure (IV.14.a).

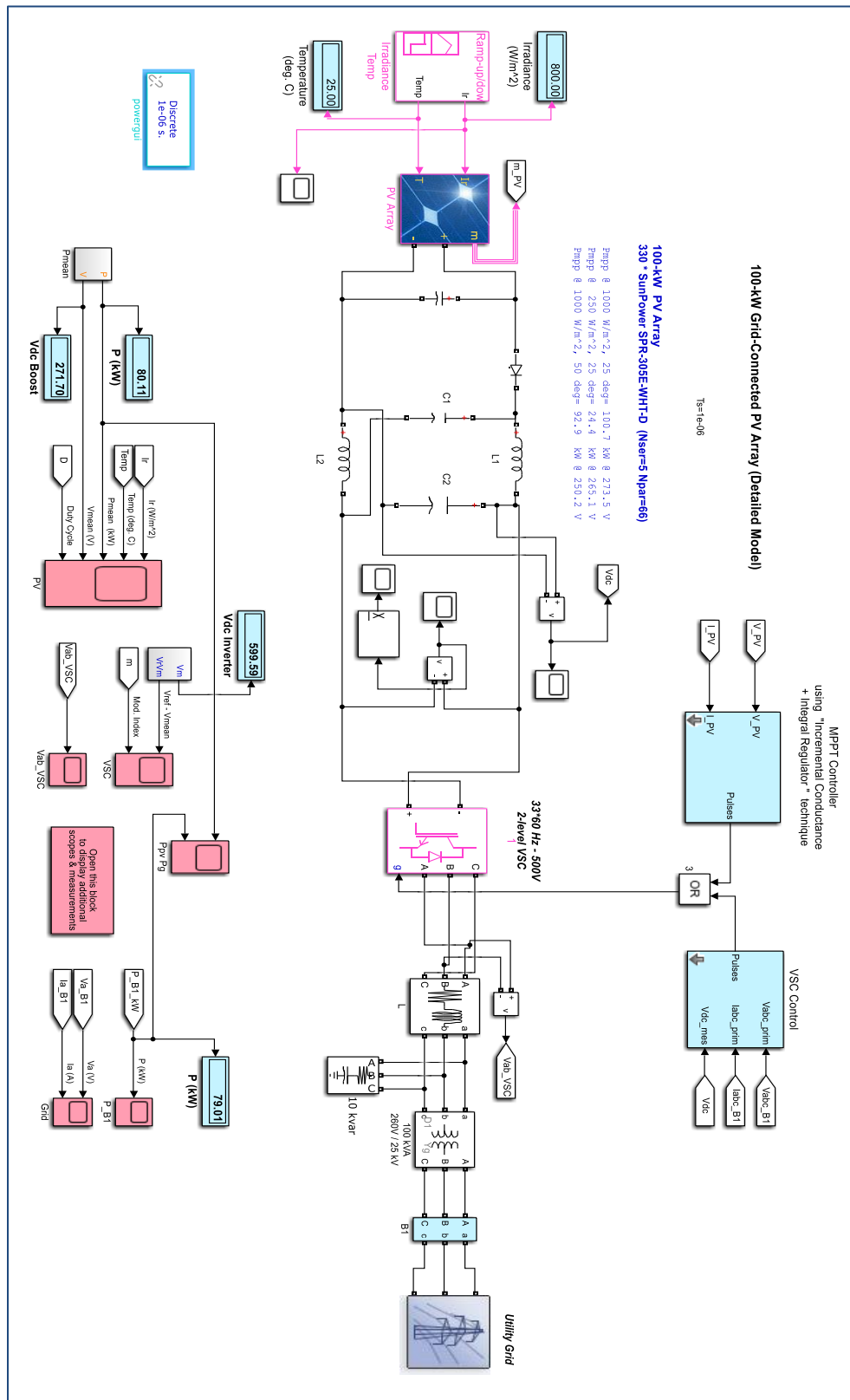
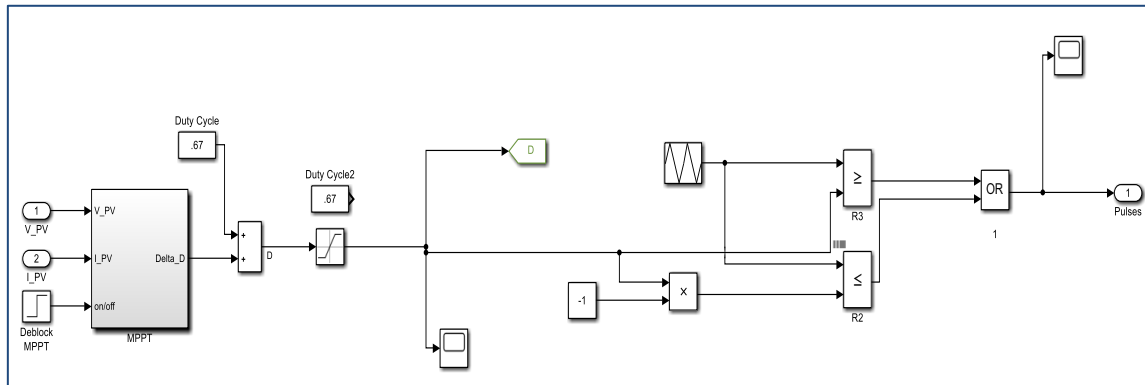


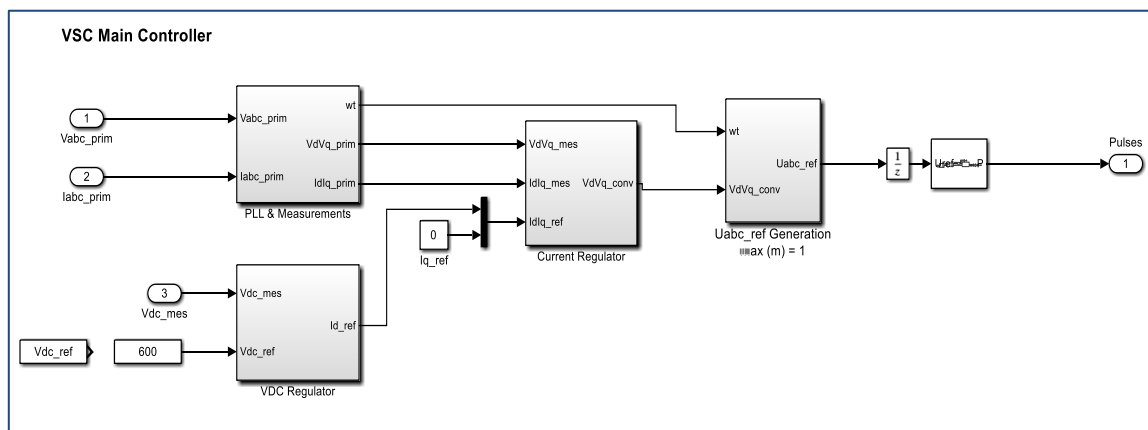
Figure IV.13 Schéma bloc sous SIMULINK du système PV étudié à base d'un onduleur Z-source

Le rapport cyclique ainsi calculée par le ‘MPPT’ est utilisé pour gérer les durées des impulsions du mode ‘shoot-through’ de l’onduleur Z-source.

D’autre part, le schéma bloc assurant une commande découplée des puissances (active et réactive) injectée au réseau, est illustre par la figure (IV.14.b). Ceci est basée sur un réglage de la tension moyenne du bus continue et une injection d’un courant réactif (nul) au réseau.



a) Commande MPPT via le mode ‘shoot through’



b) Commande découplée indirecte des puissances injectées au réseau

Figure IV.14 Schémas blocs sous *SIMULINK* de la partie commande de l’onduleur Z-Source

La figure IV.15 illustre les résultats de simulation obtenus dans le cas d’un PCS à base d’un onduleur Z-sources. On remarque une fois de plus que :

- La puissance injectée aux réseaux suit la puissance du GPV aux pertes près pour différents niveaux de l’éclairement et de la température.
- Une augmentation de la température et une diminution de l’éclairement provoquent (logiquement) une diminution de la puissance délivrée par le GPV et vice versa.

- Cette même puissance s'établit et reste stable pendant les intervalles où la température et l'éclairage sont constants.

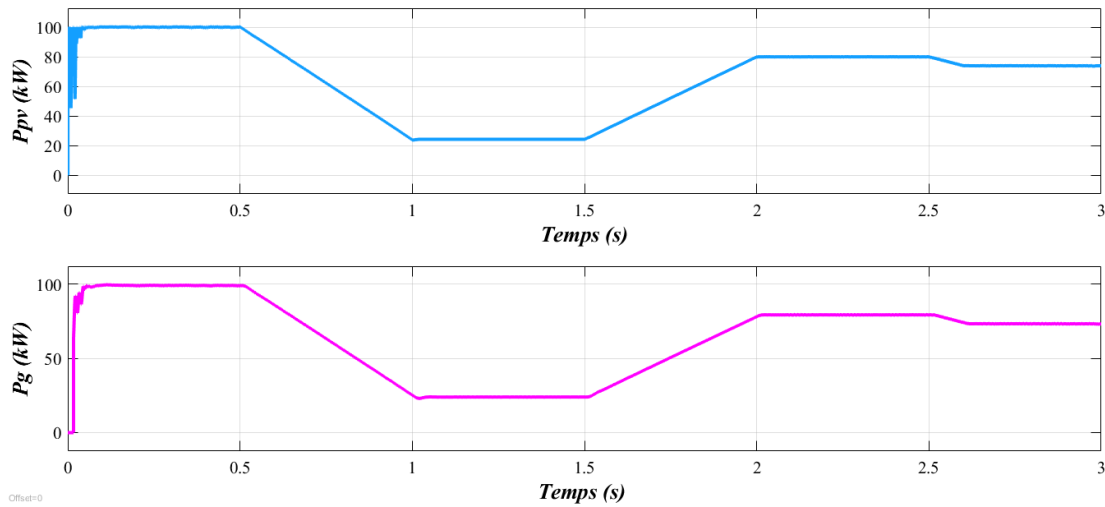
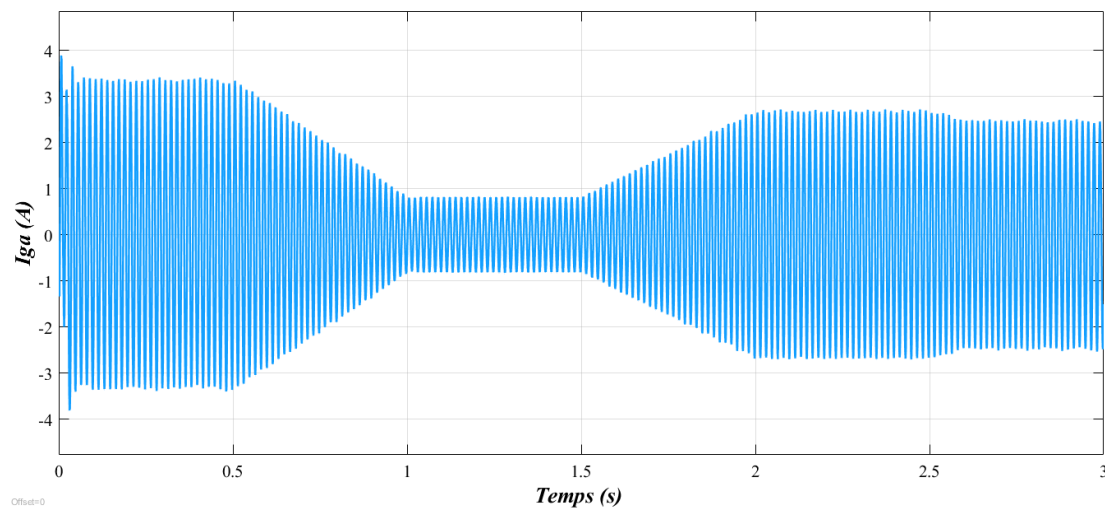
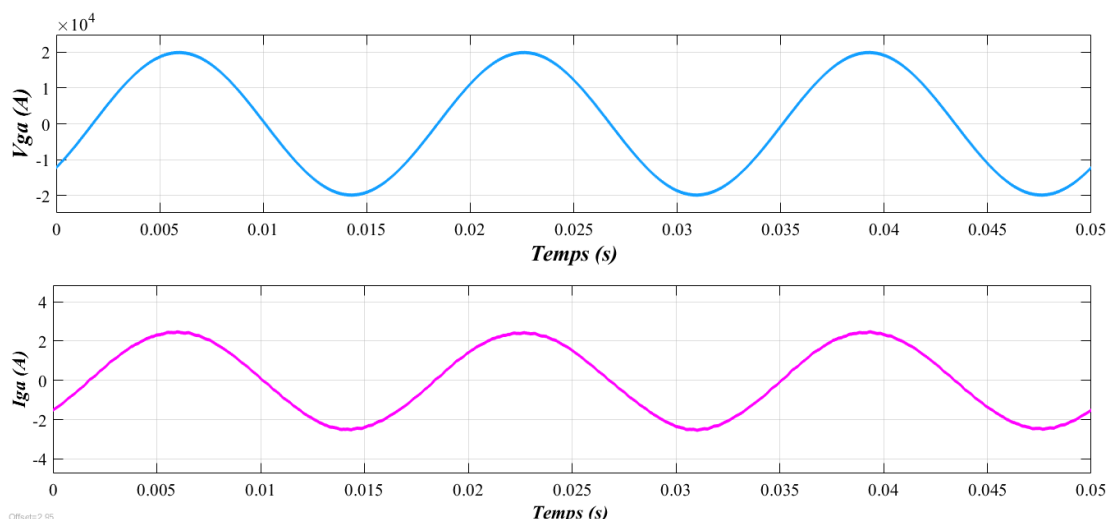


Figure IV.15 Allure de la puissance du GPV et la puissance active injectée au réseau dans le cas d'un onduleur Z-source

En outre, l'enveloppe du courant injecté au réseau (mesurée du côté de la haute tension, ce qui explique sa faible valeur qui est de l'ordre de quelques ampères) est une image fidèle de la variation de puissance, puisque la tension du réseau est quasi constante (source de tension), voir figure IV.16.



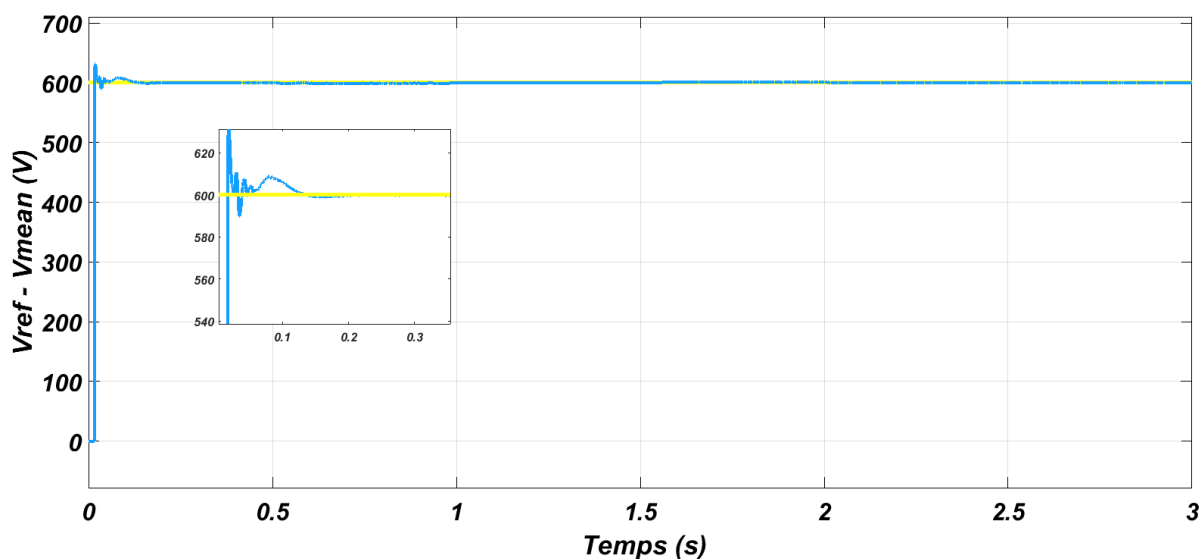
a) Courant injecté au réseau



b) Zoom du courant et de la tension injecté au réseau

Figure IV.16 Allure de la tension et du courant du réseau dans le cas d'un PCS à base d'un onduleur Z-Source

D'autre part, la figure (IV.17) illustre la tension d'entrée (aux bornes de C_2) de l'onduleur Z-Source. Ceci montre le bon réglage utilisé pour commander la tension de l'étage continu et gérer les durées du mode 'shoot through'.

**Figure IV.17** Allure de la tension d'entrée moyenne de l'onduleur Z-Source

En ce qui concerne les résultats obtenus dans ce cas de conditionneur de puissance constitué d'un onduleur Z-Source, nous constatons que le courant injecté au réseau est d'une forme périodique presque sinusoïdale et présente un niveau de distorsion harmonique

($THD_I=2.78\%$) ce qui est largement en dessous de la norme qui est de 5%. Ceci est dû au filtre placé à la sortie de l'onduleur et à la grande fréquence de commutation.

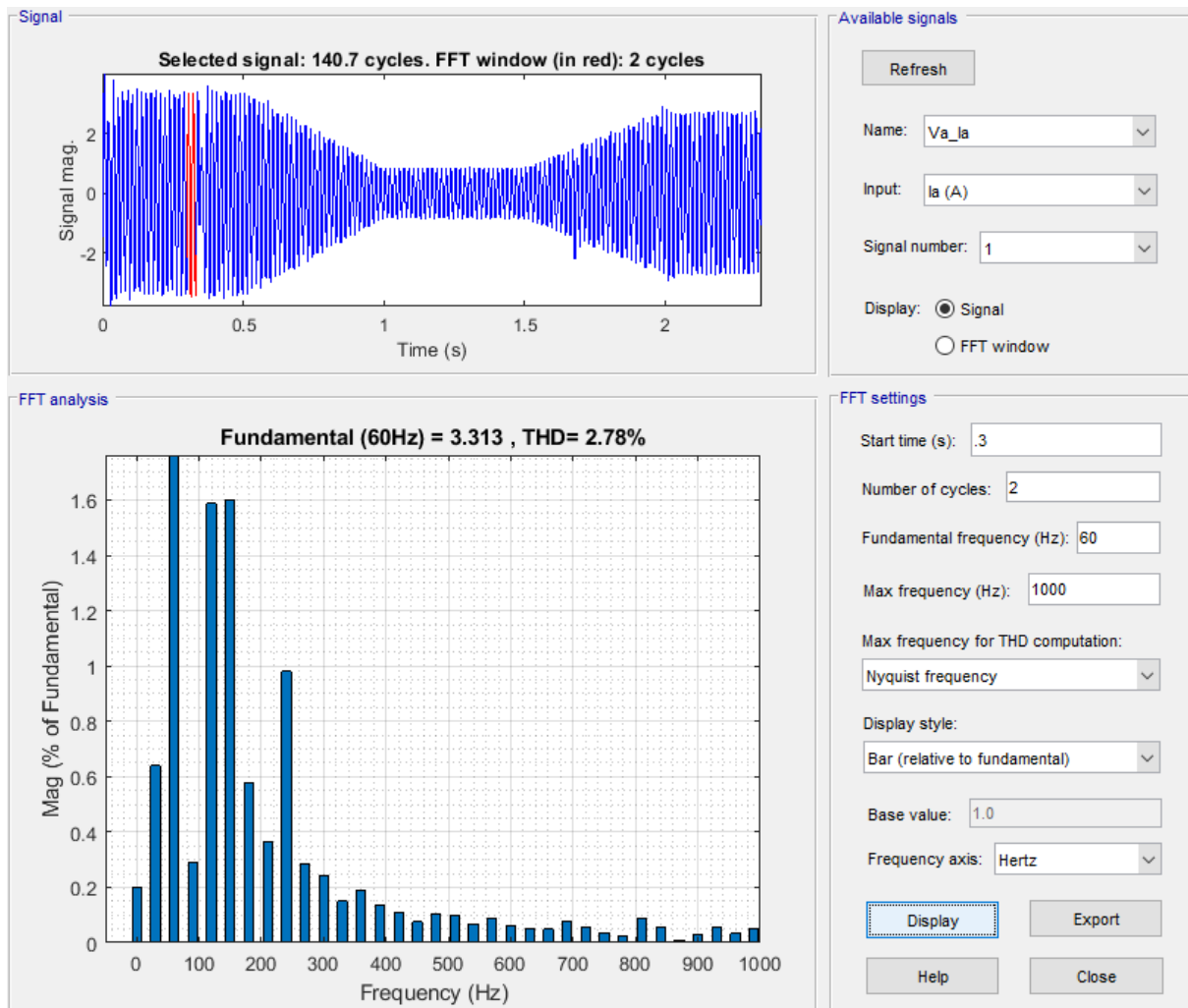


Figure IV.18 Analyse spectrale par *FFT* du courant injecté au réseau dans le cas d'un PCS à base d'un onduleur Z-Source

IV.3.4 cas du système PV étudié à base d'un onduleur Quasi-Z-Source

La figure (IV.19) illustre le schéma bloc le schéma du système PV étudié à base d'un onduleur Quasi Z-Source simulé sous *MATLAB/SIMULINK*.

Les simulations sont effectuées dans les mêmes conditions de fonctionnement précédentes.

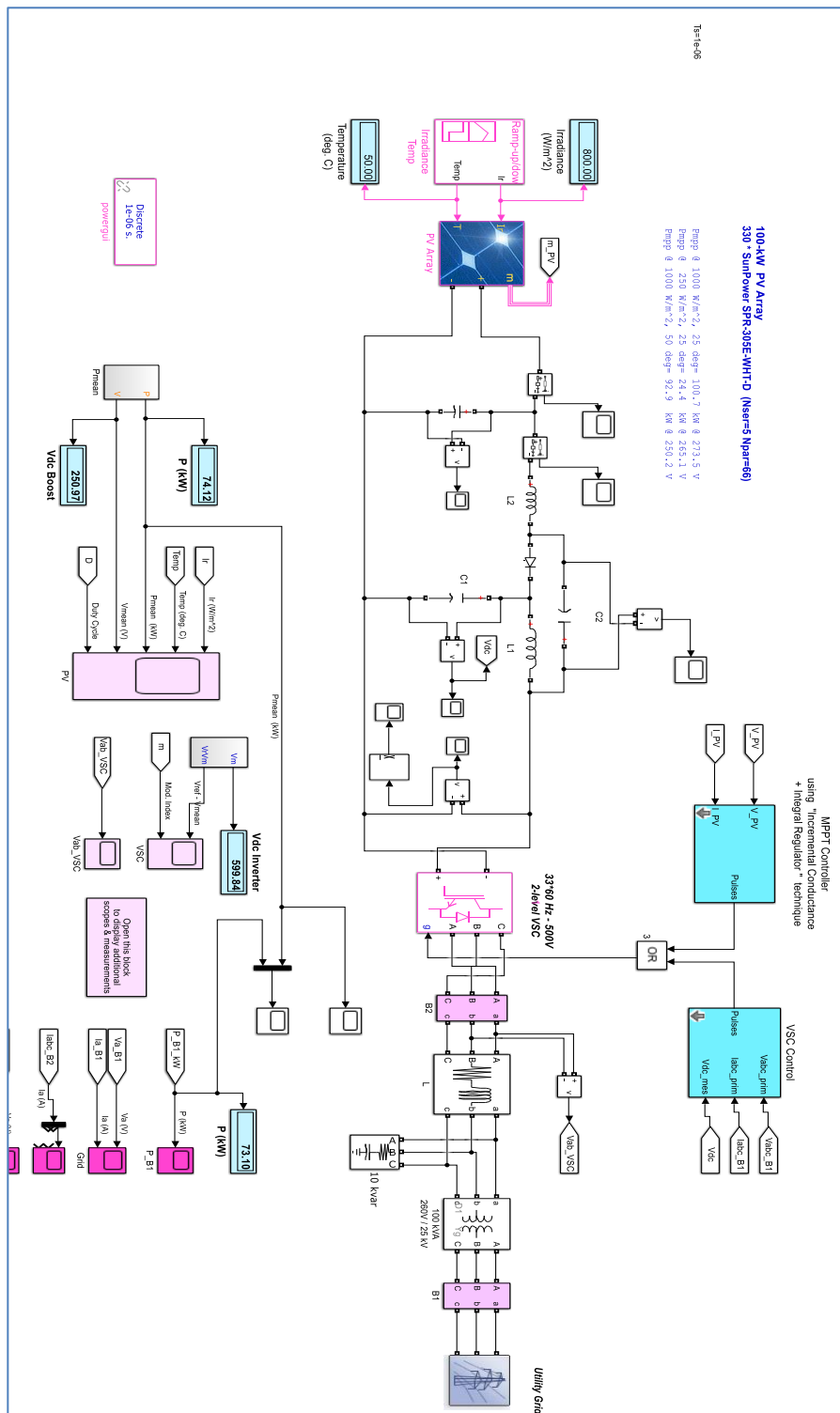
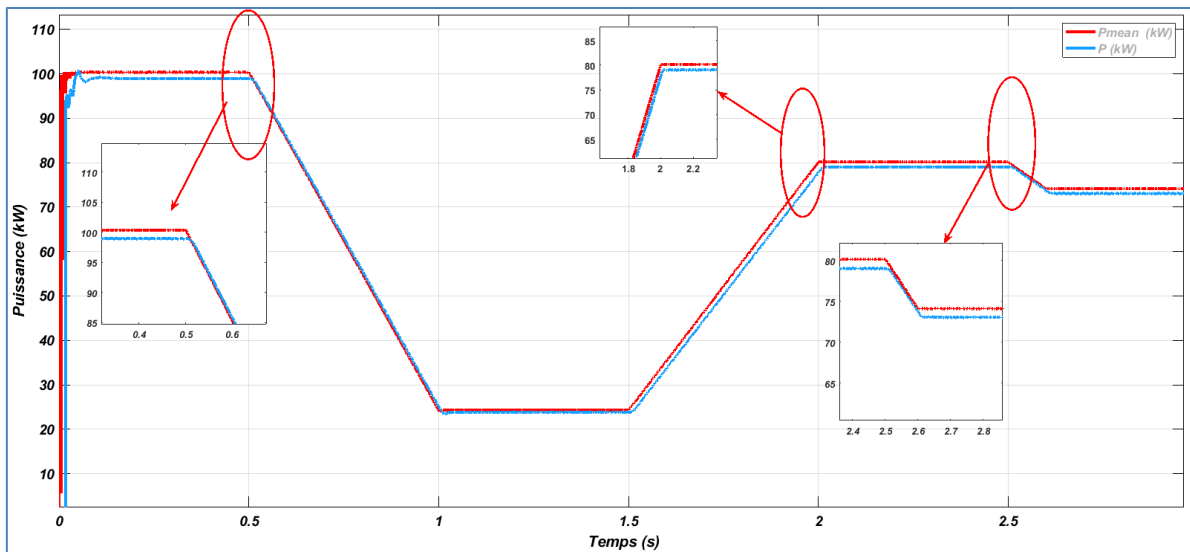
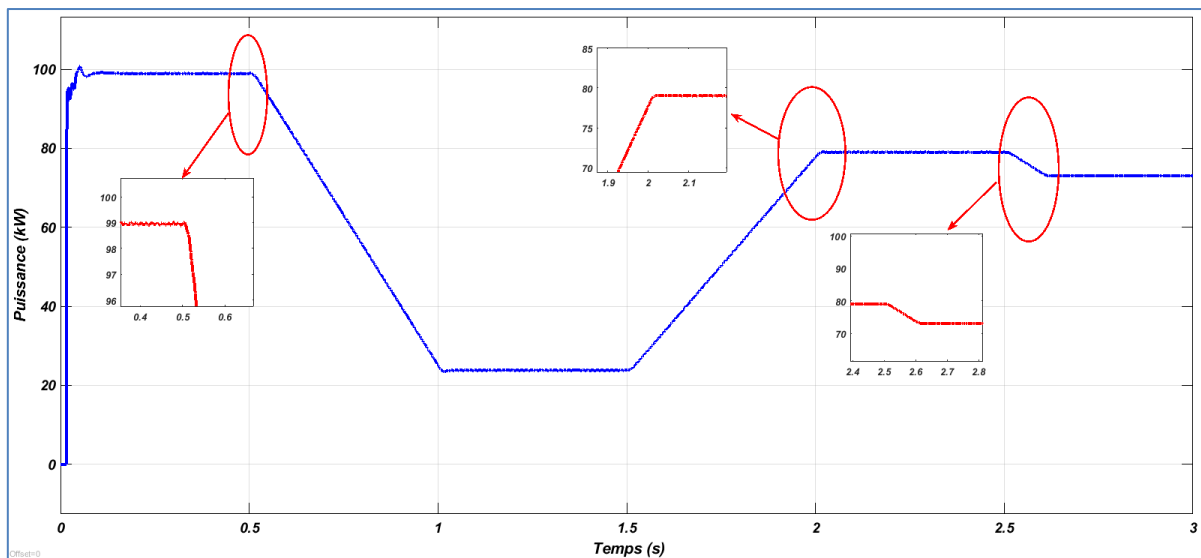


Figure IV.19 Schéma bloc sous SIMULINK du système PV étudié à base d'un onduleur *Quasi-Z-Source*

Dans ce cas aussi, aux pertes près dans le PCS, les filtres, les transformateurs de couplage et les lignes, la puissance injectée au réseau suit la puissance du GPV, qui varie en fonction de l'éclairement et de la température (voir figure IV.20).



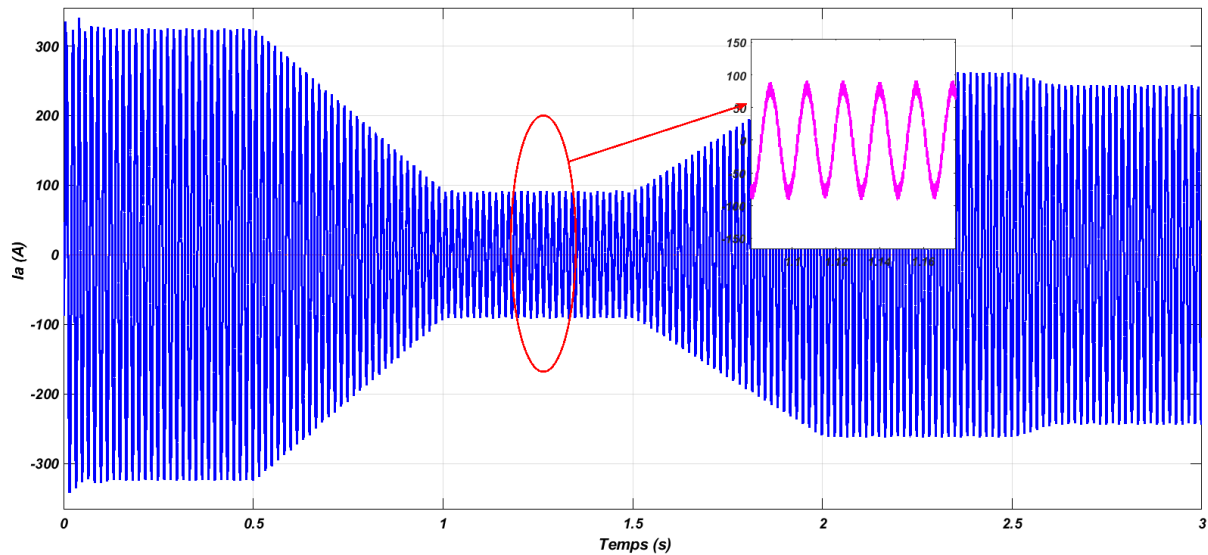
a) Puissance générée par le GPV



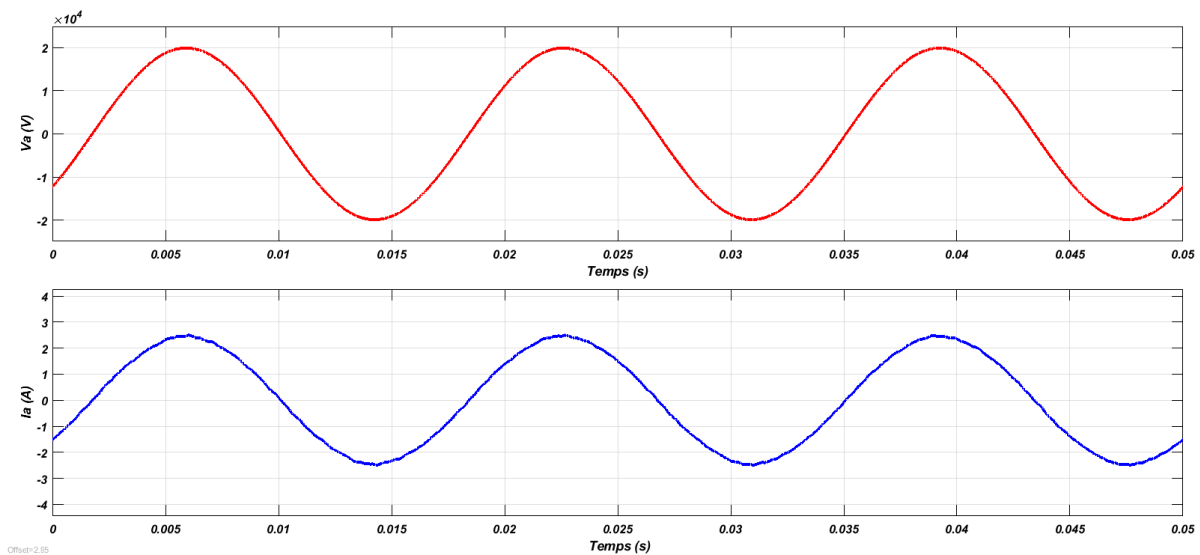
b) Puissance injectée au réseau

Figure IV.20 Allure de la puissance active et la Puissance de GPV injectée au réseau dans le cas d'un onduleur à base de Quasi-Z-Source

Notons, par ailleurs, que le courant injecté au réseau change en amplitude conformément aux variations de la puissance injectée au réseau, tout en restant quasi-sinusoidal et en phase avec la tension du réseau, voir la figure (IV.21).



a) Courant injecté au réseau



b) Zoom de la tension et du courant

Figure IV.21 Allure du courant injecté et de la tension du réseau dans le cas d'un PCS à base d'un onduleur Quasi-Z-Source

D'autre part, la figure (IV.22) illustre l'allure de la tension moyenne à l'entrée de l'onduleur Z-Source. On remarque que celle-ci suit sa référence de 600V indépendamment des conditions de fonctionnement du système PV étudié.

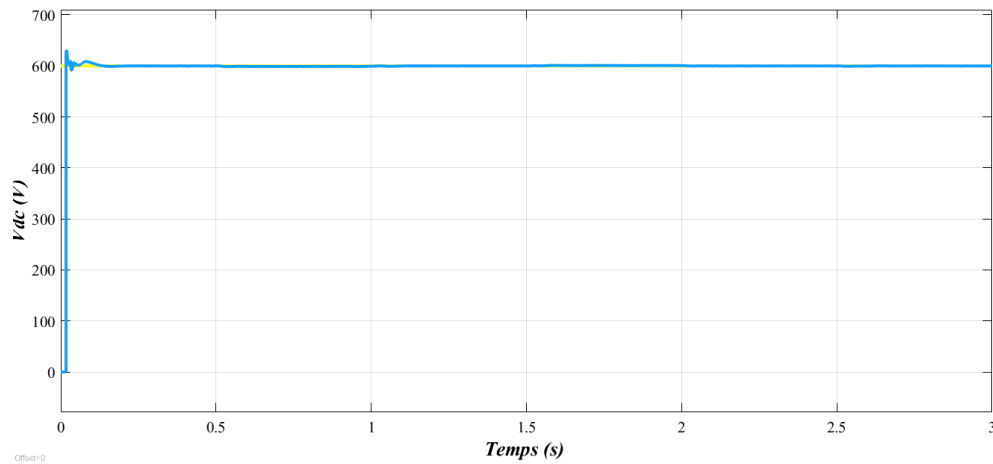


Figure IV.22 Allure de la tension d'entrée moyenne d'un onduleur Quasi- Z-Source

Procédons maintenant à l'analyse spectrale du courant injecté au réseau. On note que celui-ci présente une distorsion harmonique ($THD_F=1.15\%$). Ceci reflète la bonne qualité de la puissance injectée au réseau.

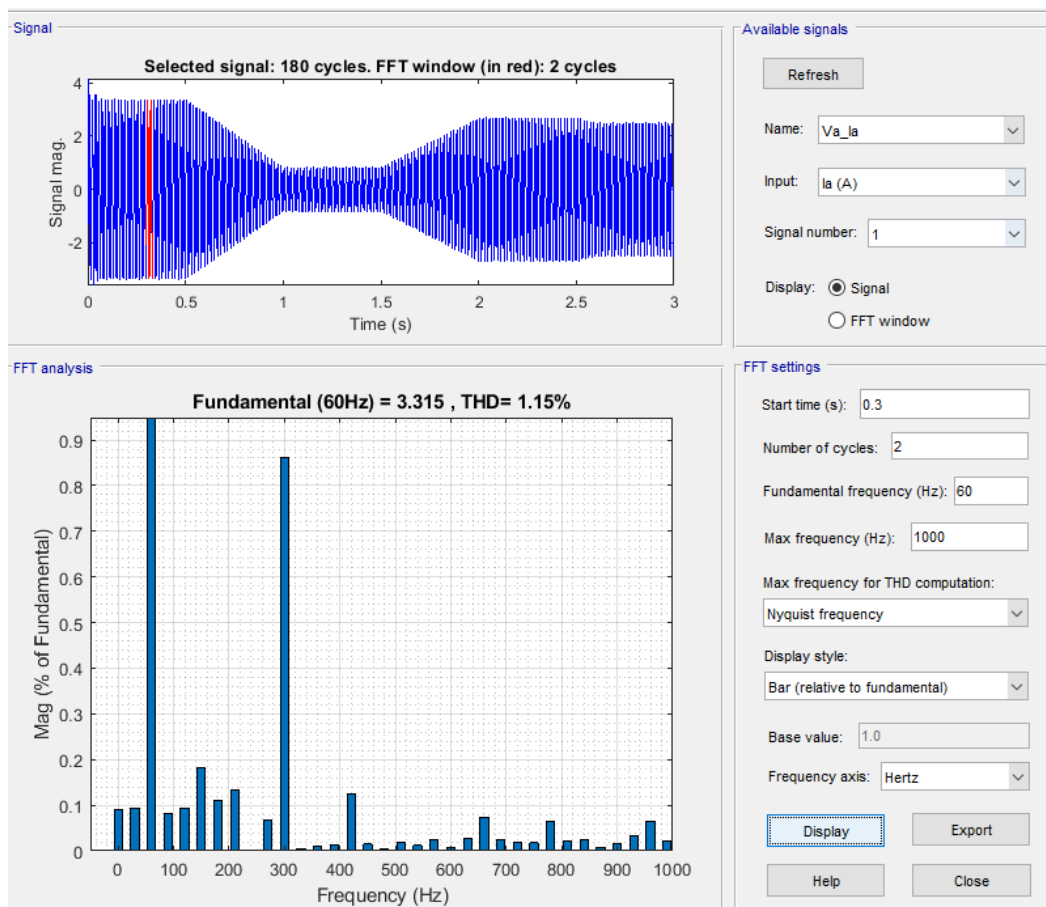


Figure IV.23 Analyse spectrale par *FFT* du courant injecté au réseau dans le cas d'un PCS à base d'un onduleur *Quasi-Z*-source

IV.4 Analyse et comparaison des résultats

Dans cette section, nous allons analyser la qualité de la puissance injectée au réseau et l'efficacité énergétique (rendement) dans les trois cas d'onduleurs étudiés. Le tableau suivant résume l'ensemble des résultats obtenus pour des conditions de fonctionnement standards (un éclairage $E=1000\text{ W/m}^2$ et une température $T=25^\circ\text{C}$).

Tableau IV.1 Comparaison de la qualité et l'efficacité énergétique du système PV étudié dans le cas des onduleurs étudiés

	Onduleur à deux niveaux	Onduleur à trois niveaux	Onduleur Z-Source	Onduleur Quasi-Z-Source
Temps du début d'échantillonnage (s)	0.3	0.3	0.3	0.3
Nombre de cycles	2	2	2	2
THD (%)	1.12	0.97	2.78	1.15
Rendement (%)	97	98	99	99.4

Les résultats de ce tableau montrent que la distorsion harmonique du courant injecté au réseau est meilleure dans le cas d'un onduleur *Quasi-Z-Source* comparativement à celle d'un onduleur *Z-source*. De plus, ce THD reste comparable à celui des deux onduleurs conventionnels (à deux et à trois niveaux) et largement en dessous de la limite requise de 5%. Par ailleurs, le rendement du système PV étudié est excellent dans tous les cas traités mais un peu plus élevé dans le cas des onduleurs à source d'impédance. Ceci est grâce à la commande *MPPT* et la qualité d'énergie délivrée par ces onduleurs *MLI* d'une part, et grâce à l'élimination de l'étage *DC-DC* dans les onduleurs à source d'impédance.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté et montré à travers des résultats de simulation l'efficacité de la méthode de suivi du point de puissance maximale basée sur la conductance incrémentale. De plus, nous avons étudié la qualité de l'énergie injectée dans le réseau du système photovoltaïque étudié, équipé d'un PCS à base d'un onduleur Z-Source et Quasi-Z-Source, tout en comparant les résultats avec ceux d'un onduleur conventionnel (à deux niveaux et à trois niveaux).

Les résultats de simulation ont prouvé que la méthode de la conductance incrémentale est robuste vis-à-vis des variations des conditions météorologiques (éclairage et température).

En raison de ses hautes performances, la technique de *MLI* sinus-triangulaire est utilisée pour la commande des onduleurs. Pour la même raison, cette technique a été adaptée et utilisée pour piloter les onduleurs Z-Source et Quasi-Z-Source.

De plus, les résultats de simulation obtenus démontrent la contribution significative de l'onduleur Quasi-Z-Source en améliorant la qualité d'énergie injecté au réseau malgré le taux de distorsion du courant harmonique injecté au réseau qui reste néanmoins dans les limites de la norme requise ($< 5\%$).

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation et la commande d'une chaîne de conversion *PV* connectée au réseau via un onduleur à sources d'impédance (*Z-source*).

Tout d'abord, nous avons réussi à prévoir le comportement électrique d'un générateur photovoltaïque de 100 kW et ses caractéristiques principales, en tenant compte de la température et de l'ensoleillement en passant par une schématisation électrique, puis une modélisation mathématique et enfin une simulation sous l'environnement *MATLAB/SIMULINK*.

Ensuite, nous avons modélisé le comportement dynamique du conditionneur de puissance à base d'un onduleur à source d'impédance (*Z-source* / *Quasi-Z-source*) qui constitue tout seul le conditionneur de puissance du système *PV* étudié, contrairement au système classique qui est composé :

- d'un hacheur survolteur muni d'une commande *MPPT* à base de la conductance incrémentale, pour bien adapter le niveau de la tension du *GPV* à celui du bus continu (500 V) de l'onduleur tout en garantissant un transfert de la puissance photovoltaïque maximale disponible à l'onduleur aux pertes près ;

- d'un onduleur de tension conventionnel (dans ce travail nous nous sommes limités aux cas d'onduleurs à deux et trois niveaux) qui permet de commander indirectement la puissance active à sa valeur maximale et la puissance réactive à sa valeur nulle. Ce même convertisseur *DC-AC* permet grâce à sa topologie et à la commande à *MLI* d'améliorer la qualité d'énergie injecté au réseau, à travers la réduction du *THD* de la tension et du courant.

En effet, nous avons remplacé avec succès ce conditionneur de puissance classique par un onduleur à source d'impédance (tantôt de type *Z-source* et tantôt de type *Quasi-Z-source*), muni d'un réseau d'impédance *LC* particulier 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 le cas des onduleurs classiques) tout en commandant les puissances active et réactive injectées au réseau.

Puis, nous avons enchaîné avec la simulation de la dynamique de toute la chaîne de conversion d'énergie *PV* constituée d'un *GPV* en cascade avec un conditionneur de puissance permettant un fonctionnement en mode *MPPT*, une synchronisation avec le réseau et une injection de courants sous un facteur de puissance unitaire.

Cette simulation nous a permis l'évaluation des performances théoriques du système *PV* en utilisant le logiciel (*MATLAB/Simulink*) et l'estimation des variables d'entrée et de sortie des différentes parties de ce système (*GPV*, convertisseur *DC/DC* et/ou convertisseur *DC/AC*, filtre *LC* et réseau). Les résultats de simulation de ce système *PV* connecté au réseau ont prouvé que la *MPPT* basée sur la méthode de la conductance incrémentale est robuste vis-à-vis des variations des conditions météorologiques (éclairage et température). Ces mêmes résultats ont montré aussi un bon suivi de la tension du bus continu ou encore une bonne commande de la puissance active et ont mis en évidence le fonctionnement sous un facteur de puissance unitaire du côté alternatif du système.

Par ailleurs, différentes topologies d'onduleurs ont été simulées (à deux et trois niveaux classiques et à base de source d'impédance (*Z-source* et *Q-Z-source*)) tous les deux munis d'une commande à *MLI* de tension dédiée. La structure *Z-Source* a donné des performances satisfaisantes en termes de *MPPT* et de qualité d'énergie injectée au réseau.

A l'issue de ce travail, nous suggérons une continuation des investigations dans plusieurs sens et selon plusieurs approches. Nous citons par exemple :

- Remplacer la boucle de la tension du bus continu par celle de la puissance active et intégrer une boucle de réglage de la puissance réactive qui permet de générer la référence du courant réactif. Ceci devrait permettre de faire fonctionner le système *PV* que ce soit en mode *MPPT* ou en mode de commande découplée des puissances avec possibilité d'injection du réactif au réseau.
- Optimiser la taille du filtre *LC* tout en respectant la norme exigée sur le *THD* du courant injecté au réseau.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] TPE 1ère S lycée Ambroise Paré.
- [2] A. Morsli, '*Etude d'un Système Solaire Photovoltaïque*', Edition Universitaires Européennes, 2015.
- [3] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [4] T. Mambrini. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Météorologie. Université Paris Sud - Paris XI, 2014. Français. ffNNT : 2014PA112380ff. Fftel-01164783f
- [5] A. Ould Mohamed Yahia et al. (Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 483)
- [6] A. Luque, Practical andbook of Photovoltaics (Second Edition)-2012
- [7] J.-C. Muller. Techniques de l'ingénieur. Dossier BE8579.
- [8] S. Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de doctorat de l'université A. MIRA Bejaia, Algérie, 2009.
- [9] D. Rekioua, O. Amrani « Etude et identification des différents modèles électriques photovoltaïques », Conférence sur les énergies renouvelables, Université de Bejaia, Algérie, 2007.
- [10] S. Makhloufi, '*Optimisation des installations Photovoltaïque*', Thèse de Doctorat en Science, Université Hadj-Lakhdar Batna, Algérie - 2013.
- [11] Abbassen Lyes, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque », Mémoire de Magister En Electrotechnique, Option machines électriques Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2011.
- [12] Commande D'un Convertisseur AC/DC Triphasé à quatre bras En Régime Déséquilibré ", Mémoire de magister, Ecole Militaire Poly Technique (EMP), Alger, 2009..
- [13] Petibon Stéphane, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.
- [14] B. Flèche, D. delagnes, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007.

- [15] A. Guen, « Contribution à l'étude des systèmes de télécommunications mobiles » Thèse de Magister, Université de Tlemcen, Février 1992..
- [16] Y. Rozanov, S. Ryvkin, E. Chaplygin, and P. Voronin, *Power Electronics Basics*. CRC Press, 2016..
- [17] Y. Rozanov, S. Ryvkin, E. Chaplygin, and P. Voronin, *Power Electronics Basics*. CRC Press, 2016.
- [18] W. Shepherd and Z. Li, *Power Converter Circuits*. Marcel Dekker, 2004.
- [19] Başoğlu, Mustafa Engin, and Bekir Çakır. "Comparisons of MPPT Performances of Isolated and Non-isolated DC–DC Converters by Using a New Approach." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 ,pp.1100-113,2016..
- [20] Yao, Kai, Weijie Tang, Xiaopeng Bi, and Jianguo Lyu. "An Online Monitoring Scheme of DC-Link Capacitor's ESR and C for a Boost PFC Converter." *IEEE Transactions on Power Electronics* IEEE Trans. Power Electron. 31.8 pp. 5944-951,2016..
- [21] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un PPT », Mémoire M de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [22] Suresh, L., GRS Naga Kumar, and M. V. Sudarsan. "Modeling and simulation of Z-source inverter." *From the Selected Works of suresh L* (2012).
- [23] Kouhanjani, Masoud Jokar, and Ali Reza Seifi. "Comparison of VSC and Z-source converter: power system application approach." *Advances in Electrical and Electronic Engineering* (2017).
- [24] Zope, Pankaj Hiranman. "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).
- [29] Teta Ali. "Investigation on Active Power Filter based on Z-Source Inverter Topology. » doctoral thesis degree in 3rd Cycle Doctoral in Electrical Engineering, Ziane Achour University of Djelfa –Algeria (2021).
- [25] 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.

- [27] 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.
- [26] 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.
- [28] Benzineb, Fairouz. "Etude et Commande d'un Onduleur Z-Source : Application aux Systèmes Photovoltaïques", 2016.
- [30] Supatti, Uthane. Low cost z-source converter/inverter system for wind power generation. Michigan State University. Electrical Engineering, 2011.
- [31] 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.
- [32] Simplified model of battery energy-stored quasi-Z-source inverter-based photovoltaic power plant with Twofold energy management system, L e and P Research Group in Sustainable and Renewable Electrical Technologies (PAIDI-TEP-023), Department of Electrical Engineering, University of Cadiz, EPS Algeciras, Avda. Ramon Puyol, S/n, 11202, Algeciras, Cadiz, Spain
- [33] Zope, Pankaj Hiranman. "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).
- [34] Rajesh, Kammari. "Design and Analysis for Various Controlling Methods of a Z-Source Inverter." International Journal of Electrical Engineering. ISSN 0974-2158 Volume 10, Number 2 (2017), pp. 271- 288. M.Tech, G.Pulla Reddy Engineering College, Kurnool, India.
- [35] 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.

- [36] 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.
- [37] 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.

Annexe

Annexe

Paramètres du Système PV Etudié

A.1 Paramètres électriques du module photovoltaïque ‘Sun power SPR-305-WHT’

Les paramètres du module photovoltaïque ‘Sun power SPR-305-WHT’ sous les conditions standards de fonctionnement (un éclairement de 1000W/m² et une température de 25°C) sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau A.1 Paramètres électriques du module photovoltaïque ‘Sun power SPR-305-WHT’

Paramètre	Valeur
Puissance nominale crête du panneau, P_n	305Wc
Courant au point de puissance maximale, I_{mp}	5.58A
Tension au point de puissance maximale, V_{mp}	54.7 V
Courant de court-circuit, I_{sc}	5.96 A
Tension en circuit ouvert, V_{oc}	64.2 V
Coefficients de variation de I_{sc} / température	0.003516 A/°K
Coefficients de variation de V_{oc} / température	-0.177 V/°K
Coefficients de variation de V_{mp} / température	-0.186 V/°K
Coefficients de variation de I_{mp} / température	-0.00212 A/°K
Rendement nominal, η	18.7 %
Valeur nominale de l’ampérage du fusible en série	15A

A.2 Paramètres électriques de l'hacheur du système PV étudié

Tableau A.2 Paramètres électriques de l'hacheur boost

Paramètre	Valeur
Résistance, R	5 m Ω
Inductance, L	5 mH
Capacité de sortie, C_s	6000 μ F
Capacité d'entrée, C_e	100 μ F
Résistance de l'IGBT à l'état ON, R_{on}	1 m Ω
Résistance du snubber de l'IGBT, R_s	100 k Ω
Résistance de la diode à l'état ON, R_{on}	0.1 m Ω
Fréquence de découpage, f_s	5 kHz
Tension de sortie	500 V

A.3 Caractéristiques électriques de l'onduleur à deux niveaux

Tableau A.4 Paramètres électriques de l'onduleur conventionnel

Paramètre	Valeur
Topologie	Pont universel triphasé
Éléments semi-conducteurs	IGBT/Diode
Résistance à l'état ON, R_{on}	1 m Ω
Résistance du snubber, R_s	1 M Ω
Fréquence de découpage, f_s	1.98 kHz
Capacité du bus continu, C_s	6000 μ F
Tension du bus continu, V_{dc}	500 V

A.4 Caractéristiques électriques du filtre de sortie de l'onduleur

Tableau A.5 Paramètres électriques du filtre de sortie de l'onduleur

Paramètre	Valeur
Branche inductive (R, L)	(1.9 m Ω , 0.25 mH)
Branche capacitive (R, C)	(5.2 m Ω , 1.4 mF)