الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Électrique

Option : Commande et électronique industrielle.

THEME

Etude d'une chaine, source photovoltaïque-onduleur multiniveaux reliée au réseau électrique

Proposé et dirigé par,

Dr. OULDCHERCHALI Noureddine

Dr. MORSLI Abdelkader

Préparé et présenté par,

Mr. BOULESNAME Rafik

Mr. GAHAM Ahcene

AnnéeUniversitaire2014-2015

Remerciements

Nous remercions dans un premier Temps, notre DIEU qui nous a donné la volonté et le courage afin d'arriver à ce modeste travail.

Nous remercions nos promoteurs : Dr. N. OULD CHERCHALI et Dr. A. MORSLI qui nous ont orientés et aidé dans toute la durée de notre travail par leurs critiques et leurs suggestions nombreuses.

Nous tenons à remercier tous les membres de jury pour avoir accepter de juger notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie électrique de l'Université de Médéa, et à tous les enseignants qui ont participés à notre formation.

Dédicace

JE COMMENCE PAR RENDRE GRACE À DIEU ET A SA BONTE, POUR LA PATIENCE, LA COMPETANCE ET LE COURAGE QU'IL NOUS A DONNE POUR ARRIVE À CE STADE.

Avec tout mon amour éternel et avec l'intensité de mes émotions.
Je dédie ce mémoire

A mon père Berkane mon professeur de toujours, et ma très chère mère aicha Pour leurs soutien et encouragements.

Je n'oublie pas leurs sacrifices : l'amour qui m'a donné,

Pour leur encouragement : je vous souhaite la joie et de bonne santé.

A mes frères: Fouad,Mohamed et Hocine.

En témoignage de mon amour éternel que Dieu vous garde, vous protège et vous offre une vie pleine de joie et je vous souhaite la réussite.

A mes sœurs Wahiba et Fella.

AUX épouses de mes frères, et leurs enfants : Med Amine,Wassim et la petite princesse aridj.

A mes proches et toute ma famille.

A mes Ami(e)s: Rafik,les deux Mohamed Amine,Farouk,Salim,.....

Pour tous les moments inoubliables qu'on a passé ensemble

Je vous souhaiterai beaucoup de succès, de courage et de bonheur tant professionnel que familial.je vous dédie ce travail en témoignage de mon affection et de mon amour incessant.

Ahcene GAHAM

Dédicace

Avec l'aide de Dieu, tout puissant, j'ai pu achever modeste travail que je dédie:

A ceux qui m'ont tout donné sans rien me demander et à qui je dois énormément et qui je ne remercierais jamais assez :

- *A mon très cher père.*
- *A ma mère qui m'a éclairée mon chemin.*

J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour, toute au long de mes études.

- *A mes amis : Ahcene, Farouk, Salim, Mohamed Amine B et Mohamed Amine S.*
- *A mes frères, spécialement « Houcem, Aissa et Mahmoud ».*
- *A ma sœur « wiem ».*

Rafik BOULESNAME

ملخص:

الهدف من هذه المذكرة: دراسة، نمذجة وتحسين متابعة النقطة الاعظمية للطاقة المستخدمة للنظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة الكهربائية، ونمذجنا نظام كهروضوئي متصل بالشبكة بالكهربائية باستخدام محولات الطاقة، ومموج متعدد المستويات، المولد الكهروضوئي والمموج ذو ثلاث مستويات، قد تم نمذجتهم على التوالي. الأول بالاعتماد على نموذج رياضي الذي يعطي قيم للطاقة الاعظمية وفقا لظروف الطقس المتغيرة,و الثاني باستخدام منبع التوتر المراقب من طرف التوتر من اجل صب تيار جيبي في الشبكة الكهربائية.

كلمات مفتاحية: مولد كهروضوئي، الشبكة الكهربائية، الطاقة الاعظمية، مموج ذو خمس مستويات، الصلة بالشبكة الكهربائية.

Résumé

Dans ce mémoire nous avons comme objectif: d'étudier, modéliser et optimiser la puissance MPPT exploitée d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. Nous avons également utilisée un système photovoltaïque connecté au réseau électrique à travers des convertisseurs de puissance hacheur survolteur DC/DC, et d'un onduleur multiniveaux DC/AC à structure NPC. Le générateur photovoltaïque et l'onduleur triphasée sont modélisés respectivement, l'un à l'aide d'un modèle mathématique qui donne les valeurs de la puissance maximale selon la variation des conditions météorologiques, et l'autre à l'aide d'une source de tension contrôlée en tension, afin de réguler par des contrôleurs PI le courant sinusoïdal injecter dans le réseau.

Mots clés : Générateur photovoltaïque, Réseau électrique, Commande MPPT, Connexion au réseau, Hacheur, Onduleur cinq niveaux, Régulateur PI.

Abstract

Our objective in this work is: to study, model and optimize exploited power MPPT of photovoltaic system connected to grid. We also used photovoltaic system connected to grid through power converters, boost DC/DC and an inverter DC/AC, this model. The photovoltaic generator and the inverter three-phase current are respectively modeled by using a mathematical model which gives the values of maximum power according to the variation of the weather conditions, and by a voltage source controlled in voltage in order to inject a sinusoidal current into the grid network.

Key words: Photovoltaic generator, Grid network, Command MPPT, Grid connection, Chopper, Inverter five level, PI Regulator.

Sommaire

SOMMAIRE

Liste des figures ……... I

Liste des tableaux ……..... II

Liste des acronymes ……..... III

Introduction générale ……..…….. 1

Chapitre I : Généralité sur la photovoltaïque

I.1 Introduction ……... 3

I.2 Définition d'un système PV …….. 3

I.3 L'effet photovoltaïque ……... 5

I.4 La cellule photovoltaïque …….. 7

I.5 Générateur photovoltaïque et ses performances …… 8

I.5.1 Caractéristique Courant-Tension …….. 8

I.5.2 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes I=f(V) et P=f(V) ……... 9

I.5.3 Influence de groupement série des cellules PV …….. 11

I.5.4 Influence de groupement parallèle des cellules PV ……. 12

I.5.5 Influence de groupement mixte (Série + Parallèle) des cellules PV ……... 13

I.6 Topologie générale du système photovoltaïque …… 13

I.6.1 Conversion mono étage …….. 14

I.6.2 Conversion deux étages …….. 14

I.6.3 Conversion multi-étages ……. 15

I.7 Conclusion …… 16

Chapitre II : Modélisation du panneau et la Technique MPPT

II.1 Introduction …… 17

II.2 Modélisation de la cellule PV …… 17

II.2.1 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque …… 17

II.2.2 Courant de court-circuit (Isc) …… 19

II.2.3 Tension de circuit-ouvert (Vco) …… 20

II.2.4 Facteur de forme …… 20

II.3 Modèle du module photovoltaïque ……... 21

II.4 Le Point de Puissance Maximal (MPPT) ……. 24

II.4.1 Différentes techniques du MPPT …….. 24

II.4.2 Perturbation et observation (P&O) ……... 25

II.4.3 Incrémentale Conductance (IncCond) ……... 27

II.5 Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC …….. 27

II.6 Conclusion …….. 28

Chapitre III : Les convertisseurs statiques et les stratèges de commande

III.1 Introduction …….. 29

III.2 Convertisseurs DC/DC (hacheur) ……... 29

III.2.1 Le hacheur survolteur (Boost) ……. 29

III.3 Hacheur dévolteur (Buck) ……... 34

III.4 Convertisseur Buck-Boost ……... 36

III.5 Fonction de transfert des convertisseurs (DC-DC) ……... 37

III.6 Modalisation de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC ……... 38

III.6.1 Structure de l'onduleur NPC à cinq niveaux ……... 38

III.6.2 Les différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux …….. 41

III.6.3 Modélisation en vue de la commande …….. 42

III.6.4 Commandabilité des convertisseurs statiques …….. 42

III.6.5 Modèle de connaissance de l'onduleur triphasé à cinq niveaux …….. 44

III.7 Stratégies de commande de l'onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC ... …….. 46

III.7.1 Commande triangulo-sinusoidale à quatre porteuses triangulaires …….. 47

III.7.2 Algorithme ……... 47

III.7.3 Pont de clamping …….. 50

III.7.4 Circuits d'équilibrage résistif pour Cascade d'un générateur photovoltaïque Onduleur Triphasé à Cinq Niveaux à Structure NPC .....…. 51

III.8 Conclusion ……. 54

Chapitre IV : Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau

IV.1 Introduction …….. 55

IV.2 Le photovoltaïque dans les systèmes énergétiques …… 55

IV.3 Technologies des onduleurs couplés au réseau …….. 57
IV.3.1 Onduleurs modulaires (module inverter) ……. 57
IV.3.2 Onduleurs centralisés (central inverter) ……... 57
IV.3.3 Onduleurs "String" ou "de Rangée" ……. 58
IV.4 Classifications des centrales photovoltaïques connectées au réseau(*CPCR)* …… 58
IV.4.1 Centrales de petite taille (Pw=1 à 10 KW) …….. 59
IV.4.2 Centrales de taille moyenne (Pw=10 à 100 KW) …… 59
IV.4.3. Centrales de grande taille (Pw=500 KW) …….. 59
IV.5 Structure générale d'un système photovoltaïque …….. 59
IV.6 Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau ……. 60
IV.7 Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau ……. 60
IV.8 Etude de la partie contrôle et la commande …….. 60
IV.8.1 Régulateur proportionnel-Intégral ……... 61
IV.8.2 Régulateur PI avec compensation de pôle ……... 62
IV.8.3 Régulateur (PI) sans compensation de pôle ……. 62
IV.9 Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau ……. 64
IV.9.1 PLL triphasé dans le domaine de Park ……. 64
IV.9.2 Elaboration et réglage des correcteurs d'une PLL triphasée ……... 65
IV.10 Modélisation du filtre LC et la charge 65
IV.10.1 Fonction de transfert du filtre …… 65
IV.10.2 Modèle d'état de l'ensemble (onduleur, filtre LC et la charge (RL)) ……... 66
IV.11 Conclusion ……... 69

Chapitre V : Simulation du système

V.1 Introduction …… 70
V.2 L'outil Simulink/Matlab …… 70
V.2.1 Simpower …….. 70
V.3 Système photovoltaïque propose ……... 71
V.4 Modèle de Simulink de convertisseur boost avec le contrôleur de MPPT …… 74
V.5 Simulation de la méthode MPPT …….. 74

V.6 La charge …… 75

V.7 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge) ……... 76

V.8 Résultats de simulation de PV ...…… 76

V.8.1 Caractéristiques du générateur photovoltaïque ……. 77

V.9 Simulation du l'onduleur commandé par (MLI) sinus-triangle …… 80

V.10 Simulation de la PLL avec MATLAB-Simulink ……... 85

V.11 Schéma synoptique de connexion au réseau …….. 86

V.12 Résultat de simulation …….. 87

V.12.1 Test simulation lorsque G=1000W/m² ……87

V.12.2 Test simulation lorsque G=1000W/m² vers 700W/m² (Changement rapide) ……..91

V.12.3 Test simulation lorsque G=1000W/m² vers 700W/m² (Changement lent) ……..95

V.13 Conclusion ……. 98

Conclusion générale ……...99

Annexe …….

Bibliographie .....

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. *Schéma d'un système photovoltaïque* 4

Figure I.2 *La technique d'associer un champ photovoltaïque* 5

Figure I.3. *Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque* 6

Figure I.4. *Représentation schématique d'une cellule solaire* 7

Figure I.5.*Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque* 8

Figure I. 6. *L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V)* 9

Figure I. 7. *L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V)* 10

Figure I.8. *L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V)* 10

Figure I. 9. *L'influence de la température sur la caractéristique P=f(V)* 11

Figure I. 10. *Association de N modules solaires en série* 12

Figure I. 11.*Association de Np modules solaires en parallèle* 12

Figure I. 12.*Association mixte Ns x Np modules solaires* 13

Figure 1.13.*Schéma bloc d'une chaîne de conversion mono* étage 14

Figure 1.14.*Schéma bloc d'une chaîne de conversion à deux étages* 14

Figure 1-15.*Nouvelle structure de conversion multi-étages mixte* 15

Figure II.1. *Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque* 18

Figure II.2.*Organigramme de l'algorithme P&O* 25

Figure II.3.*Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT* 28

Figure III.1.*Circuit électrique de base du hacheur survolteur* 29

Figure III.2.*Allure des variables dynamiques* I_L 31

Figure III.3.*Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur* 34

Figure III.4.*Circuit électrique de base du hacheur dévolteur* 34

Figure III.5.*Caractéristique de la tension et des courants* 35

Figure III.6.*Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un convertisseur Buck* 36

Figure III.7.*Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur* 36

Figure III.8.*Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost* 37

Figure.III.9.*Onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC* 39

Figure III.10.*Interrupteur bidirectionnel équivalent du paire transistor–diode* 40

Figure III.11.*Structure d'un bras d'onduleur à cinq niveaux* *40*

Figure.III.12.*Différentes configurations pour un bras l'onduleur à cinq niveaux* *41*

Figure III.13.*Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires (m =36, r=0.8)*..... *48*

Figure.III.14.*La tension simple Va et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires pour m=9, r=0.8* *49*

Figure.III.15.*La tension simple Va et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires pour m=36, r=0.8* *50*

Figure III.16.*Structure du pont de clamping* *50*

Figure III.17.*Structure de Circuits d'équilibrage résistif pour le cas d'un générateur photovoltaïque* *51*

Figure III.18 : *Les tensions d'entrée (sans pont de clamping)* U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} *et* U_{c4} 52

Figure III.19.*Les tensions d'entrée (sans pont de clamping)* U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} *et* U_{c4} *, et leurs différences* $U_{c1} - U_{c2}$, $U_{c1} - U_{c4}$ *et* $U_{c2} - U_{c3}$ *53*

Figure IV.1.*Représentation de l'ingénierie des systèmes hybrides* *56*

Figure IV.2.*Classification des onduleurs PV connectés au réseau* *58*

Figure IV.3.*Schéma de la régulation des courants de l'onduleur* *61*

Figure IV.4.*Schéma bloc du régulateur (PI)* *62*

Figure IV.5.*Schéma bloc de la régulateur PI sans compensation de pôle* *63*

Figure IV.6.*Principe de la PLL dans le domaine de Park* *64*

Figure IV.7.*Schéma de régulateur de la PLL* *65*

Figure IV.8.*Fonctionnement de la PLL triphasée* *65*

Figure IV.9.*Schéma monophasé équivalent du filtre LC* 66

Figure IV.10.*Schéma du filtre LC et la charge RL* 66

Figure V.1. *Simulation du module de PV* *71*

Figure V.2.*Bloc de Simulink de générateur photovoltaïque* *72*

Figure V.3.*Modèle de sous-système de Simulink de la rangée de photovoltaïque* *73*

Figure V.4.*Simulation de convertisseur boost* *74*

Figure V.5.*Bloc de Simulink pour MPPT* *74*

Figure V.6.*Simulation de commande p&o* *75*

Figure V.7.*Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)* *76*

Figure V.8.*Caractéristique I= f(V) du panneau PV(T=25C°, G=1000W/m2)* *77*

Figure V.9.*Caractéristique P = f(V) du panneau PV (T = 25 C°, G = 1000W / m2)* *77*

Figure V.10 .*Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module photovoltaïque I=f(V) pour différente températures et un éclairement; G =1000W//m2* …….. *78*

Figure V.11.*Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module PV, P = f(V); Pour différente températures et un éclairement G = 1000W/m2* …… *78*

Figure V.12.*Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module PV, P = f(V); Pour différents éclairement et une température T=25C°*…….. *79*

Figure V.13.*Résulta de simulation des Caractéristiques d'un module photovoltaïque I=f(V) pour déférente éclairement et une T=25C°* ……...…… *79*

Figure V.14.*Schéma de simulation de l'onduleur sur MATLAB-Simulink* ……... *80*

Figure V.15.*Schéma de circuit d'équilibrage de tension de l'onduleur* …… *81*

Figure V.16.*Schéma circuit de la commande MLI SPWM* …… *81*

Figure V.17.*Schéma circuit de filtrage après l'onduleur* ……. *82*

Figure V.18.*Caractéristiques des tensions simple délivrées par l'onduleur* ……. *82*

Figure V.19.*Caractéristiques des tensions composées à la sortie de l'onduleur* …….. *83*

Figure V.20.*Caractéristiques des courants de ligne à la sortie de l'onduleur* …….. *83*

Figure V.21.*Caractéristiques des tensions à la sortie du filtre* …….. *84*

Figure V.22.*Caractéristiques des tensions à la sortie du filtre après le régime transitoire* …….. *84*

Figure V.23.*Schéma block Simulink de la de la PLL* …….. *85*

Figure V.24.*Caractéristiques des tensions (vdr, vqr) exprimé dans le domaine de Park* …..…… *85*

Figure V.25.*Schéma synoptique de commande de la connexion au réseau* …… *86*

Figure V.26.*Caractéristiques des puissances injectées au réseau* ……..……... *87*

Figure V.27.*Puissance réactive injectés au réseau* …… *88*

Figure V.28.*Tension et courant injectés au réseau* ….…… *88*

Figure V.29.*Caractéristiques des courants actifs et réactifs (idr, iqr)*…… *89*

Figure V.30.*Caractéristiques des tensions et courant simple* ……..…… *89*

Figure V.31.*Caractéristique de courant de référence avec courant onduleur* ……..... *90*

Figure V.32.*Caractéristiques de tension de charge de la sortie d'hacheur* ……...…… *90*

Figure V.33.*Caractéristiques de rapport cyclique D* ……...…. *91*

Figure V.34.*Caractéristiques de changement d'irradiation* ..……..…….... *91*

Figure V.35.*Caractéristiques des puissances injectées au réseau en changement rapide d'irradiations* ….…… *92*

Figure V.36.*Caractéristiques du courant et tension injectée au réseau en changement rapide d'irradiation* *92*

Figure V.37.*Caractéristiques des courants actifs et réactif (idr, iqr) changement rapide d'irradiation* …..….. *93*

Figure V.38.*Caractéristiques de courant de référence et courant injectés avec changement rapide d'irradiation.93*

Figure V.39.*Caractéristiques de tension de charge de la sortie d'hacheur en cas de changement rapide d'irradiation .....…… 94*

Figure V.40.*Caractéristiques de rapport cyclique D en cas de changement rapide d'irradiation ……..….. 94*

Figure V.41.*Caractéristiques de changement d'irradiation …….. 95*

Figure V.42.*Caractéristiques des puissances injectées au réseau en changement lent d'irradiations ……...….. 95*

Figure V.43.*Caractéristiques du courant et tension injectée au réseau en changement lent d'irradiation ……..* 96

Figure V.44.*Caractéristiques des courant actif et réactif (idr, iqr) changement lent d'irradiation …..…….. 96*

Figure V.45.*Caractéristiques de courant de référence et courant injectés avec changement lent d'irradiation ... 97*

Figure V.46.*Caractéristiques de tension de charge de la sortie d'hacheur en cas de changement lent d'irradiation ……..... 97*

Figure V.47.*Caractéristiques de rapport cyclique D en cas de changement lent d'irradiation ……..…….. 98*

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1. *Module PV BP MSX120 datasheet au STC* …….. *22*

Tableau II.2.*Résumé du fonctionnement de l'algorithme P&O* …… *27*

Tableau II.3.*Résumé du fonctionnement de l'algorithme IncCond* ……... *28*

Tableau III.1.*Paramètres des fonctions de transfert de base en petits-signaux de quelques convertisseurs (DC-DC)* …… *40*

Tableau.III.2.*Grandeurs électriques pour chacune des configurations d'un bras k* …… *43*

Tableau IV.1. *Paramètres de simulation* ……... 69

Tableau V.1. *Caractéristiques de 4320 W photovoltaïque* ……... *71*

Nomenclature

Eg : Energie de la bande interdite (eV).

S : Surface du module photovoltaïque (m2).

E : Eclairement (W/m2).

$\mathbf{I_{ph}}$: Le courant de cellule (A).

$\mathbf{I_{pv}}$ **:** Le courant photovoltaïque (A).

$\mathbf{I_{sat}}$: Courant de saturation (A).

$\mathbf{R_p}$: Résistances parallèle shunt(Ω).

$\mathbf{R_S}$: Résistance série (Ω).

S : la surface du module photovoltaïque (m^2)

D : le rapport de cyclique.

$\mathbf{T_c}$: Température de jonction (°K).

G : L'éclairement de référence (1000 W/m2).

$\mathbf{T_{ref}}$: La température de référence (298 °K).

α : Le coefficient de courant en fonction de température (A/°C).

$\mathbf{I_{sc}}$: Le courant de court-circuit (A).

$\mathbf{V_{co}}$: La tension de circuit ouvert (V).

FF : Facteur de forme.

$\mathbf{N_s}$: Nombre de modules dans le panneau en série.

$\mathbf{N_p}$: Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

$\mathbf{P_{max}}$: La puissance maximale produite PV (W).

$\mathbf{V_{max}}$: Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

$\mathbf{I_{max}}$: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

$\mathbf{V_{opt}}$: Tension optimale (V).

$\mathbf{I_{opt}}$: Courant optimum (A).

$\mathbf{V_{co}}$: Tension à circuit ouvert (V).

K : coefficient de Boltzmann (1.38.10-23 J / K).

$\mathbf{T_{amb}}$: Température ambiante (C°).

$\mathbf{T_c}$: Température de la cellule (C°).

LISTE DES ACRONYMES

PV : Photovoltaïque.
GPV : Générateur Photovoltaïque.
FF : Facteur de forme.
MPPT: Maximum Power Point Tracking.
PPM : Le Poursuit Pointe Maximale.
P&O : Perturbation et Observation.
DC : Courant Continu (Direct Curent).
AC : Courant Alternatif (Alternative Curent).
NPC : Point Neutre serré (Neutral Point Clamped).

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie solaire est une énergie renouvelable par excellence. Respectueuse de l'environnement, elle présente de nombreux avantages spécifiques en raison notamment de l'épuisement prévisible des ressources d'énergies fossiles et de la montée des problèmes liés à la dégradation de l'environnement. Mais, pour des raisons à la fois technique et économiques, cette nouvelle source d'énergie électrique a tardé à s'imposer en dehors du domaine spatial.

Cependant, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même est devenue familière pour les consommateurs à travers de nombreux appareils de faible puissance faisant comme les montres, calculatrices, balises radio, pompes et réfrigérateur solaire. **[1]**

Bien que l'énergie photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, elle reste encore à un stade peu connu et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des cellules photovoltaïques. **[2]**

Le rendement de conversion d'énergie solaire en énergie électrique est encore faible (souvent inférieur à %12) sous un ensoleillement nominal de $1000 W/m2$; $(10-12)\ m^2$ de panneaux photovoltaïques sont nécessaires pour fournir 1kW crête. Ce rendement faible ainsi que le coût élevé des panneaux, a incité les utilisateurs à exploiter le maximum de puissance électrique (MPPT) disponible au niveau du générateur photovoltaïque. Cette maximum puissance est généralement obtenue en assurant une bonne adaptation entre le générateur et le récepteur associé. Cette adaptation est effectuée à l'aide de convertisseurs statiques contrôlés pour différents modes de fonctionnement. **[3]**

Ce rendement faible ainsi que le coût élevé des panneaux, a incité les utilisateurs à exploiter le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur photovoltaïque. Cette maximale puissance est généralement obtenue en assurant une bonne adaptation entre le générateur et le récepteur associé. Cette adaptation est effectuée à l'aide de convertisseurs statiques, généralement par onduleur deux niveaux, mais cette structure (deux niveaux) est moins adaptée par rapport à les structure multiniveaux, du fait que les tensions et les courants de sortie présentent un taux d'harmoniques nettement supérieur.

Le producteur d'énergie électrique doit dimensionner les systèmes de production, de transport et de distribution de façon à pouvoir livrer à chaque instant une qualité d'énergie électrique fiable, donc en l'occurrence observer une onde de tension sinusoïdale et continuelle, caractérisée par sa fréquence et sa tension nominale et sa phase.

Notre objectif dans ce mémoire est l'étude de la connexion au réseau électrique d'une petite centrale photovoltaïque de quelque *Kw*, on va réaliser cinq chapitres et une conclusion générale:

Le premier chapitre décrit une généralité sur la photovoltaïque et les principales caractéristiques de l'énergie solaire.

Dans le deuxième chapitre on va défini le modèle et les caractéristiques électriques du panneau solaire. Dans ce qui suit les différentes méthodes de poursuit du point de puissance maximale pour obtenir les meilleures performances du panneau sera présenté.

Le troisième chapitre traite de la modélisation et la commande des équipements d'électronique de puissance utilisés dans les systèmes photovoltaïques (on basson sur le hacheur DC/DC), et l'étude de la commande des onduleurs multiniveaux (NPC) DC/AC.

Le quatrième chapitre, on a étudié la technologie des onduleurs couplés au réseau et mentionner les différentes types des centrales photovoltaïques connectées au réseau, par suit l'étude de la partie contrôle et la commande des courant et tension pour maintenir la liaison avec le réseau.

Le cinquième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation de la commande de la connexion d'un système de génération d'énergie au réseau électrique (un système photovoltaïque) via un onduleur (NPC) et un hacheur à la technique *MLI (SPWM)*.

L'amplification de la tension du générateur photovoltaïque est assurée par un adaptateur d'impédance (hacheur boost).

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralité sur la photovoltaïque

I.1 Introduction

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus abondant parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est obtenue par transformation direct de la lumière du rayonnement solaire en électricité, au moyen des cellules photovoltaïques.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la conversion photovoltaïque, dans un premier temps, nous décrirons brièvement la structure et le fonctionnement des cellules et des générateurs photovoltaïques (GPV) ; ainsi nous effectuons un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

I.2 Définition d'un système PV

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand-chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait l'associer étroitement à un système complet correspondant à une application bien spécifique.

Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur précédemment décrit, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants:

- un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes),
- une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- un convertisseur DC/AC
- une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard. **[4]**

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types :

- Autonomes
- Hybrides
- Reliés au réseau.

La Choix de type dépend des besoins, d'emplacement et de budget.

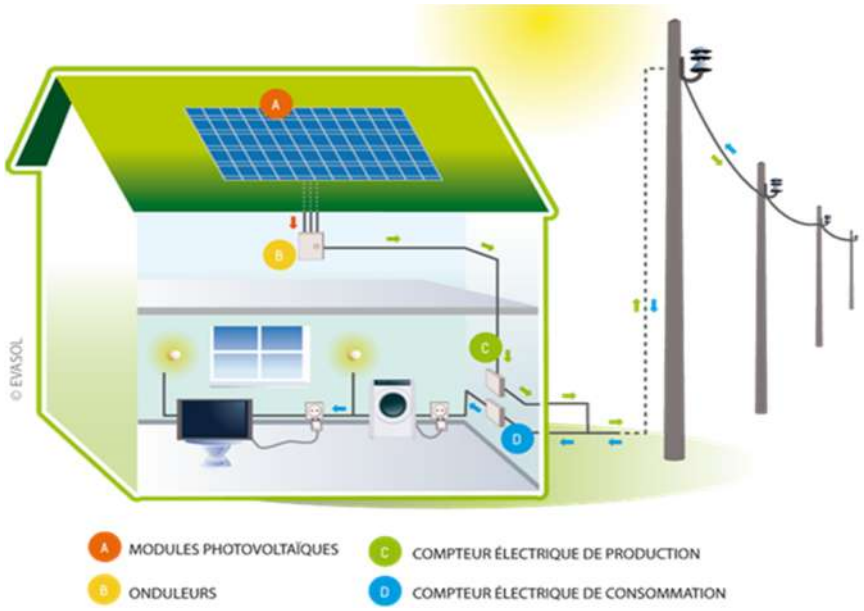


Figure I.1: *Schéma d'un système photovoltaïque.*

Les systèmes PV les plus couramment utilisés sont de trois types :

1. Les systèmes PV avec stockage électrique (batterie d'accumulateurs électrochimiques).

Ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation :

- soit directement en courant continu.
- soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu – alternatif (onduleur).

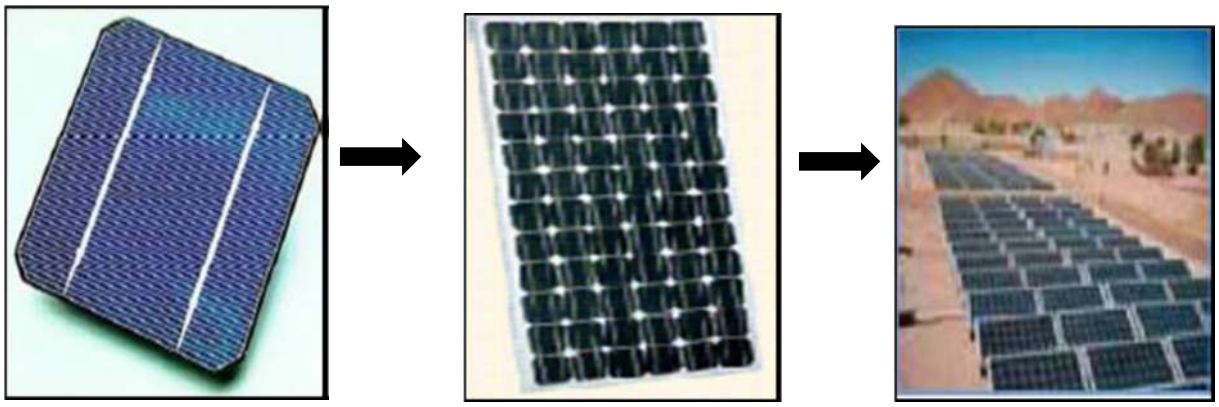
2. Les systèmes à couplage direct sans batterie (fonctionnement dit aussi "au fil du soleil"). Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - continu (adaptateur d'impédance).

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à une forme de stockage qui ne soit pas de nature électrochimique.

3. Les systèmes connectés au réseau local par l'intermédiaire d'un onduleur piloté à la fréquence du réseau, le réseau servant de stockage.

L'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge. On recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.



Cellule (Monocristalline). *Module photovoltaïque.* *Champ photovoltaïque.*

Figure I.2 : *La technique d'associer un champ photovoltaïque.*

I.3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque découvert en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel, l'effet photovoltaïque a été peu utilisé jusqu'au début des années 60 où il a connu un développement important du fait de ses applications spatiales.

L'électricité photovoltaïque, qui est aujourd'hui largement répandue notamment dans le domaine de l'électrification rurale, est obtenue par transformation directe de l'énergie lumineuse à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque ou photopile.

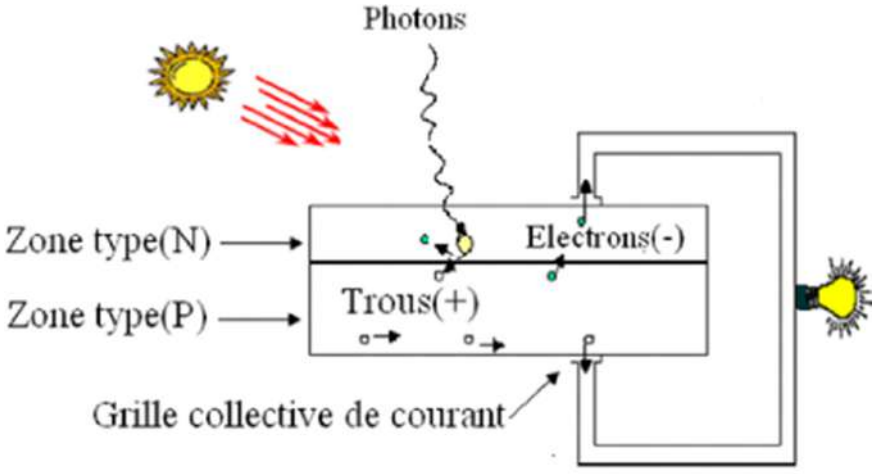


Figure I.3: *Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque.*

En fait, la photopile est composée de matériaux semi-conducteurs dopés P (manque d'électrons) et N (excès d'électrons) dont la jonction de type P-N permet aux électrons excédentaires de la zone N de traverser la jonction et d'occuper les trous de la zone P. Ainsi, lorsque la lumière frappe la surface (dopée N) d'une cellule photovoltaïque, les photons constituant cette lumière communiquent leur énergie aux atomes du matériau en libérant les électrons des atomes qui génèrent ainsi des charges N (les électrons) et des charges P (les trous). Or le déplacement d'électrons (créé par l'énergie des photons) est synonyme de production d'électricité.

Pour une photopile, la production d'électricité est liée à la production d'électrons (et de trous) par les photons de la lumière qui éclaire le dispositif. Plus de photons frappent la cellule, plus la quantité d'électricité produite est importante. Pour un éclairement donné, cette quantité dépend du rendement de conversion de la photopile (énergie produite/énergie reçue) ; c'est pourquoi le silicium (dopé P et N) qui présente le meilleur rendement théorique de conversion est très utilisé dans la fabrication des cellules. **[5]**

I.4 La cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est le suivant : les "grains" de lumière qu'on appelle photons, en pénétrant très légèrement dans le silicium, déplacent quelques électrons du métal. Le métal semi-conducteur ne permettant le déplacement des électrons que dans un sens, les électrons déplacés par la lumière doivent passer par le circuit extérieur pour revenir à leur place, ce qui engendre un courant.

Les cellules produisent de l'électricité chaque jour même si le ciel est nuageux : dans ce cas, le rendement est simplement moins élevé. Les cellules sont assemblées sous forme de panneaux photovoltaïques, panneaux qui sont encastrés sur ou dans la toiture des habitations.

La fabrication complexe demande une excellente maîtrise technique pour assurer dans la durée le meilleur rendement. L'assemblage de ces cellules solaires reliées les unes aux autres forme un module solaire (panneau solaire ou panneau photovoltaïque). **[5]**

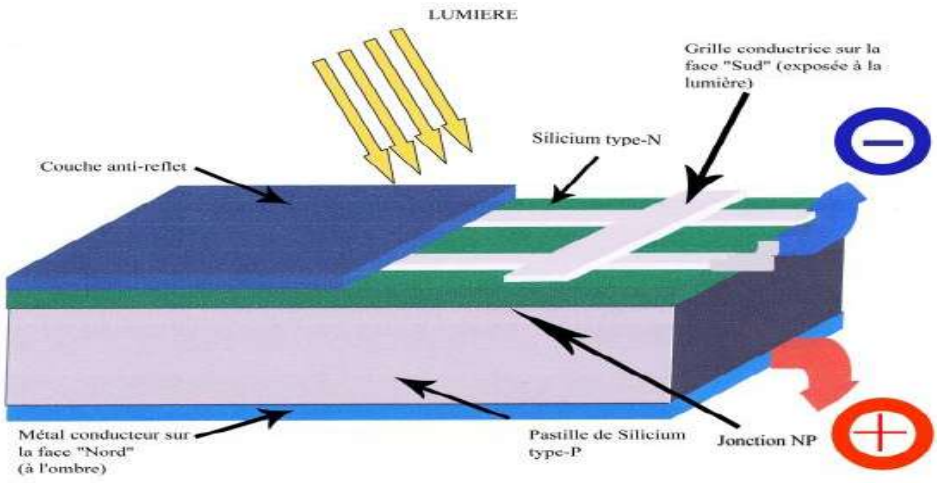


Figure I.4: *Représentation schématique d'une cellule solaire.*

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

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

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les pairs électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. **[5]**

I.5 Générateur photovoltaïque et ses performances

Un générateur photovoltaïque est un système complet assurant la production et la gestion de l'électricité fournie par les capteurs photovoltaïques et l'énergie est stockée dans des accumulateurs et/ou transformée en courant alternatif suivant le type d'application.

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit Icc ou la tension en circuit ouvert Vco.Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et /ou en parallèle pour obtenir une puissance, un Icc et un Vco désirés. **[5]**

I.5.1 *Caractéristique Courant-Tension*

La figure (I.5) représente la courbe *I=f(V)* d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m2 et une température de 25°C.

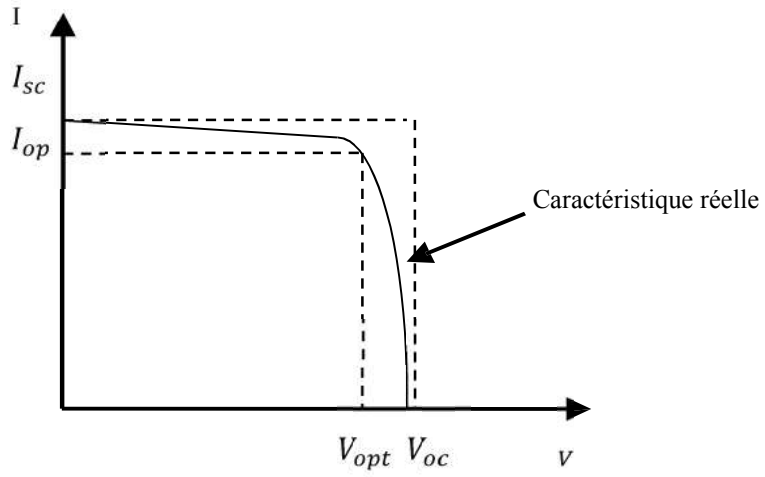


Figure I.5: *Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque*.

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point Pm où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point Pm.

I.5.2 *Influence de l'éclairement et la température sur les courbes I=f(V) et P=f(V)*

La figure (I.6) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique *I=f(V)*. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

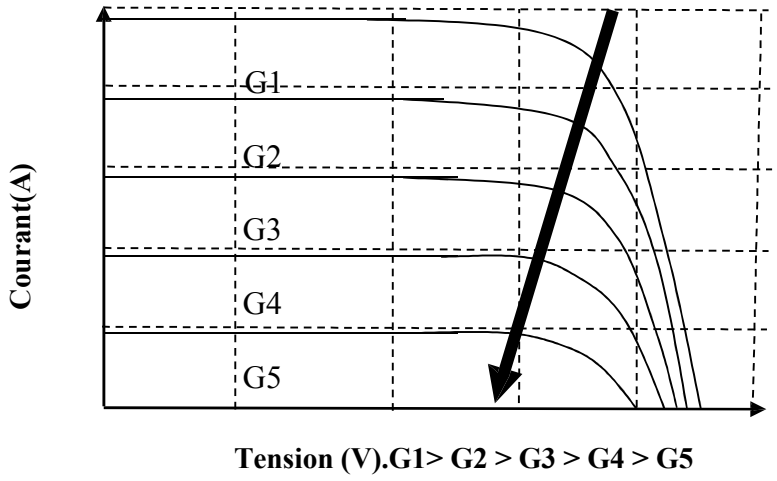
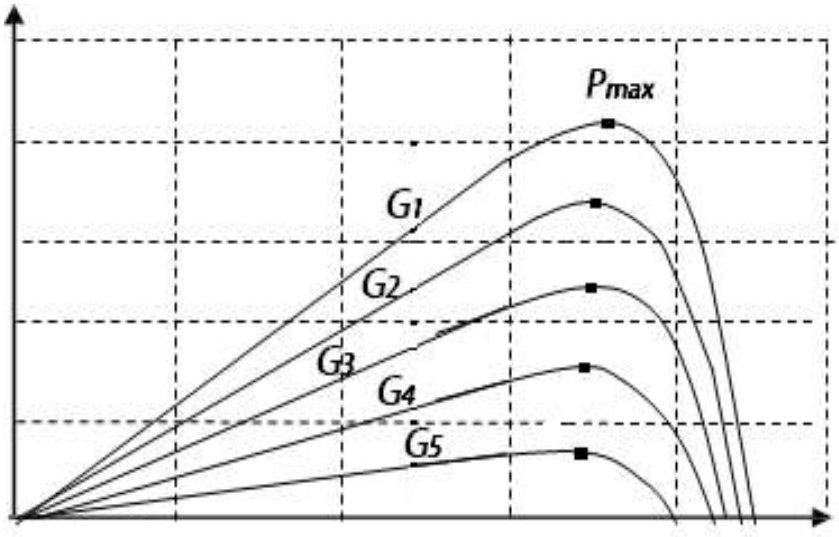


Figure I. 6: *L'influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V).*

La figure (I.7) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

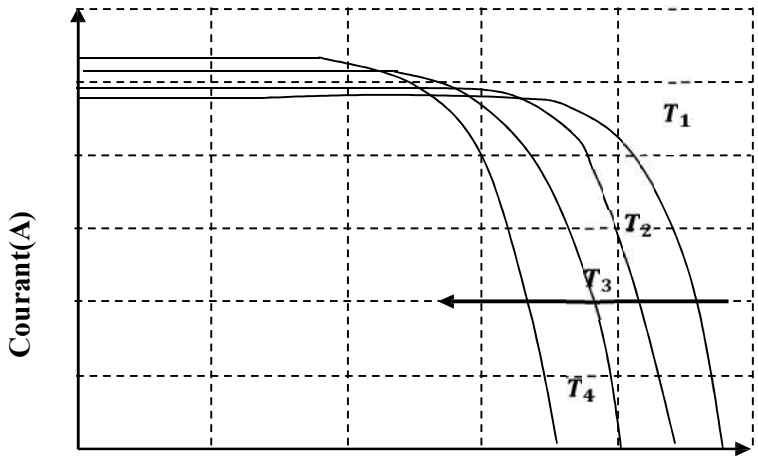


Tension (V).G1> G2 > G3 > G4 > G5

Figure I. 7: *L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V).*

La figure (I.8) montre l'influence de la température sur la caractéristique *I=f(V)*. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique *I=f(V)*.

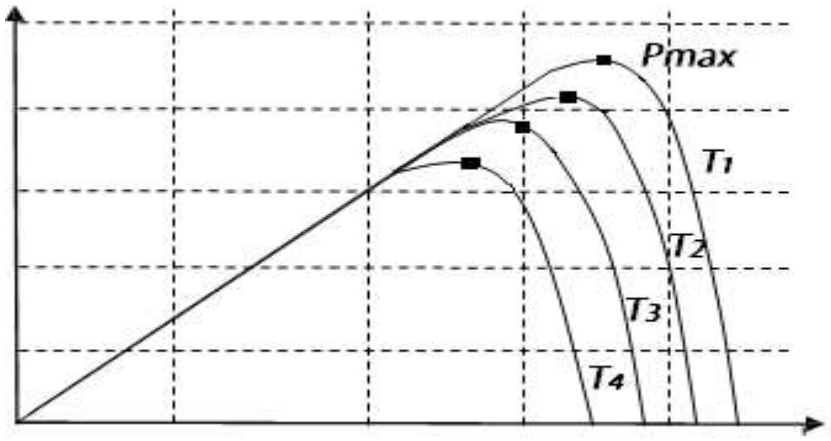
Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.



Tension (V) T1 < T2 < T3 < T4

Figure I.8: *L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V).*

La figure (I.9) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique *P=f(V)*.



Tension (V) T1 < T2 < T3 < T4

Figure I. 9: *L'influence de la température sur la caractéristique P=f(V).*

I.5.3 *Influence de groupement série des cellules PV*

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).Un module de 36 cellules en série (Type GTO136 - 80/2) est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler Ns modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre Np de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant.

Dans un groupement en série figure (I. 10), les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

$$Vsco = Ns\ Vco \quad \textbf{(I.1)}$$

$$Issc = Isc \quad \textbf{(I.2)}$$

Où

Issc : le courant de court-circuit du groupement série.

Isc: le courant de court-circuit.

Vsco : la tension de circuit ouvert du groupement série.

Ns : le nombre des cellules en série.

Vco: la tension de circuit ouvert.

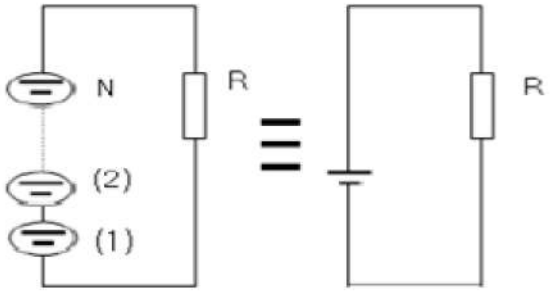


Figure I. 10: *Association de N modules solaires en série.*

I.5.4 *Influence de groupement parallèle des cellules PV*

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure (I.11), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

$$Ipsc = Np\ Isc \quad \textbf{(I.3)}$$

$$Vpc = Vco \quad \textbf{(I.4)}$$

Où

Ipsc: le courant de court-circuit du groupement parallèle.

Np : le nombre des cellules en parallèle.

Vpco : la tension de circuit ouvert du groupement parallèle.

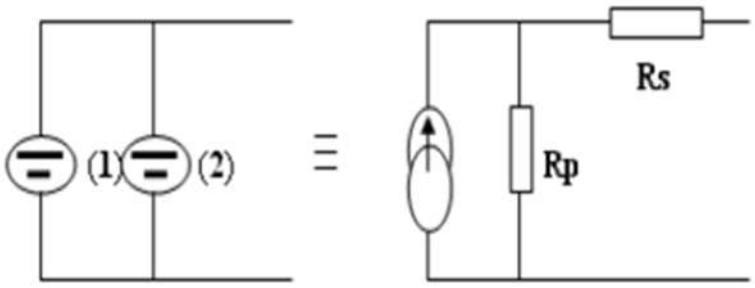


Figure I. 11: *Association de Np modules solaires en parallèle.*

I.5.5 *Influence de groupement mixte (Série + Parallèle) des cellules PV*

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure (I.12). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport *ns* parallèlement à l'axe des tensions et de rapport *np* parallèlement à l'axe des courants.

$$Igsc = Np.Icc \quad \textbf{(I.5)}$$

$$Vgco = Ns.Vco \quad \textbf{(I.6)}$$

Où

Igsc : le courant de court-circuit du groupement mixte.

Vgco : la tension de circuit ouvert du groupement mixte.

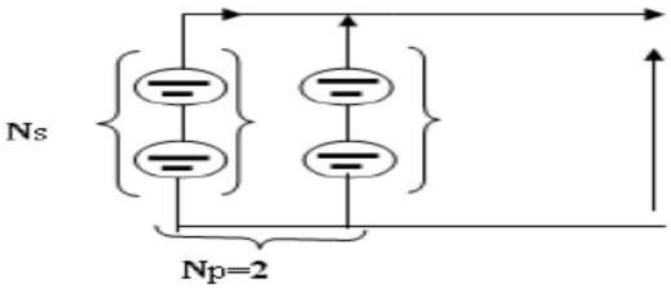


Figure I. 12: *Association mixte Ns* x *Np modules solaires.*

I.6 Topologie générale du système photovoltaïque

Il existe plusieurs méthodes pour connecter le panneau solaire. La grille peut être directement liée à elle ou la charge elle-même. La topologie du le système PV détermine le type d'interface convertisseur qui doit être utilisé. Ça dépend la configuration, le coût et l'objectif d'efficacité.

Dans le cas d'un seule étage configuration, comme le montre la figure I.13, l'interface du générateur photovoltaïque à la grille est réalisé avec l'onduleur DC / AC. Les fonctions de l'onduleur DC / AC sont à stimuler le PV tension, suivre le député provincial de la photovoltaïque et de contrôler le courant injecté dans le réseau.

I.6.1 *Conversion mono étage*

La conversion se fait en une seule étape, il n'y a pas d'étage d'amplification de la tension. Il faut donc que la tension du champ PV soit suffis ante pour que l'onduleur puisse reconstituer la tension du réseau. Dans cette configuration le convertisseur doit assurer toutes les fonctions demandées par une application PV raccordées au réseau (MPPT, anti-îlotage...).

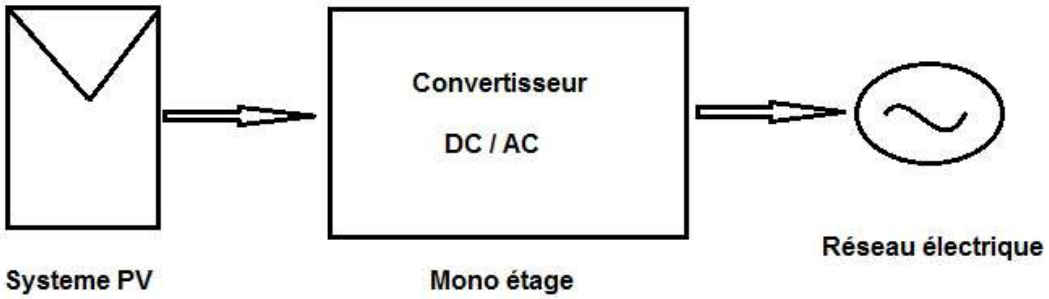


Figure I.13: *Schéma bloc d'une chaîne de conversion mono étage.*

I.6.2 *Conversion deux étages*

La conversion peut également être réalisée en deux étapes, une première conversion DC/DC puis une conversion DC/AC. Dans cette configuration, le convertisseur DC/DC a généralement le rôle d'augmenter la tension pour que l'onduleur puisse fabriquer un courant sinusoïdal à la tension du réseau. Les convertisseurs sont reliés par un bus DC. Les fonctions demandées par les applications PV peuvent ici être réparties entre les deux convertisseurs. **[6]**

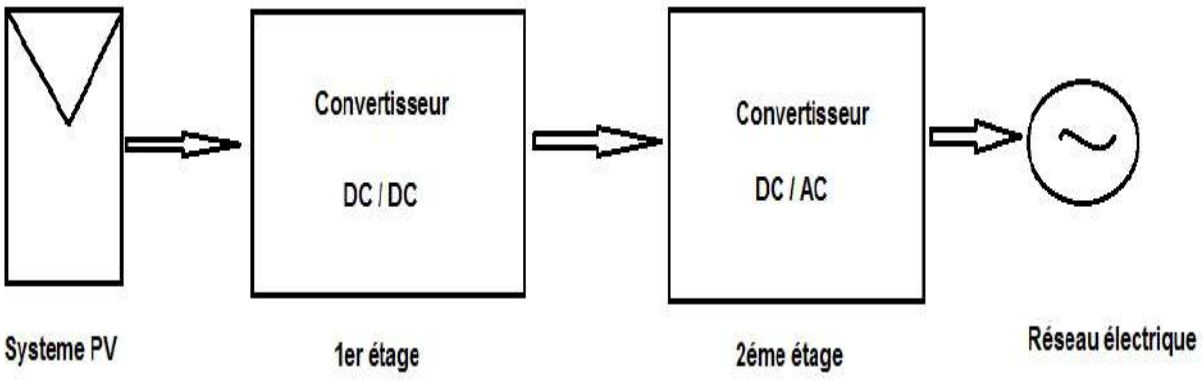


Figure I.14: *Schéma bloc d'une chaîne de conversion à deux étages.*

I.6.3 *Conversion multi-étages*

En fait, la gestion multi-étages est née de la combinaison entre la gestion par onduleur central et la gestion par la chaîne de conversion. Comme illustré en Figure I-15, le principe de la conversion multi-étages est basé sur de nombreux convertisseurs DC-DC modulables connectés à un onduleur central via un bus continu.

Chaque convertisseur DC-DC dispose de sa propre commande MPPT permettant à chaque étage de fonctionner à son PPM. Par conséquent, le disfonctionnement d'un GPV peut être rapidement détecté et localisé. Le fonctionnement de l'ensemble du champ ne sera donc pas affecté par le disfonctionnement d'un seul GPV.

Grâce aux convertisseurs DC-DC, il est possible de travailler sur une plus large gamme de tension PV (tension plus faible en entrée des DC/DC) optimisant ainsi la production photovoltaïque. **[5]**

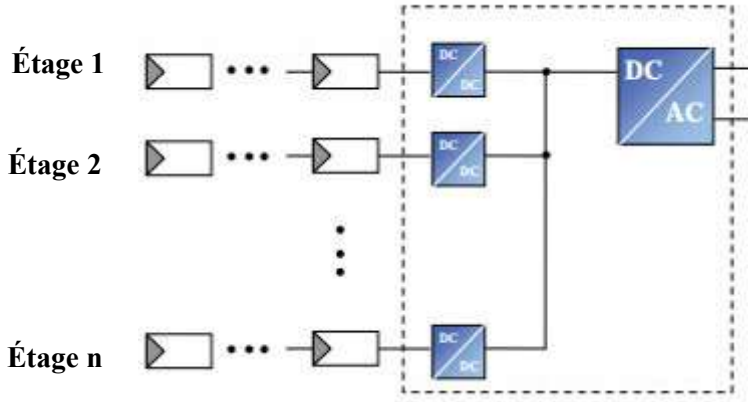


Figure 1-15 : *Nouvelle structure de conversion multi-étages mixte.*

Ce concept permet une grande modularité des GPV. On peut imaginer des systèmes dont chaque étage possède des GPV de technologies ou de tailles différentes ou orientés différemment par rapport au reste du système. Soit, une première chaîne à l'Est, une seconde à l'Ouest et la troisième au Sud ou encore avec des inclinaisons différentes.

Cependant, la présence de plus d'un pic sur la caractéristique P(V) d'un étage rend beaucoup plus compliquée la détection du PPM. Un fonctionnement sur un autre point que le PPM, dû à l'erreur de recherche MPPT, conduit à une baisse significative du rendement de cette partie du système global. Pour pallier ces défauts, une nouvelle architecture a été développée sur la base du convertisseur multi-étages.

Ce nouveau concept intègre un convertisseur DC-DC par panneau avec sa propre commande MPPT, Figure 1-15. Généralement, les panneaux solaires sont associés en série afin d'alimenter l'onduleur avec une tension convenable (180V- 500V) et les étages sont ensuite connectés en parallèle afin d'obtenir la puissance désirée. **[7]**

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV. Ensuite on a fait un rappel sur les systèmes PV et leurs performances.

Chapitre II :

Modélisation du panneau et la technique MPPT

II.1 Introduction

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par une technique de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT) **[8][5]**.

Le but de ce chapitre est on décrive la commande MPPT des convertisseurs DC- DC. On présente dans ce chapitre, méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, comme l'algorithme de la méthode de perturbation et observation.

II.2 Modélisation de la cellule PV

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque.

II.2.1 *Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque*

Pour trouver le modèle de ce générateur, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série Rs représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle R P caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établit par shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

On présente le schéma du circuit électrique par la figure (II.1) :

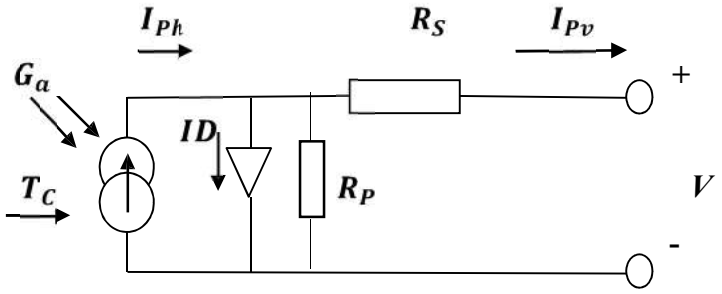


Figure II. 1: *Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque*.

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi, (Figure II.1) illustre le schéma électrique équivalent d'une cellule PV réelle. Dans cette équation, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique. En statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante **[5]**:

$$\mathbf{I = I_{ph} - I_d - I_p} \qquad \textbf{(II.1)}$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule.

I_{ph} : Photocourant (A).

$I_{sc} = I_{scr}\left(\frac{G}{1000}\right)$: Le courant de court-circuit de référence.

$I_p = \frac{V+I.R_s}{R_p}$: Le courant dérivé par la résistance parallèle.

$I_d = I_0\left[e\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right) - 1\right]$: Le courant traversant la diode.

I_0 : Le courant de saturation inverse d'une diode.

$V_T = \frac{KT}{e}$: La tension thermique.

Où

e : charge d'électron (1.602×10^{-19} C).

K:constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K).

n : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

T: La température effective de la cellule en kelvin.

En utilisant les équations ci-dessus, on peut en déduire l'expression du courant délivré par la cellule photovoltaïque :

$$\mathbf{I = I_{ph} - I_0 \left[e \left(\frac{V+I.R_s}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V+I.R_s}{R_p}} \quad \textbf{(II.2)}$$

Les paramètres des cellules photovoltaïques (ISC, VOC, *ff* et h), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

II.2.2 *Courant de court-circuit (Isc)*

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant V= 0). Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I.1), on obtient:

$$\mathbf{I_{sc} = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\left(\frac{e(I_{sc}*R_s)}{nKT} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{I_{sc}*R_s}{R_p} \right)} \quad \textbf{(II.3)}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme :

$$\mathbf{I_{sat} = \left[e \left(\frac{e(I_{pV}*R_{ser})}{nkT} - 1 \right) \right]} \quad \textbf{(II.4)}$$

Devan I_{ph}, l'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$\mathbf{I_{sc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1+\frac{R_s}{R_p} \right)}} \quad \textbf{(II.5)}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule, pratiquement :

$$\mathbf{I_{sc} \cong I_{ph}} \quad \textbf{(II.6)}$$

II.2.3 *Tension de circuit-ouvert (Vco)*

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. (C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$\mathbf{0 = I_{sc} - I_{sat}\left[e\left(\frac{eV_{pv}}{nKT}\right) - 1\right] - \left(\frac{V_{PV}}{R_p}\right)} \quad \textbf{(II.7)}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$\mathbf{V_{co} = V_T Ln\left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1\right]} \quad \textbf{(II.8)}$$

Le rendement η (efficience) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente il est donné par :

$$\mathbf{n = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}.V_{opt}}{P_{inc}}} \quad \textbf{(II.9)}$$

II.2.4 *Facteur de forme*

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF).

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule noté P_{max} et la puissance formé par le rectangle $I_{sc} * V_{co}$ .plus la valeur de ce facteur sera grand, plus la puissance exploitable le sera également.

Les meilleure cellules auront donc fait l'objet de compromise technologique pour atteindre le plus possible les caractéristique idéales.

Il est défini par la relation suivante :

$$\mathbf{FF = \frac{P_{max}}{I_{sc}.V_{co}} = \frac{I_{opt}.V_{opt}}{I_{sc}.V_{co}}} \quad \textbf{(II.10)}$$

II.3 Modèle du module photovoltaïque

Le modèle suivant utilise une méthode différente pour calculer la série de la résistance et de la résistance parallèle. Par exemple, le BP MSX 120 est fait de cellules solaires (72 nitrure de silicium multi-cristallines) en série et fournit 120 W de puissance maximale nominale. La tension de l'point de puissance maximale est de 33,7 V et courant délivré au point de puissance maximale est de 3,56 A. Les paramètres de la BP MSX120 sont donnés dans le tableau II.1, ce qui est essentiel pour modéliser le photovoltaïque.

Courant de court-circuit I_{sc}	***3.87 A***
Tension de circuit ouvert V_{oc}	***42.1 V***
Courant au point de puissance maximum I_{MPP}	***3.56 A***
Tension au point de puissance maximum V_{MPP}	***33.7 V***
Nombre des cellules en série N_s	***72***
Coefficient de température d'I_{sc}	***(0.065±0.015)% °C***
Coefficient de température de V_{oc}	***-(80±10) mV/°C***
Pmax	***120 W***
Courant de saturation renversé de diode I_0	***0.323µ M***
Facteur de qualité de diode A	***1.3977***
Résistance série R_s	***0.473 Ω***
Résistance série R_s	***1367 Ω***

Tableau II.1 *Module PV BP MSX120 datasheet au STC.* **[Annexe 2]**

Différents modèles de la photovoltaïque sont développés dans la littérature. L'équation suivante sera principalement utilisée dans le présent rapport. Le modèle consiste à trouver la courbe caractéristique du module PV de la fiche technique.

L'équation utilisée pour calculer la courbe I-V est :

$$\mathbf{I_{pv} = I_{ph} - I_0\left[e\left(\frac{V+I.Z.R_s}{nV_T}\right) - 1\right] - \left(\frac{V+I.Z.R_s}{R_p}\right)} \qquad \textbf{(II.11)}$$

Avec Z : nombres de cellules

Où I_D , le courant de diode, est donné par l'équation :

$$\mathbf{I_D = I_0\left[e\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right)-1\right]} \quad \textbf{(II.12)}$$

Le courant de saturation inverse d'une diode est donné par :

$$\mathbf{I_0 = I_{sc}/\left[e\left(\frac{V_{oc}}{nV_T}\right)-1\right]} \quad \textbf{(II.13)}$$

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie $(R_p = \infty)$ l'équation (II.11) devient :

$$\mathbf{I_{pv} = I_{ph} - I_0\left[e\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right)-1\right]} \quad \textbf{(II.14)}$$

Avec :

I : Le courant fournit par la cellule.

V : La tension à la borne de cellule.

$$\mathbf{I_{pv} = I_{sc} - I_0\left[e\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right)-1\right]} \quad \textbf{(II.15)}$$

Calcul de la résistance série dans le point V_{oc}

$$\mathbf{dI = 0 - I_0.\left(\frac{dV+R_s.dI}{nV_T}\right).\left[e\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right)\right]} \quad \textbf{(II.16)}$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique I-V au voisinage de V_{oc} . Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$\mathbf{R_s = -\frac{dV}{dI} - \frac{nV_T}{I_0.e\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right)}} \quad \textbf{(II.17)}$$

$$\mathbf{R_s = -\frac{dV}{dI}\ |V_{oc} - \frac{nV_T}{I_0.e\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right)}} \quad \textbf{(II.18)}$$

Enfin, pour résoudre l'équation de caractéristique non linéaire, on utilise la méthode de Newton décrite par :

$$\mathbf{x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}} \quad \textbf{(II.19)}$$

Où :

$f'(x_n)$: Le dérivé de la fonction $f(x_n)$.

x_n : La présente itération.

x_{n+1}: L'itération suivante.

Ainsi, on récrit l'équation (II.14) sous la forme suivante :

$$\mathbf{f(I_{pv}) = I_{sc} - I - I_0\left[e\left(\frac{V+I.R_s}{nV_T}\right) - 1\right] = 0} \quad \textbf{(II.20)}$$

$$\mathbf{I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_0\left[e\left(\frac{V+I.R_S}{nV_T}\right) - 1\right]}{-1 - I_0.\left(\frac{R_S}{nV_T}\right).\left[e\left(\frac{V+I.R_S}{nV_T}\right)\right]}} \quad \textbf{(II.21)}$$

En remplaçant dans l'équation (II.15), on calcule le courant (I) par les itérations:

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal.

V Pour généraliser notre calcul pour différentes éclairements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements. **[13]**

$$\mathbf{I_{sc}(T) = I_{scr}(T_{ref}).[1 + a(T - T_{ref})]} \quad \textbf{(II.22)}$$

$$\mathbf{I_{sc} = I_{scr}\left(\frac{G}{1000}\right)} \quad \textbf{(II.23)}$$

Où :

I_{scr} : Le courant de court-circuit de référence.

$$\mathbf{I_0(T) = I_0(T_{ref}).\left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{\frac{3}{n}}.\left[e\left(\frac{-q.E_g}{nk}\right).\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]} \quad \textbf{(II.24)}$$

Où :

a : Le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

T_{ref} : La température de référence, 298k (25°C).

G : L'irradiation solaire.

II.4 Le Point de Puissance Maximal (MPPT)

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les premières utilisations du MPPT datent de 1968. **[9]**

II.4.1 *Différentes techniques du MPPT*

Le MPPT est le point clé du montage. Il s'agit d'un genre de contrôleur qui va forcer le générateur à travailler à sa puissance maximale (MPP). En effet, cette opération permet d'obtenir le meilleur rendement de puissance de la cellule PV. Il existe différentes méthodes pour obtenir ce point.

Les algorithmes de programmation de contrôleurs MPPT sont relativement simples, du fait des limitations technologiques dans les microprocesseurs disponibles. Il peut donc être facilement implémenté sur un ordinateur ou un microprocesseur **[9] [5]**.

Un générateur photovoltaïque est un générateur dont la caractéristique $I = f(U)$ est non linéaire.

En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge. Il existe différents types de contrôleurs MPPT.

Généralement, chacun de ces contrôleurs a été réalisé pour une application spécifique. La précision et la robustesse de ces contrôleurs dépendent d'un certain nombre de paramètres :

- le rendement global du système désiré par le constructeur ;
- le type de convertisseur de puissance permettant l'adaptation et la connexion à une ;
- charge (DC-DC, DC-AC), ou à un réseau électrique ;
- l'application souhaitée (systèmes autonomes, système connectés au réseau, systèmes spatiaux) ;
- les caractéristiques du MPPT, en fonction de la vitesse ;
- le type d'implantation choisi (analogique, numérique, mélange des deux).

II.4.2 *Perturbation et Observation (P&O)*

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque VPV et IPV respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

La figure (II.2) représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle V_{pv} et $I\ pv$ sont mesurés pour calculer $Ppv(k)$. Cette valeur de $Ppv(k)$ est comparée à la valeur $(k\text{-}1)$ calculée au cycle précédent. **[9]**

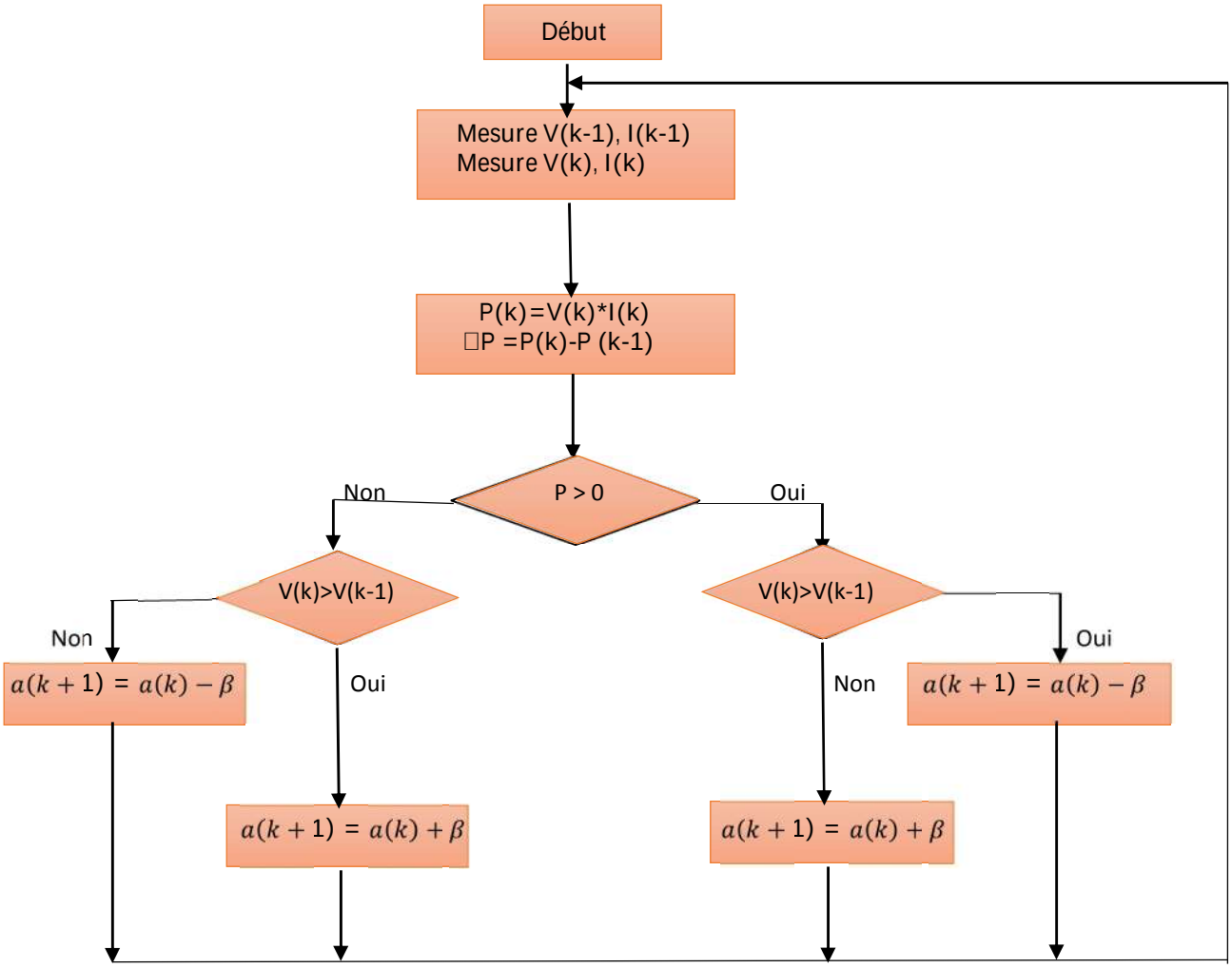


Figure II.2 : *Organigramme de l'algorithme P&O.*

Si la puissance de sortie a augmenté, V_{PV} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent V_{pv} et ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale.Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentation de la perturbation. Si ce pas V_{OP} d'incrémentation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins.

Si une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation de la puissance du panneau. L'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continu dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce que l'éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance.Pour remédier à l'inconvénient majeur de la déviation de cette méthode lors de la recherche du MPP durant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation, une version améliorée de cet algorithme est proposée. **[9]**

Cette méthode utilise une méthode itérative, qui repose sur un procédé algorithmique utilisé dans le but d'aller chercher la puissance maximale. Ce procédé se base sur le calcul d'une valeur actuelle de la puissance et de la valeur précédente. Un algorithme permet de faire la comparaison des deux puissances aux différents points successifs situés sur la courbe. Si : $P_{n°2}-P_{n°1} > 0$, on ajoute un pas de tension. Si la différence $P_{n°2}-P_{n°1} < 0$, A partir de ce changement, on réduit la tension du panneau d'un pas. Le tableau ci-dessous résume le fonctionnement de l'algorithme P&O **[10]**.

cas	dPV	dV	Action
1	L)	L)	V++
2	L)	L)	V--
3	L)	L)	V--
4	L)	L)	V++

Tableau II.2 : *Résumé du fonctionnement de l'algorithme P&O*.

II.4.3 *Incrémentale Conductance (IncCond)*

La méthode basée sur la conductance incrémentale est également très utilisée. Cet algorithme est basé, comme le précédent, sur une considération de la dérivée de la puissance par rapport à la tension. Effectivement, nous savons qu'au point de puissance maximale, cette dérivée est égale à zéro. Dans l'équation :

$$\frac{dp}{dV} = 0 \Leftrightarrow \frac{dUI}{dU} = 0 \Leftarrow \frac{dU}{dU}I + \frac{dI}{dU}U = 0 \qquad \textbf{(II.25)}$$

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \qquad \textbf{(II.26)}$$

L'algorithme calcule donc le rapport I/U, et le compare à la dérivée de I par rapport à U.

Quand les deux membres de cette équation sont exactement opposés, nous avons atteint le point de puissance maximale. Cela nécessite une conservation en mémoire de la tension et du courant précédents **[10]**. A travers ce tableau, on résume le fonctionnement de l'algorithme IncCond :

cas	Dérivée	Action
1	$\frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U}$	V--
2	$\frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U}$ $\frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U}$	V++

Tableau II.3: *Résumé du fonctionnement de l'algorithme IncCond.*

II.5 Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes.

La figure (II.3) montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire

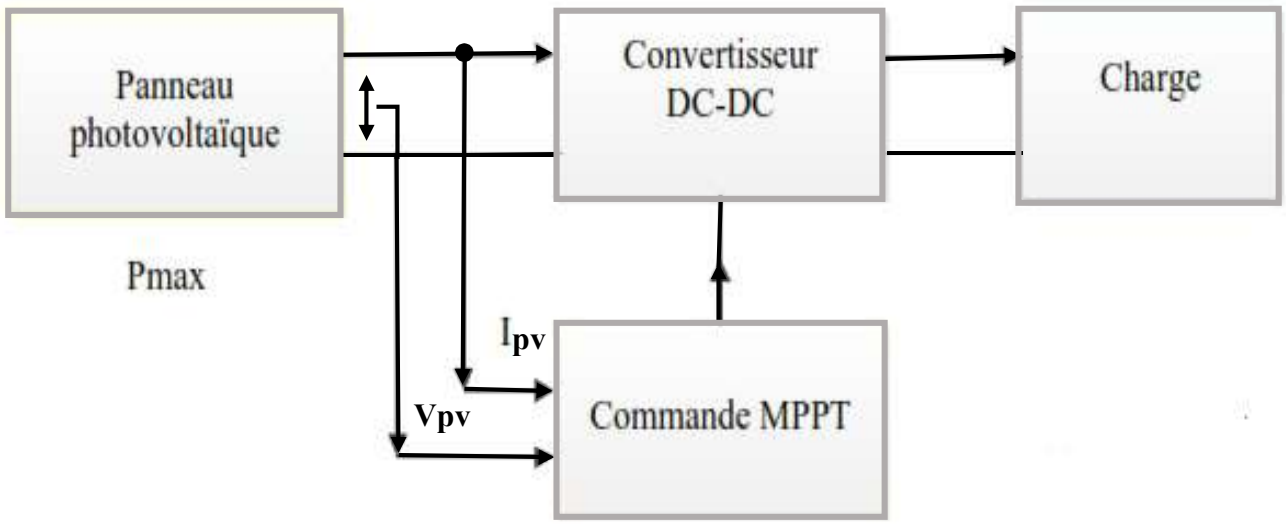


Figure II.3: *Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT.*

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV.

La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant *I* et de tension *V* du module et la multiplication de ces deux grandeurs $P_{pv} = I_{pv} * V_{pv}$

Ces mesures sont utilisées par diverses méthodes qui poursuivent le MPP réel de la ragée.

II.6 Conclusion

Nous avons expliqué dans ce chapitre, le fonctionnement de cellule photovoltaïque en citant les caractéristiques principales. ensuite on a présenté la commande MPPT des convertisseurs DC-DC pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque maximale, sous différentes conditions. On a étudié des méthodes MPPT basées sur contre réaction de puissance, c'est la méthode à base de l'algorithme de perturbation, observation (P&O).

Chapitre III :

Les convertisseurs statiques et stratège de commande

III.1 Introduction

Dans un système de conversion d'énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant Continu en courant alternatif et inversement. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les énergies renouvelables : les hacheurs, les onduleurs et les redresseurs, dans notre étude on utilisera uniquement les hacheurs et les onduleurs. **[11]**

III.2 Convertisseurs DC/DC (hacheur)

Dans la conversion de puissance, un des problèmes majeurs concernant la généralisation de l'énergie renouvelable consiste à réduire encore plus le coût des systèmes tout en augmentant leur rendement. Mais si ce premier challenge tient à la technologie de fabrication, il existe un autre problème qui concerne les systèmes d'adaptation de cette énergie en vue de son exploitation dans différentes applications, telles que le pompage de l'eau, la commande de moteurs électriques, l'éclairage, le chargement de batteries, etc.

Il s'agit en particulier de dispositifs de régulation et de conversion de l'énergie dont les convertisseurs DC/DC (hacheurs). L'intérêt pour ce problème est lié au fait que le rendement de ces dispositifs influence directement le rendement global de l'alimentation dans son ensemble. Les recherches dans le domaine des convertisseurs DC-DC ont révélé depuis plus d'une décennie l'importance des alimentations à découpage. **[11]**

III.2.1 *Le hacheur survolteur (Boost)*

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la (figureIII.1), représente le circuit électrique du Boost.

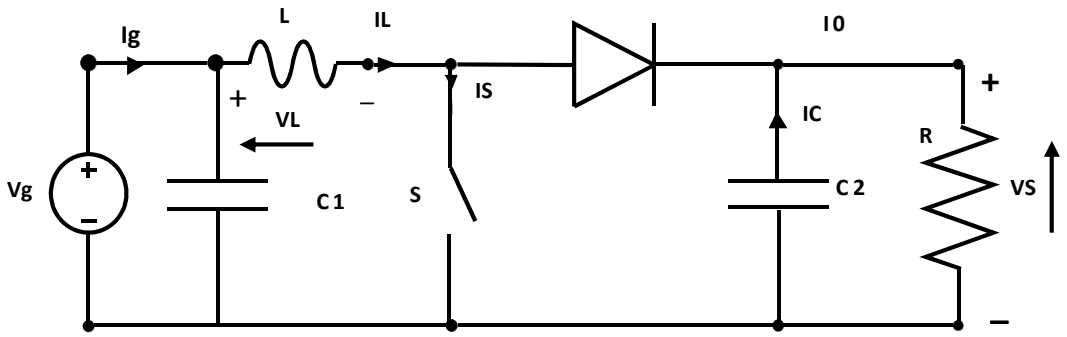


Figure III.1 : *Circuit électrique de base du hacheur survolteur*.

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S :

Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur S (figure III.1) est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

III.2.1.1 *Modèle mathématique équivalent*

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

Pour la première période αTs :

$$\mathbf{I_{c1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_L} \qquad \mathbf{(III.1)}$$

$$\mathbf{I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} - I_0} \qquad \mathbf{(III.2)}$$

$$\mathbf{V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g - R_L I_L} \qquad \mathbf{(III.3)}$$

Pour la deuxième période $(1-\alpha)\ Ts$:

$$\mathbf{I_{c1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} = I_g - I_L} \qquad \mathbf{(III.4)}$$

$$\mathbf{I_{c2} = C_1 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0} \qquad \mathbf{(III.5)}$$

$$\mathbf{V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_g - V_0 - R_L I_L} \qquad \mathbf{(III.6)}$$

III.2.1.2 *Modèle approximé du convertisseur Boost*

Les systèmes d'équations de base (III (1.2.3)) et (III (4.5.6)) représentent le convertisseur Boost pour une période αT_s et $(1-\alpha T_s)$ respectivement.

Le convertisseur oscillant entre ces deux états avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps.

Pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques C_I, V_L est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche d'exponentielle par un segment ($e_\varepsilon \approx 1 + \varepsilon$ si $\varepsilon << 1$) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante. Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique x sur les deux laps de temps αT_s et $(1-\alpha)T_s$:

$$< \frac{dx}{dt} > T_s = \frac{dx}{dt_{(\alpha T_s)}} + \alpha T_s + \frac{dx}{dt_{(1-\alpha)T_s}} (1-\alpha) T_s \qquad \textbf{(III.7)}$$

Où $< \frac{x}{t} >$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période T_s. Cette relation est valide si:

$\frac{dx}{dt_{(\alpha T_s)}}$ Et $\frac{dx}{dt_{(1-\alpha)T_s}}$ sont constants sur les périodes αT_s et $(1-\alpha)T_s$ respectivement en d'autres termes cette approximation est valable si les périodes $\propto T_s$ et $(1-\alpha)T_s$ sont très faibles devant la constante de temps du circuit $C_1 R_G, C_2 Z, L/R_L$.

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la figure (III.2).

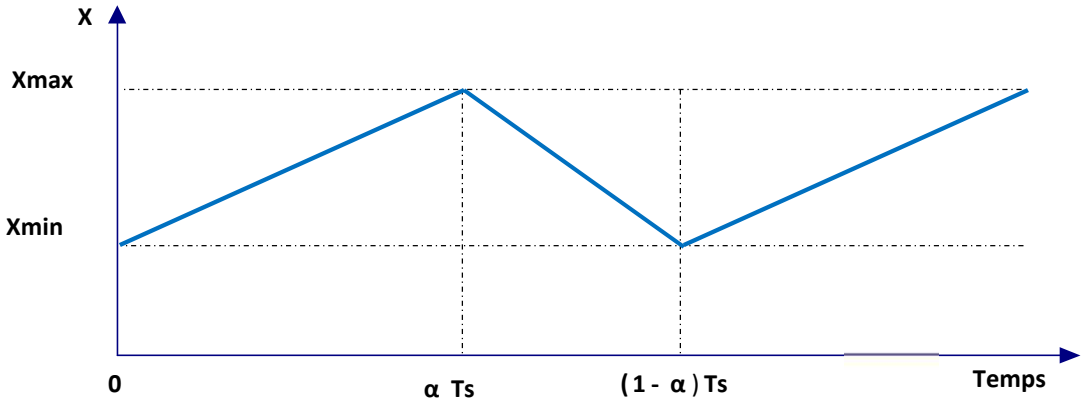


Figure III.2 : *Allure des variables dynamiques* I_L.

En appliquant la relation (III.7) sur les systèmes d'équations (III (1, 2,3)) et (III (4, 5,6)) on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} \alpha T_s = (I_g - I_L)\alpha T_s + (1-\alpha) T_s (I_g - I_L) \qquad \textbf{(III.8)}$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_s = -\alpha T_s I_0 + (1-\alpha) T_s (I_L - I_0) \qquad \textbf{(III.9)}$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = (V_g - R_L I_L)\alpha T_s + (1-\alpha) T_s (V_g - V_0 - R_L I_L) \qquad \textbf{(III.10)}$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le Boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur Boost.

$$\mathbf{I_L = I_g - C_1 \frac{dV_g}{dt}} \quad \textbf{(III.11)}$$

$$\mathbf{I_0 = (1-\alpha) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt}} \quad \textbf{(III.12)}$$

$$\mathbf{V_g = (1-\alpha) V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L + I_L} \quad \textbf{(III.13)}$$

III.2.1.3 *Les ondulations des courants et des tensions*

Pour le dimensionnement des différents composants du circuit afin de diminuer les Ondulations des courants et des tensions sans faire un surdimensionnement ce qui accroîtrait le poids et le prix des circuits, un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire. Cette remarque est très importante pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter le courant admissible par le transistor MOSFET S, où dans le cas pratique les ondulations du courant I_L sont plus importantes par rapport aux autres ondulations.

En appliquant la relation $V_0 + L\frac{dI_L}{dt}$, et par l'approximation des segments d'exponentielles par des droites, la pente du courant I_L pendant la première période de fonctionnement est donnée par :

$$\mathbf{\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_S - R_L I_L}{L}} \quad \textbf{(III.14)}$$

A partir de la relation (III.11), la valeur crête à crête du courant I_L est :

$$\mathbf{I_{icc} = 2\Delta I_L = \frac{V_S - R_L I_L}{L} \alpha T_s} \quad \textbf{(III.15)}$$

La valeur de l'inductance L à choisir pour certaine ondulation ΔI_L est :

$$\mathbf{L \approx \frac{V_g - V_0 - R_L I_L}{2\Delta I_L}} \quad \textbf{(III.16)}$$

Pour le calcul des capacités C_1 et C_2 on a :

$$\mathbf{\frac{dV_g}{dt} = \frac{I_{c1}}{C_1} = \frac{I_\theta - I_L}{C_1}} \quad \textbf{(III.17)}$$

$$\mathbf{\frac{dV_0}{dt} = \frac{I_{c2}}{C_2} = \frac{-I_0}{C_2}} \quad \textbf{(III.18)}$$

Les valeurs des ondulations crête à crête des tensions d'entrées et de sorties sont :

$$\mathbf{V_{c1cc} = 2\Delta V_{c1} = \frac{I_g - I_L}{C_1}\alpha T_s} \quad \textbf{(III.19)}$$

$$\mathbf{V_{c2cc} = 2\Delta V_{c2} = \frac{-I_0}{C_2}\alpha T_s} \quad \textbf{(III.20)}$$

Les valeurs des capacités *C1* et *C2* sont respectivement données par :

$$\mathbf{C_1 = \frac{I_g - I_L}{2\Delta V_{c1}}\alpha T_s} \quad \textbf{(III.21)}$$

$$\mathbf{C_2 = \frac{-I_0}{2\Delta V_{c2}}\alpha T_s} \quad \textbf{(III.22)}$$

III.2.1.4 *Étude en régime continu*

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes.

Le système d'équations (III (11, 12,13)) donne :

$$\mathbf{I_L = I_g} \quad \textbf{(III.23)}$$

$$\mathbf{I_0 = (1 - \alpha)I_L} \quad \textbf{(III.24)}$$

$$\mathbf{V_g = (1 - \alpha)V_0} \quad \textbf{(III.25)}$$

Comme le présente la figure (III.3), lorsque l'interrupteur du transistor (S) est sur la position (on), le courant de l'inductance du hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode (D) est bloquée (off). Et lorsque (S) tourne sur la position (off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit (RC) bien que la diode (D) est passante.

Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la figure (III.3), comme suit :

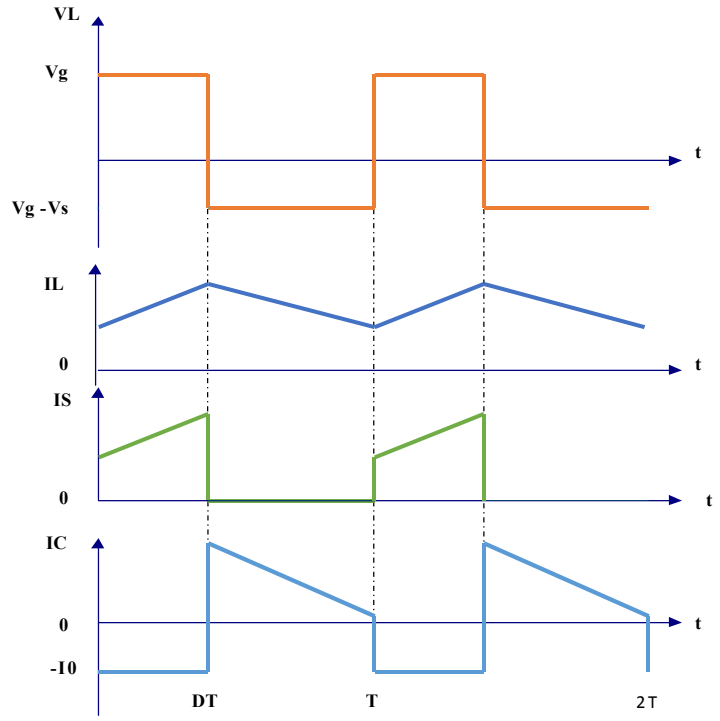


Figure III. 3 : *Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur*.

III.3 Hacheur dévolteur (Buck)

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par (figure III.4).

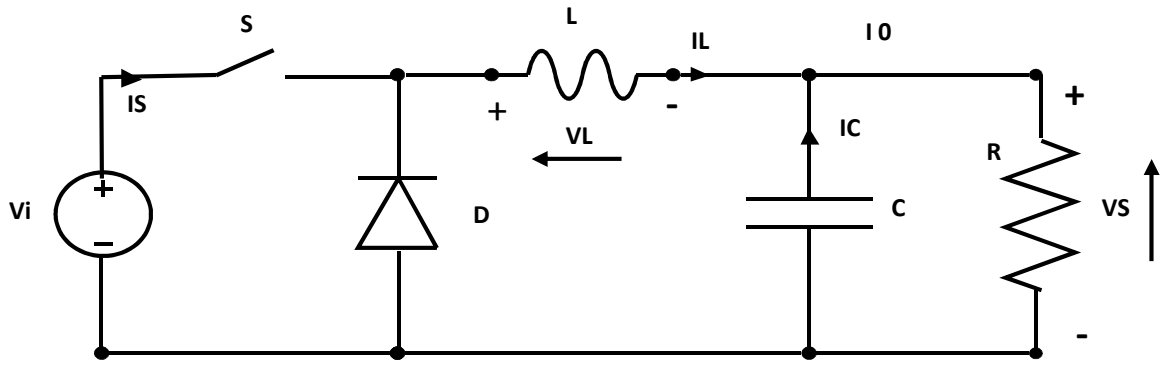


Figure III.4: *Circuit électrique de base du hacheur dévolteur*.

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S :

Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, la tension aux bornes de l'inductance vaut

VL = Vi - Vo. Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.

Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance vaut VL = -Vo.

Le courant traversant l'inductance décroît.

L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par l'équation suivante.

$$\frac{\delta I}{\delta t} = \frac{V_i - V_s}{L} \qquad \textbf{(III.26)}$$

I_L : Le courant dans l'inductance.

Le taux de changement du courant est donné par :

$$\frac{\delta I}{\delta t} = \frac{V_i - V_s}{L} \qquad \textbf{(III.27)}$$

La figure (III.4) montre comment la tension de charge varie avec le courant de charge. Les caractéristiques des courants et la tension représentant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont données par la figure (III.5) :

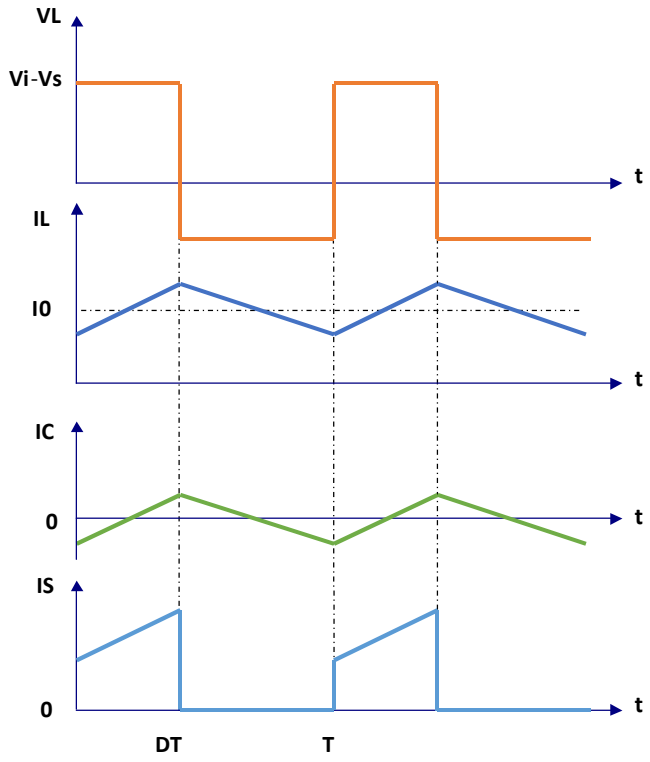


Figure III.5: *Caractéristique de la tension et des courants*.

Dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck.

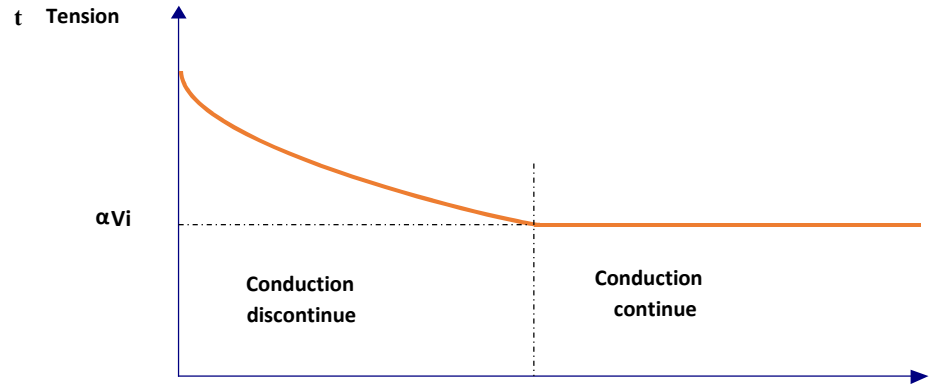


Figure III.6: *Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un convertisseur Buck.*

III.4 Convertisseur Buck-Boost

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la figure (III.7).

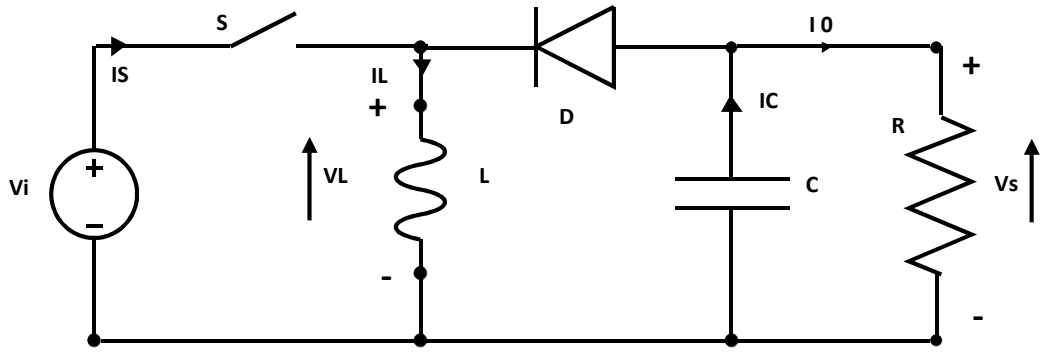


Figure III.7: *Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur.*

Dans ce dispositif, le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S :

- Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

Comparé aux convertisseurs Buck et Boost, les principales différences sont:

- La tension de sortie est de polarité inverse de celle d'entrée
- La tension de sortie peut varier de 0 à l'infinie (pour un convertisseur idéal). **[12]**

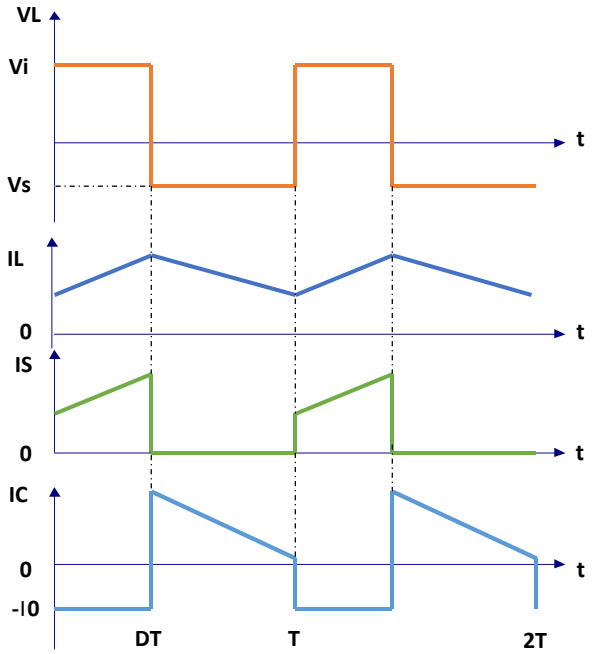


Figure III.8: *Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost.*

III.5 Fonction de transfert des convertisseurs *(DC-DC)*

Les fonctions de transfert des convertisseurs *(DC-DC)* équivalent en petits signaux sont données par les fonctions de transferts suivantes **[13]**:

$$G_{VS} = \frac{V_S}{D} = G_{do} \cdot \frac{\left(1-\frac{P}{w_Z}\right)}{1+\left(\frac{1}{w_0 \cdot Q}\right).P+\left(\frac{1}{w_0}\right).P^2} \qquad \textbf{(III.28)}$$

$$G_{VS} = \frac{V_S}{V_i} = G_{go} \cdot \frac{1}{1+\left(\frac{1}{w_0 \cdot Q}\right).P+\left(\frac{1}{w_0}\right).P^2} \qquad \textbf{(III.29)}$$

$$V_S = \frac{D}{D'} V_i = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot V_i \quad \text{Avec} \begin{cases} D = a \\ D' = 1 - a \end{cases} \qquad \textbf{(III.30)}$$

Où

Vi : Tension d'entrée du hacheur.

G_{VS} : est la fonction de transfert du hacheur équivalent en petit signaux.

D : Le rapport cyclique.

Convertisseur dc-dc	G_{go}	G_{do}	ω_0	Q	ω_z
buck	D	$\frac{V_S}{D}$	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$	$R.\sqrt{\frac{C}{L}}$	∞
boost	$\frac{1}{D'}$	$\frac{V_S}{D'}$	$\frac{D'}{\sqrt{LC}}$	$D'.R.\sqrt{\frac{C}{L}}$	$\frac{D'^2.R}{L}$
Buck-boost	$-\frac{D}{D'}$	$\frac{V_S}{DD'^2}$	$\frac{D'}{\sqrt{LC}}$	$D'.R.\sqrt{\frac{C}{L}}$	$\frac{D'^2.R}{D.L}$

Tableau III.1 : *Paramètres des fonctions de transfert de base en petits-signaux de quelques convertisseurs (DC-DC).*

III.6 Modélisation de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC

III.6.1 *Structure de l'onduleur NPC à cinq niveaux*

Cet onduleur dit à cinq niveaux car il délivre 5 niveaux de tension (+2Uc, +Uc, 0, -Uc et –2Uc). La structure choisie dans ce travail est de l'onduleur de tension triphasé à cinq niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamping) **[13] [14]** (la structure NPC était proposée par NABAE 1981).

La symétrie des onduleurs triphasés à cinq niveaux permet leur modélisation par bras. Ainsi on commencera par définir un modèle global d'un bras sans à priori sur la commande figure III.11. On montrera ensuite comment déduire celui d'un onduleur complet.

La figure III.9 représente l'onduleur de tension triphasé à cinq niveaux NPC :

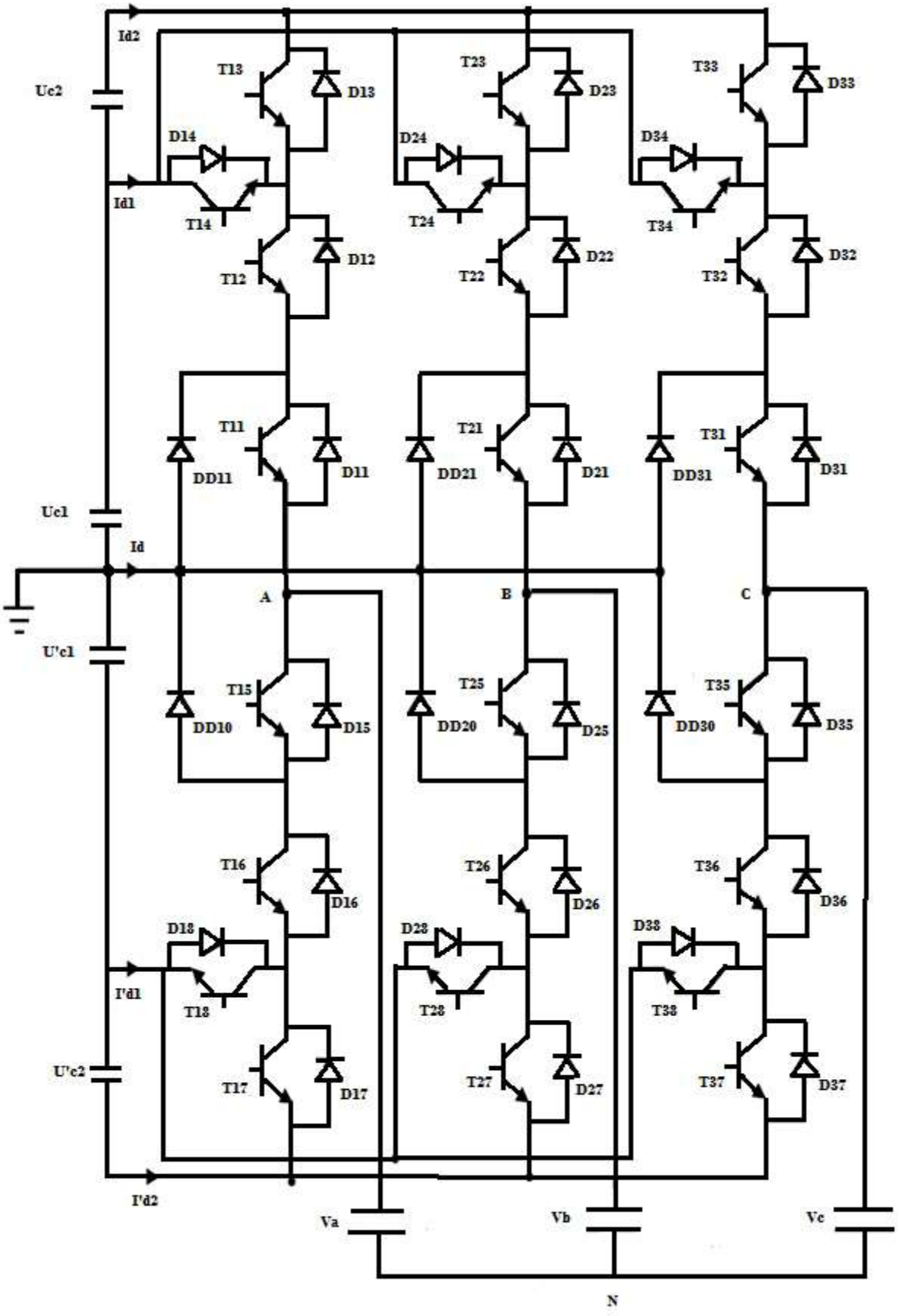


Figure III.9: *Onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC.*

On représente chaque paire transistor T_{Ks}, diode D_{Ks} par un seul interrupteur bidirectionnel TD_{Ks}, figure.III.10.

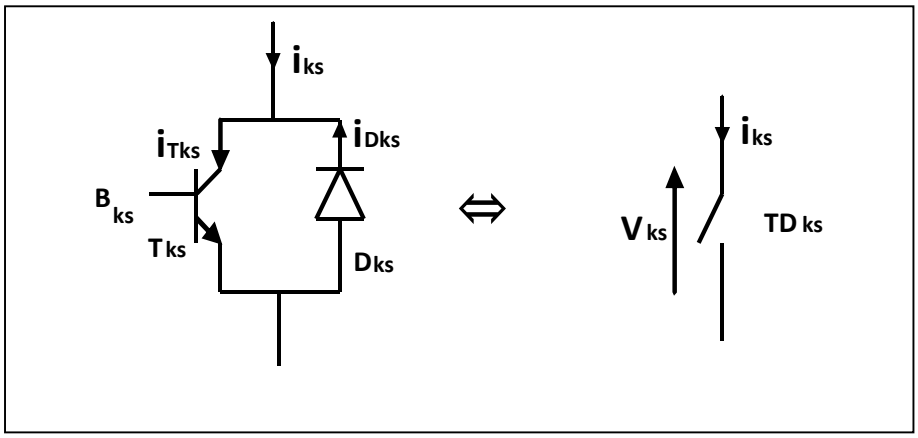


Figure III.10: *Interrupteur bidirectionnel équivalent du paire transistor–diode.*

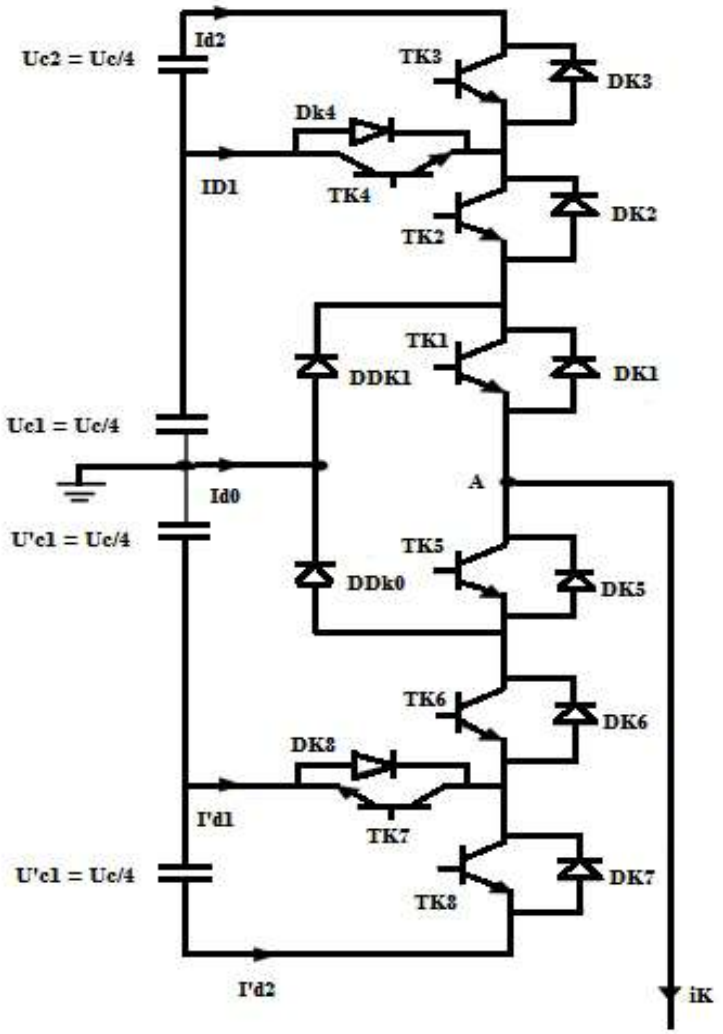


Figure III.11: *Structure d'un bras d'onduleur à cinq niveaux.*

III.6.2 *Les différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux*

Une analyse topologique d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC montre sept configurations. Ces différentes configurations sont représentées par la figure III.12,

Les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations sont données dans le tableau III.1 avec (M origines des potentiels et V_K le potentiel du nœud k du bras k).

Pour la configuration E0 le potentiel dépend de la charge de l'onduleur.

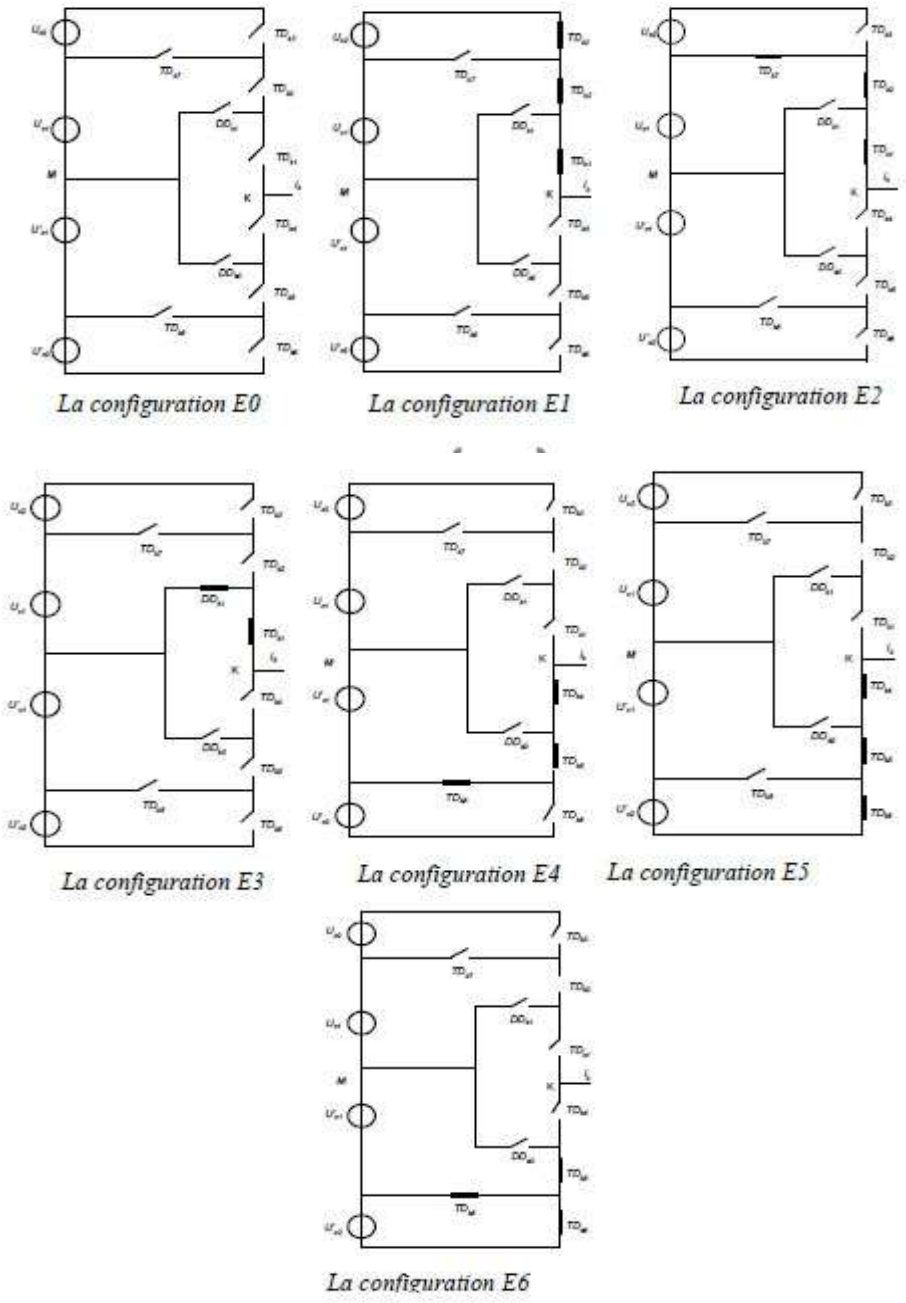


Figure.III.12 : *Différentes configurations pour un bras l'onduleur à cinq niveaux.*

configuration	Grandeurs électriques
E^0	$i_k = 0$
E^0 E^1	$v_{km}^0 = U_{c1} + U_{c2} = 2U_c$
E^1 E^2	$v_{km}^1 = v_{kn}^1 = U_{c1} = U_c$
E^2 E^3	$v_{km}^2 = v_{km}^3 = 0$
E^3 E^4	$v_{km}^3 = v_{km}^4 = -U_{c1} = -U_c$
E^4 E^5	$v_{km}^4 = v_{km}^5 = -U_{c1} = -U_{c2} = -2U_c$
E^5 E^6	$v_{km}^5 = v_{km}^6 = 0$

Tableau.III.2 *Grandeurs électriques pour chacune des configurations d'un bras k.*

III.6.3 *Modélisation en vue de la commande*

L'alimentation en tension de l'onduleur est considérée comme parfaite. En pratique cela se traduit par le fait quelque soit le courant i_K délivré par cette alimentation, la tension à ces bornes reste constante. $\frac{dU_C}{dt} = 0$ Cette tension peut être symétrique ou asymétrique. **[13] [14]**

Dans notre cas on suppose que$(U_{c1} = U_{c2} = U_{c3} = U_{c3} = U_c)$.

La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable devant la tension d'alimentation qui est de l'ordre de quelques centaines de volts.

III.6.4 *Commandabilité des convertisseurs statiques*

Un convertisseur statique est dit en mode commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe et non plus des commandes internes. Nous supposerons dans la suite que cette condition est toujours vérifiée.

Dans ces conditions, on peut définir la notion de connexion.

- **Fonction de Connexion :**

Chaque interrupteur TD_{ks} introduit une fonction de connexion F_{ks} , qui décrit son État ouvert ou fermé ; tel que :

$$\mathbf{TD_{ks}} = \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si l'interrupteur } \mathbf{TD_{ks}} \text{ ferme} \\ \mathbf{0} & \text{dans le cas contraire} \end{cases} \qquad \textbf{(III.31)}$$

- **Fonction Génératrice :**

La fonction génératrice de connexion F_{ksg} est une fonction continue qui représente la valeur moyenne de la fonction discontinue de connexion F_{ks} sur une période de commutation T_c. Cette période T_c est supposée infiniment petite.

La fonction génératrice de connexion F_{ksg} est donnée par l'expression suivante :

$$\mathbf{F_{ksg} = \left[\frac{1}{T_c}\int_{nT_c}^{(n+1)T_c} F_{ks}(\tau)\, d\tau\right] \epsilon [0,1] avec\ n \epsilon N\ et\ T_c \to 0.} \qquad \textbf{(III.32)}$$

- **Commande complémentaire :**

Pour éviter des court-circuites des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte une commande complémentaire.

Pour un bras k de l'onduleur triphasé à cinq niveaux, figure.III.11, plusieurs complémentaires sont possible, la commande optimale est définie comme suit :

$$\begin{cases} B_{k4} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k5} = \overline{B_{k1}} \\ B_{k6} = \overline{B_{k3}} \end{cases} \qquad \textbf{(III.33)}$$

Avec B_{ks} , commande de base du transistor T_{ks} de ce bras k. Ainsi avec cette commande complémentaire, les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{k4} = 1 - F_{k2} \\ F_{k5} = 1 - F_{k1} \\ F_{k6} = 1 - F_{k3} \end{cases} \qquad \textbf{(III.34)}$$

Pour l'onduleur NPC à cinq niveaux, on définit en plus une fonction de connexion du demi-bras, qu'on notera F_{km}^{b} avec :

k = numéro du bras. m= 1 pour le demi bras du haut, et m=0 pour le demi bras du bas.

Pour un bras k, les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^{b} = F_{k1}.F_{k2}.F_{k3} \\ F_{k0}^{b} = F_{k4}.F_{k5}.F_{k6} \end{cases} \qquad \textbf{(III.35)}$$

F_{k1}^{b} est associée au demi bras du haut $(TD_{k1}.TD_{k2}.TD_{k3})$, et F_{k0}^{b} au demi-bras du bas $(TD_{k4}.TD_{k5}.TD_{k6})$. **[13]**

III.6.5 *Modèle de connaissance de l'onduleur triphasé à cinq niveaux*

Les potentiels des nœuds, *A, B* et *C* de l'onduleur triphasé à cinq niveaux par rapport au point milieu *M* sont donnés par le système suivant:

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}F_{12}(1-F_{13})U_{c1} + F_{11}F_{12}F_{13}(U_{c1}+U_{c2}) - F_{14}F_{15}(1-F_{16})U'_{c1} - F_{14}F_{15}F_{16}(U'_{c1}+U'_{c2}) \\ V_{BM} = F_{21}F_{22}(1-F_{23})U_{c1} + F_{21}F_{22}F_{23}(U_{c1}+U_{c2}) - F_{24}F_{25}(1-F_{26})U'_{c1} - F_{24}F_{25}F_{26}(U'_{c1}+U'_{c2}) \\ V_{CM} = F_{31}F_{32}(1-F_{33})U_{c1} + F_{31}F_{32}F_{33}(U_{c1}+U_{c2}) - F_{34}F_{35}(1-F_{36})U'_{c1} - F_{34}F_{15}F_{36}(U'_{c1}+U'_{c2}) \end{cases} \quad \textbf{(III.36)}$$

Pour l'onduleur triphasé à cinq niveaux, les fonctions de connexion des demi-bras sont définies selon les relations suivantes:

$$\begin{cases} F_{11}^{b} = F_{11}F_{12}F_{13} \\ F_{10}^{b} = F_{14}F_{15}F_{16} \end{cases}, \quad \begin{cases} F_{21}^{b} = F_{21}F_{22}F_{23} \\ F_{20}^{b} = F_{24}F_{25}F_{26} \end{cases}, \quad \begin{cases} F_{31}^{b} = F_{31}F_{32}F_{33} \\ F_{30}^{b} = F_{34}F_{35}F_{36} \end{cases} \quad \textbf{(III.37)}$$

Les fonctions de connexion des interrupteurs placée en parallèle sont définies comme suit:

$$\begin{cases} F_{17} = F_{11}F_{12}(1-F_{13}) \\ F_{18} = F_{14}F_{15}(1-F_{16}) \end{cases}, \begin{cases} F_{27} = F_{21}F_{22}(1-F_{23}) \\ F_{28} = F_{24}F_{25}(1-F_{26}) \end{cases}, \begin{cases} F_{37} = F_{31}F_{32}(1-F_{33}) \\ F_{38} = F_{34}F_{35}(1-F_{36}) \end{cases} \quad \textbf{(III.38)}$$

En introduisant ces fonctions dans le système III.36, on aboutit au système suivant:

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{17}U_{c1} + F_{11}^{b}(U_{c1}+U_{c2}) - F_{18}U'_{c1} - F_{10}^{b}(U'_{c1}+U'_{c2}) \\ V_{BM} = F_{27}U_{c1} + F_{21}^{b}(U_{c1}+U_{c2}) - F_{28}U'_{c1} - F_{20}^{b}(U'_{c1}+U'_{c2}) \\ V_{CM} = F_{37}U_{c1} + F_{11}^{b}(U_{c1}+U_{c2}) - F_{38}U'_{c1} - F_{30}^{b}(U'_{c1}+U'_{c2}) \end{cases} \quad \textbf{(III.39)}$$

Sous forme matricielle l'équation III-37 s'écrit:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{17}+F_{11}^{b} \\ V_{27}+F_{21}^{b} \\ V_{37}+F_{31}^{b} \end{bmatrix} U_{c1} + \begin{bmatrix} F_{11}^{b} \\ F_{21}^{b} \\ F_{31}^{b} \end{bmatrix} U_{c2} \begin{bmatrix} F_{18}+F_{10}^{b} \\ F_{28}+F_{20}^{b} \\ F_{38}+F_{30}^{b} \end{bmatrix} - U'_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^{b} \\ F_{20}^{b} \\ F_{30}^{b} \end{bmatrix} U'_{c2} \quad \textbf{(III.40)}$$

Dans le cas où $U_{c1} = U_{c2} = U'_{c1}=U'_{c2} = U_c$, la relation III-38 s'écrit comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ V_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ V_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} U_c \qquad \textbf{(III.41)}$$

Les équations de mailles du système source – onduleur - charge donnent:

$$V_{AM} + V_{BM} + V_{CM} = V_A + V_B + V_C + 3V_{NM} \qquad \textbf{(III.42)}$$

Puisque la charge triphasée est couplée en étoile avec neutre isolé :

$$V_{NM} = {}^1\!/_3 \ (V_{AM} + V_{BM} + V_{CM}) \qquad \textbf{(III.43)}$$

Les tenions simples aux bornes aux de la charge sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AM} - V_{NM} = {}^1\!/_3 \ (2V_{AM} - V_{BM} - V_{CM}) \\ V_B = V_{BM} - V_{NM} = {}^1\!/_3 \ (-V_{AM} + 2V_{BM} - V_{CM}) \\ V_C = V_{CM} - V_{NM} = {}^1\!/_3 \ (-V_{AM} - V_{BM} + 2V_{CM}) \end{cases} \qquad \textbf{(III.44)}$$

A partir des relations III-38 et III-42, on obtient le système matriciel ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = {}^1\!/_3 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{17} + F_{11}^b \\ F_{27} + F_{21}^b \\ F_{37} + F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} + \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c2} - \begin{bmatrix} F_{18} + F_{10}^b \\ F_{28} + F_{20}^b \\ F_{38} + F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{c1} \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U'_{c2} \right\} \qquad \textbf{(III.45)}$$

Dans le cas, $U_{c1} = U_{c2} = U'_{c1}=U'_{c2} = U_c$ cette relation se réduit à :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = {}^1\!/_3 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{17} + 2F_{11}^b - F_{18} - 2F_{10}^b \\ F_{27} + 2F_{21}^b - F_{28} - 2F_{20}^b \\ F_{37} + 2F_{31}^b - F_{38} - 2F_{30}^b \end{bmatrix} \qquad \textbf{(III.46)}$$

Ainsi les courants d'entrée de l'onduleur, s'expriment en fonction des courants de la charge, i_1, i_2, i_3 en utilisant les fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{17}i_1 + F_{27}i_2 + F_{37}i_3 \\ i_{d2} = F_{11}F_{12}F_{13}i_1 + F_{21}F_{22}F_{23}i_2 + F_{31}F_{32}F_{33}i_3 \\ i'_{d2} = F_{10}i_1 + F_{20}i_2 + F_{30}i_3 \\ i'_{d2} = F_{14}F_{15}F_{16}i_1 + F_{24}F_{25}F_{26}i_2 + F_{34}F_{35}F_{36}i_3 \end{cases} \qquad \textbf{(III.47)}$$

En remplaçant les fonctions de connexion des interrupteurs par les fonctions de connexion des demi-bras, le système (III-47) devient :

$$\begin{cases} \mathbf{i_{d1}} = \mathbf{F_{17}i_1} + \mathbf{F_{27}i_2} + \mathbf{F_{37}i_3} \\ \mathbf{i_{d2}} = \mathbf{F_{11}^b i_1} + \mathbf{F_{21}^b i_2} + \mathbf{F_{31}^b i_3} \\ \mathbf{i'_{d1}} = \mathbf{F_{18}i_1} + \mathbf{F_{28}i_2} + \mathbf{F_{38}i_3} \\ \mathbf{i'_{d2}} = \mathbf{F_{10}^b i_1} + \mathbf{F_{20}^b i_2} + \mathbf{F_{30}^b i_3} \end{cases} \quad \textbf{(III.48)}$$

Le courant i_{d0} d'exprime en fonction des courants d'entrée et courants de charge par la relation :

$$\mathbf{i_{d0}} + \mathbf{i_{d1}} + \mathbf{i_{d2}} + \mathbf{i'_{d1}} + \mathbf{i'_{d2}} = \mathbf{i_1} + \mathbf{i_2} + \mathbf{i_3} \quad \textbf{(III.49)}$$

D'où le courant i_{d0} :

$$\mathbf{i_{d0}} = (\mathbf{i_1} + \mathbf{i_2} + \mathbf{i_3}) - (\mathbf{F_{17}} + \mathbf{F_{18}} + \mathbf{F_{11}^b} + \mathbf{F_{10}^b})\,\mathbf{i_1} - (\mathbf{F_{27}} + \mathbf{F_{28}} + \mathbf{F_{21}^b} + \mathbf{F_{20}^b})\,\mathbf{i_2} - (\mathbf{F_{37}} + \mathbf{F_{38}} + \mathbf{F_{31}^b} + \mathbf{F_{30}^b})\,\mathbf{i_3} \quad \textbf{(III.50)}$$

III.7 Stratégies de commande de l'onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC

La modulation de largeur d'impulsions MLI (en anglo-saxonne PWM) (Pulse Width Modulation) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortis et chaque alternance d'une tension de sortie est formé d'une succession de créneaux des largeurs convenables.

Afin de générer une source de tension la plus sinusoïdale possible, différentes stratégies de modulation de largeur d'impulsion ont été proposées par différents auteurs.

Toutes les stratégies MLI appliquées pour la commande de l'onduleur à deux niveaux sont applicables pour l'onduleur à cinq niveaux après quelques modifications et adaptations. Il y a différentes stratégies parmi ces stratégies on cite :

- la commande triangulo-sinusoïdale avec une seule porteuse.
- la commande triangulo-sinusoïdale avec 4 porteuses en dents de scie.
- la commande triangulo-sinusoïdale avec 4 porteuses triangulaires.
- la commande vectorielle.
- la commande élimination d'harmoniques.
- la commande par hystérésis en courant.

L'essor de la modulation de largeur d'impulsions est lie aux progrès sur les semi-conducteurs de puissance; l'augmentation du nombre des commutations entraîne des pertes excessives si on n'avait pas réussi à les réduire à chaque commutation. **[5][13]**

Nous traiterons la commande MLI avec la stratégie SPWM.

III.7.1 *Commande triangulo-sinusoidale à quatre porteuses triangulaires*

Pour la commande triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires. Dans cette méthode on va utiliser quatre porteuses triangulaires afin d'éliminer les harmoniques pairs.

Cette stratégie est caractérisée par l'indice de modulation **m**, et le taux de modulation **r.**

Avec : $\mathbf{m} = \frac{\mathbf{f_p}}{\mathbf{f_{ref}}}$ et $\mathbf{r} = \frac{\hat{\mathbf{V}}_{\mathbf{ref}}}{\hat{\mathbf{U}}_{\mathbf{p}}}$.

Où

m : L'indice de modulation.

r : Taux de modulation.

f_p : La fréquence de porteuse.

f_{ref} : La fréquence de référence.

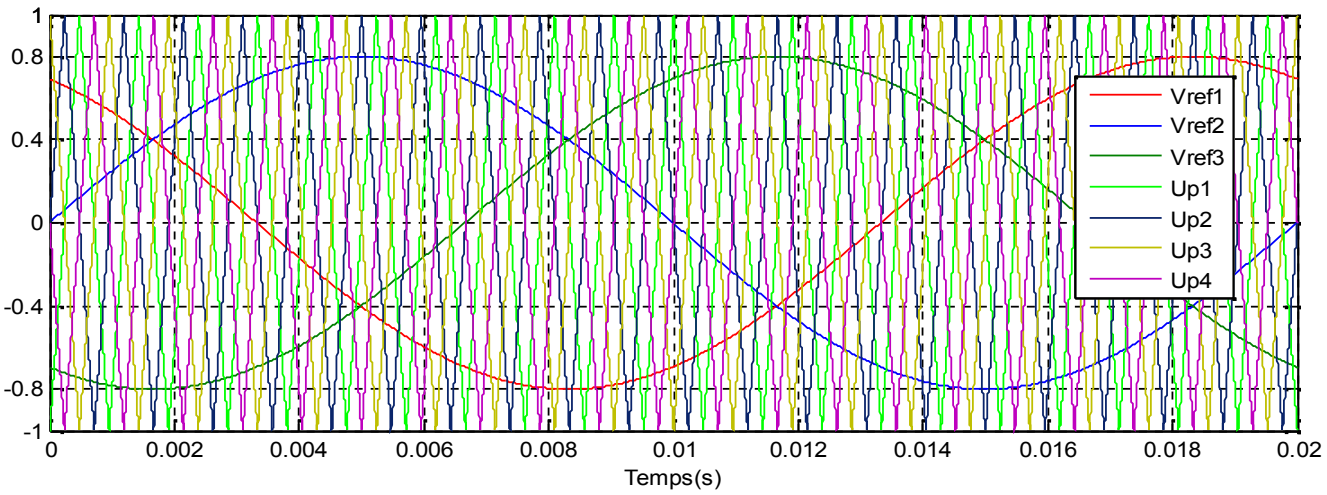
$\hat{V}_{ref}$: La tension maximale de référence.

$\hat{U}_p$: La tension maximale de porteuse.

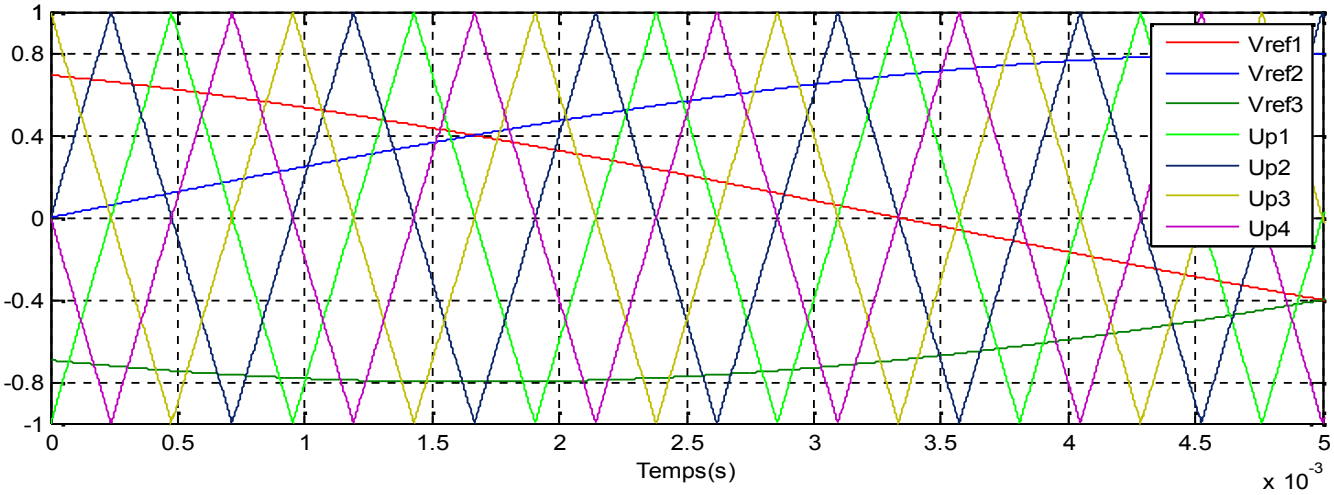
III.7.2 *Algorithme*

On utilise quatre porteuses triangulaires bipolaires ($U_{p1}, U_{p2}, U_{p3}, U_{p4}$) déphasées d'un quart de période ($\frac{T_p}{4}$) l'une par rapport à l'autre (T_p période de la porteuse) comme la figure III.13 montre. Les équations de ces porteuses sont données par le système III-51.

Les étapes de commande sont les mêmes que celles vue précédemment.



a-(signeaux)



b-(zoom signeaux)

Figure III.13: *Les différents signaux de la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires (m =21, r =0.8).*

$$\begin{cases} U_{p1} = \begin{cases} U_{pm}\left(\frac{4t}{T_p} - 1\right); 0 \le t \le \frac{T_p}{2} \\ U_{pm}\left(-\frac{4t}{T_p} + 3\right); \frac{T_p}{2} \le t \le T_p \end{cases} \\ U_{p2} = \begin{cases} U_{pm}\left(-\frac{4t}{T_p}\right); 0 \le t < \frac{T_p}{4} \\ U_{pm}\left(\frac{4t}{T_p} - 2\right); \frac{T_p}{4} \le t < \frac{3T_p}{4} \\ U_{pm}\left(-\frac{4t}{T_p} + 4\right); \frac{3T_p}{4} \le t < \frac{T_p}{4} \end{cases} \\ U_{p3} = -U_{p1} \\ U_{p4} = -U_{p2} \end{cases} \quad \textbf{(III.51)}$$

1er étape : détermination des tensions intermédiaires $(V_{k1}, V_{k2}, V_{k3}, V_{k4})$:

$$\begin{cases} \mathbf{V_{refk} \geq U_{p4} \Rightarrow V_{k4} = 2\,U_c} \\ \mathbf{V_{refk} < U_{p4} \Rightarrow V_{k4} = U_c} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{V_{refk} \geq U_{p3} \Rightarrow V_{k3} = U_c} \\ \mathbf{V_{refk} < U_{p3} \Rightarrow V_{k3} = 0} \end{cases} \qquad \textbf{(III.52)}$$

$$\begin{cases} \mathbf{V_{refk} \geq U_{p2} \Rightarrow V_{k2} = 0} \\ \mathbf{V_{refk} < U_{p2} \Rightarrow V_{k2} = -U_c} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{V_{refk} \geq U_{p1} \Rightarrow V_{k1} = U_c} \\ \mathbf{V_{refk} < U_{p1} \Rightarrow V_{k1} = 2U_c} \end{cases}$$

2éme étape : détermination du signal $\mathbf{V_{km}}$ et des ordres de commande $\mathbf{B_{ks}}$ des interrupteurs : $V_{km} = V_{k1} + V_{k2} + V_{k3} + V_{k4}$

$$\begin{cases} \mathbf{V_{km} = 2E \Rightarrow B_{k1} = 1; B_{k2} = 1; B_{k3} = 1} \\ \mathbf{V_{km} = E \Rightarrow B_{k1} = 1; B_{k2} = 1; B_{k3} = 0} \\ \mathbf{V_{km} = 0 \Rightarrow B_{k1} = 1; B_{k2} = 0; B_{k3} = 0} \\ \mathbf{V_{km} = -E \Rightarrow B_{k1} = 0; B_{k2} = 0; B_{k3} = 1} \\ \mathbf{V_{km} = -2E \Rightarrow B_{k1} = 1; B_{k2} = 0; B_{k3} = 0} \end{cases} \qquad \textbf{(III.53)}$$

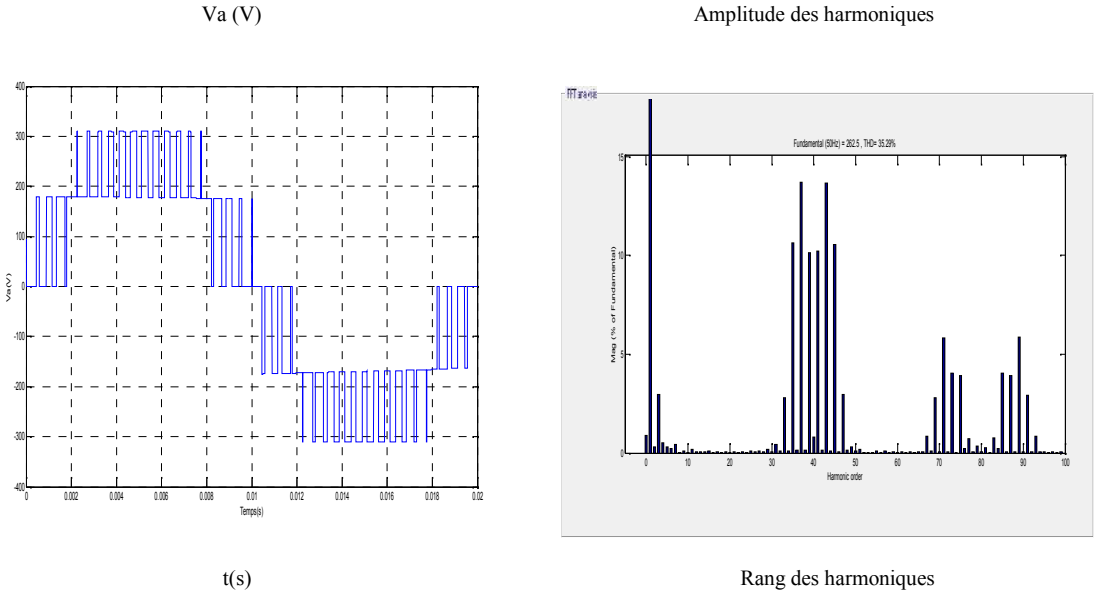


Figure.III.14: *La tension simple V_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires pour m=10, r=0.8.*

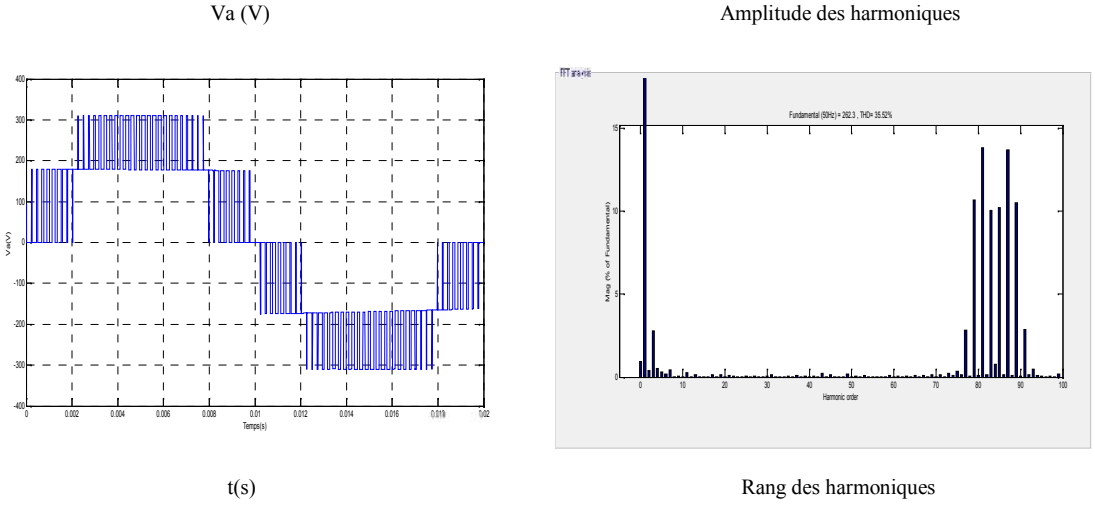


Figure.III.15: *La tension simple V_a et son spectre de l'onduleur triphasé à cinq niveaux commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à quatre porteuses triangulaires pour m=21, r=0.8.*

III.7.3 *Pont de clamping*

Afin d'améliorer les tensions d'entrée de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC en minimisant le déséquilibre entre les tensions U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}, et U_{c4} on utilise un pont d'équilibrage (pont de clamping inductif). On va shunter chaque condensateur par un transistor T_i et une inductance R_p. **[15]**

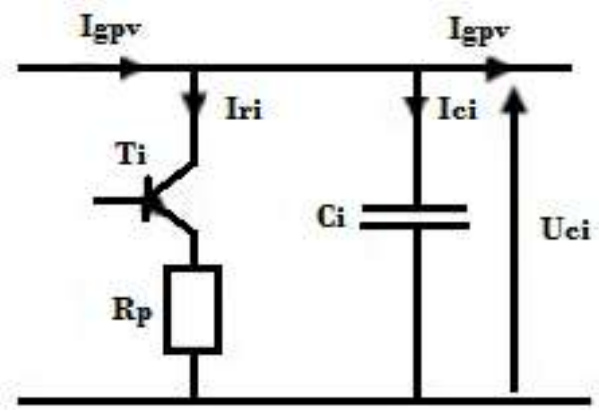


Figure III.16 : *Structure du pont de clamping.*

On définit :

$$\begin{cases} I_{r1} = \frac{U_{c1}}{R_p} \\ I_{r2} = \frac{U_{c2}}{R_p} \\ I_{r3} = \frac{U_{c3}}{R_p} \\ I_{r4} = \frac{U_{c4}}{R_p} \end{cases} \quad \textbf{(III.54)}$$

L'algorithme de commande du pont est le suivant :

$$\begin{aligned}
&\Delta U_{12} > 0 \square I_{r1} = 0 \text{ et } I_{r2} \neq 0 && (T_1 = 0 \text{ et } T_2 = 1)\\
&\Delta U_{12} < 0 \square I_{r1} \neq 0 \text{ et } I_{r2} = 0 && (T_1 = 1 \text{ et } T_2 = 0)\\
&\Delta U_{34} > 0 \square I_{r3} = 0 \text{ et } I_{r4} \neq 0 && (T_3 = 0 \text{ et } T_4 = 1)\\
&\Delta U_{34} < 0 \square I_{r3} = 0 \text{ et } I_{r4} = 0 && (T_3 = 1 \text{ et } T_4 = 0)
\end{aligned} \qquad \textbf{(III.55)}$$

Avec : $$\begin{cases}\Delta U_{12} = U_{c1} - U_{c2}\\ \Delta U_{34} = U_{c3} - U_{c4}\end{cases} \qquad \textbf{(III.56)}$$

III.7.4 *Circuits d'équilibrage inductif pour Cascade d'un générateur photovoltaïque - Onduleur Triphasé à Cinq Niveaux à Structure NPC*

Pour réduire les pertes par effet Joule, nous utilisons le circuit d'équilibrage inductif. La figure III.19 montre un tel circuit à base de deux inductances chacune d'elle sert à stabiliser les tensions des deux condensateurs adjacentes. **[15]**

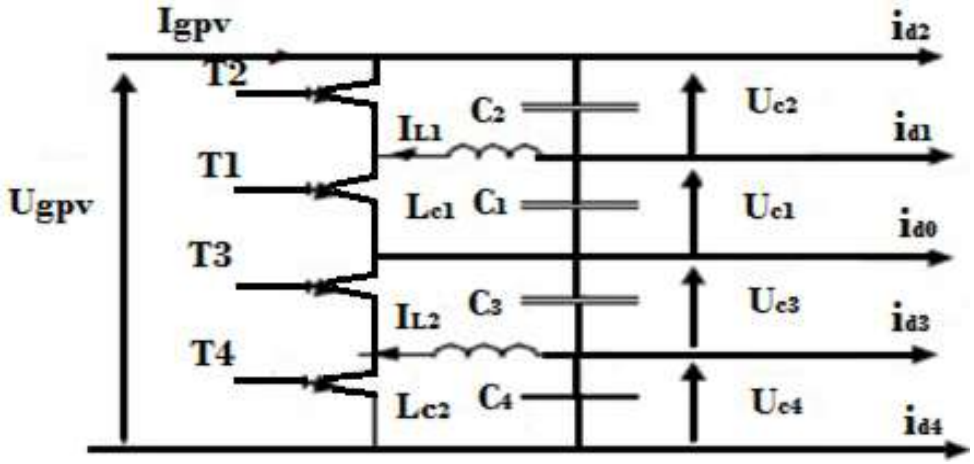


Figure III.17 : *Structure de Circuits d'équilibrage inductif pour le cas d'un générateur photovoltaïque.*

Le modèle du pont de clamping est comme suit :

$$\begin{cases} L_{c1}\frac{diL_{c1}}{dt} = S_1U_{c1} - S_2U_{c2}\\ L_{c2}\frac{diL_{c2}}{dt} = S_4U_{c4} - S_3U_{c3}\end{cases} \qquad \textbf{(III.57)}$$

Les tensions aux bornes des condensateurs sont exprimées par le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = I_{gpv} - i_{d1} - i_{d2} - S_1 IL_{Lc1} \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = I_{gpv} - i_{d2} - S_2 IL_{Lc2} \\ C_3 \frac{dU_{c3}}{dt} = I_{gpv} + i_{d3} + i_{d4} - S_3 IL_{Lc2} \\ C_4 \frac{dU_{c4}}{dt} = I_{gpv} + i_{d4} - S_4 IL_{Lc1} \end{cases} \quad \textbf{(III.58)}$$

Tel que S_1, S_2, S_3 et S_4 sont données par l'algorithme suivent :

$$\begin{cases} U_{c2} > U_{c1} \Rightarrow S_1 = 0 \text{ et } S_2 = 1 \\ U_{c2} < U_{c1} \Rightarrow S_1 = 1 \text{ et } S_2 = 0 \\ U_{c3} > U_{c4} \Rightarrow S_3 = 1 \text{ et } S_4 = 0 \\ U_{c3} > U_{c4} \Rightarrow S_3 = 0 \text{ et } S_4 = 1 \end{cases} \quad \textbf{(III.59)}$$

- **Résultats de simulation sans pont de clamping :**

L'onduleur de tension à cinq niveaux est commandé par la stratégie triangulo sinusoïdale à quatre porteuses avec m=21 et r =0.8, le générateur alimentant l'onduleur a une tension de (4×200V).

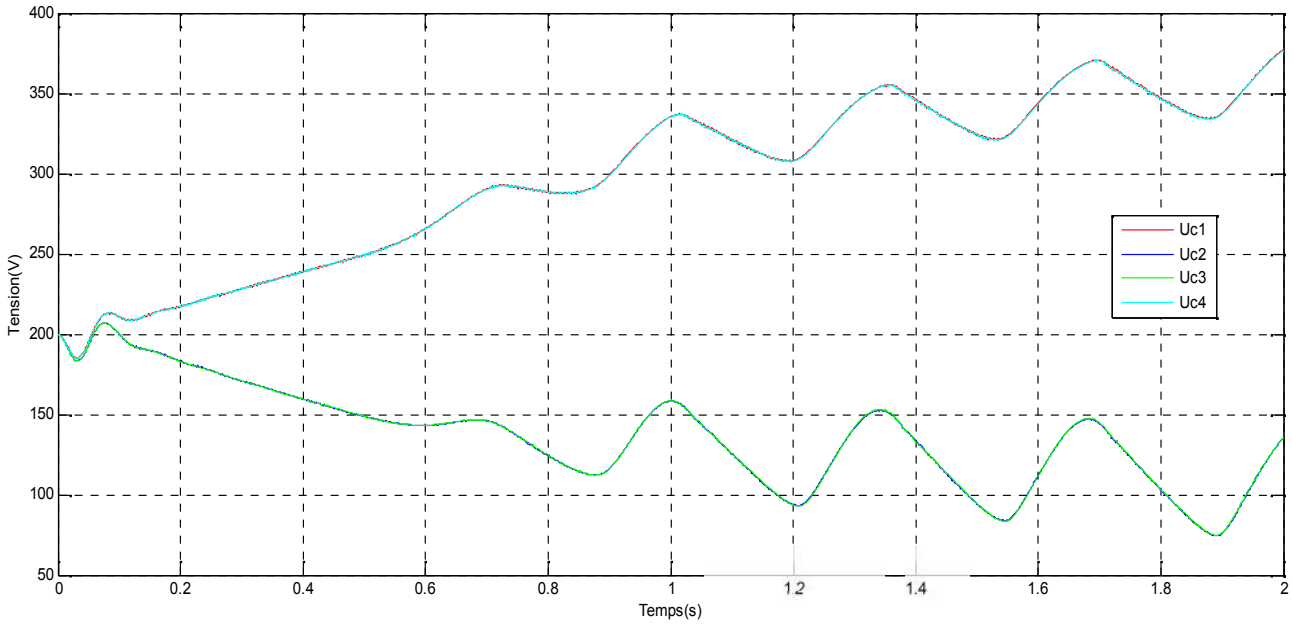
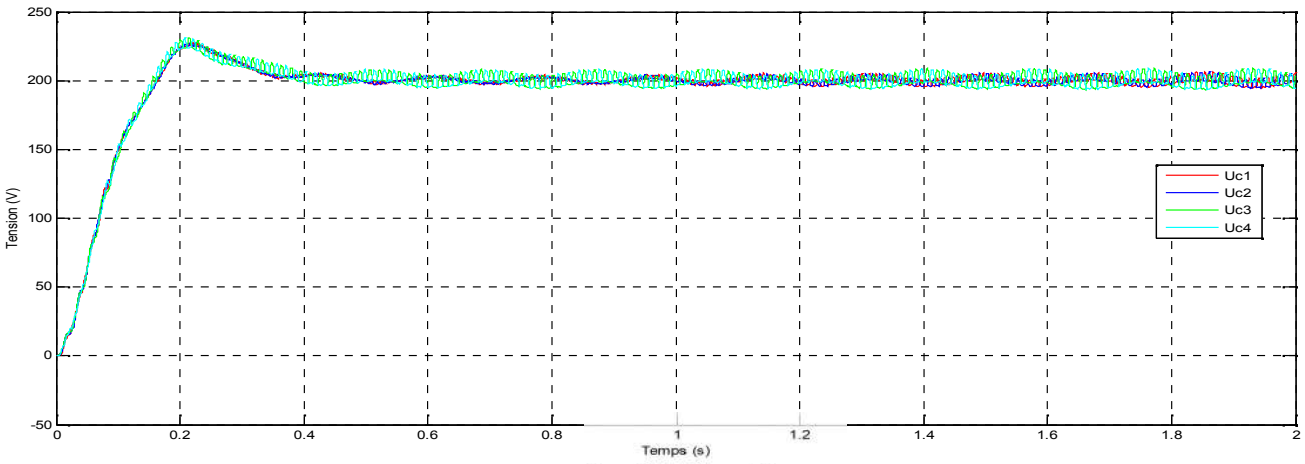


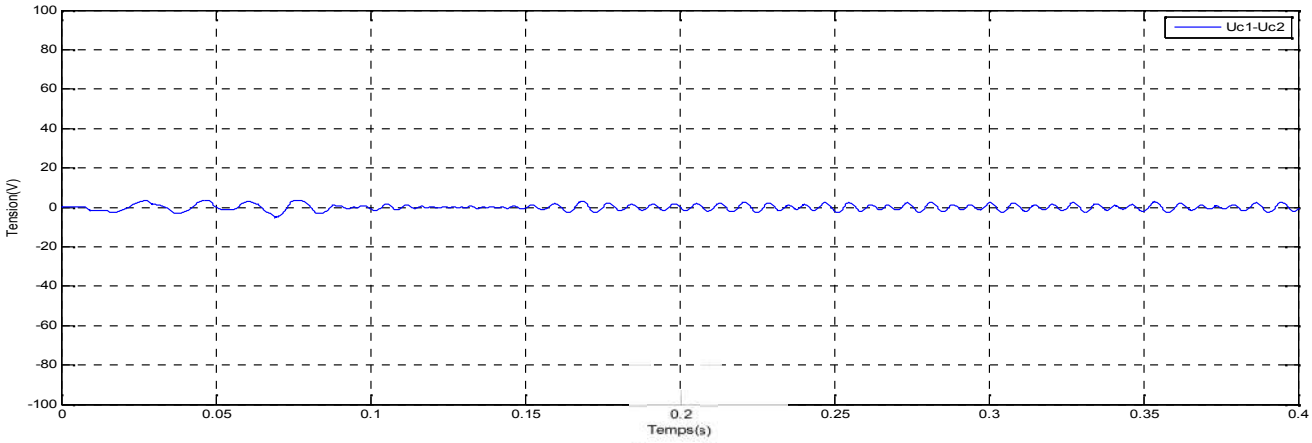
Figure III.18 : *Les tensions d'entrée* U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} *et* U_{c4} .

- **Résultats de simulation avec pont de clamping :**

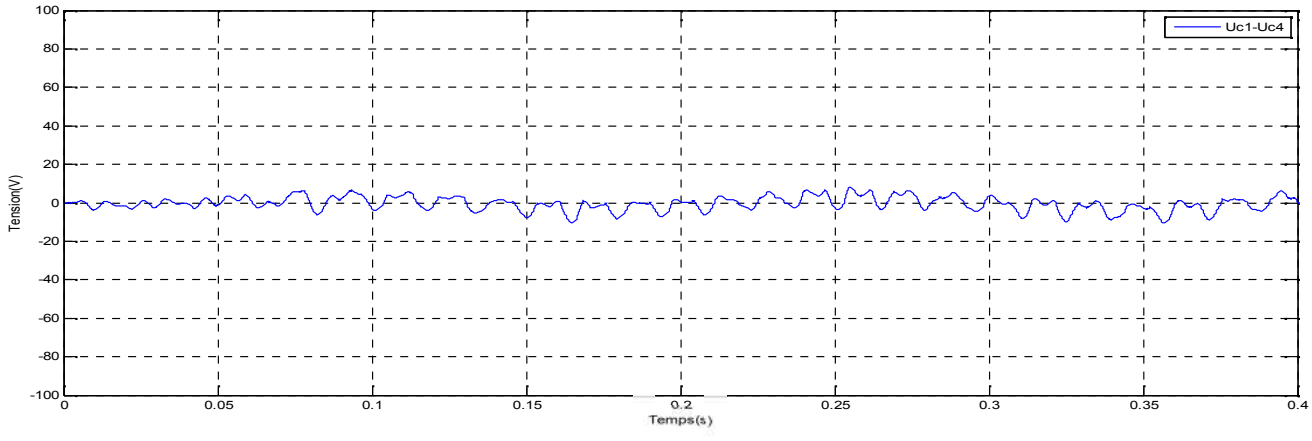
Les paramètres du circuit intermédiaire sont : L_{c1}= L_{c2}=20mH. Et C_i=10 mF.



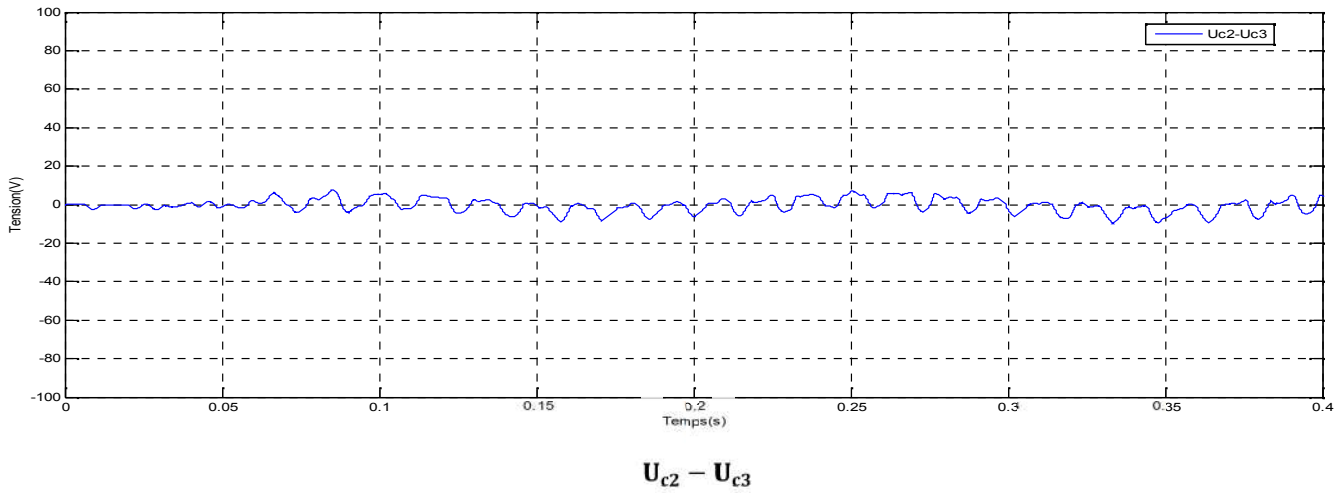
$\mathbf{U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}}$ **et** $\mathbf{U_{c4}}$



$\mathbf{U_{c1} - U_{c2}}$



$\mathbf{U_{c1} - U_{c4}}$



$\mathbf{U_{c2} - U_{c3}}$

Figure III.19 : *Les tensions d'entrée* U_{c1}, U_{c2}, U_{c3} *et* U_{c4} *, et leurs différences* $U_{c1} - U_{c2}$, $U_{c1} - U_{c4}$ *et* $U_{c2} - U_{c3}$.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit généralement tous les équipements d'électronique de puissance utilisés en adaptation avec les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ainsi que, leur principe de fonctionnement, leurs modèles mathématiques et les différentes types de commande et de régulation.

Dans ce qui suit, on a présenté le modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC.

Après avoir la commande de l'onduleur triphasé à cinq niveaux, on a défini une commande complémentaire optimale pour un fonctionnement totalement commandable.

Ainsi, nous avons utilisé une stratégie de commande MLI à quatre porteuses triangulaires-sinusoïdales de l'onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC, cette structure a un inconvénient est la fluctuation du point milieu, ce problème de déséquilibrage peut résolu par l'ajout de circuit électronique auxiliaire (pont de clamping inductif).

Chapitre IV

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau

IV.1 Introduction

Les problèmes d'approvisionnement en énergie rencontrés à l'échelle mondiale ne sont pas uniquement dus à la destruction de l'environnement et aux changements climatiques qui en découlent, mais bien aussi à une croissance de la consommation et à la tarification des ressources fossiles. Une consommation mondiale en hausse, en particulier en ce qui concerne l'énergie électrique et une tendance à la libéralisation sont à l'origine de changements considérables, tant dans le domaine des réseaux d'alimentation que pour le remplacement du parc des centrales électriques. Les conséquences, pour le moins préoccupantes, se répercutent sur la disponibilité et la qualité de l'énergie. C'est pourquoi les solutions recherchées doivent être réalisables techniquement parlant tout en répondant aux exigences en matière de durabilité.

Dans ce chapitre, une étude descriptive générale des systèmes photovoltaïques reliés au réseau électrique est présentée. Cette étude comprend : la conception des systèmes photovoltaïques, leurs types, les problèmes produits, les techniques et les conditions des normes d'interconnexions. **[16]**

IV.2 Le photovoltaïque dans les systèmes énergétiques

Les consommateurs de l'énergie électrique sont surtout alimentés par des centrales électriques situées à de grandes distances. Ceci nécessite de longues lignes de transmission et réseaux de distribution. Ces réseaux d'alimentation fournissent au consommateur un courant alternatif présentant une fréquence et une tension pratiquement constantes (par exemple 230V pour 50 Hz).

On peut parler d'une augmentation de l'efficacité globale allant de pair avec une amélioration de la situation économique qui répond aux critères de durabilité. Cette structure décentralisée de l'alimentation en énergie correspond au caractère décentralisé des énergies renouvelables. En fonction des conditions régionales, le concept peut être mis en application soit par le raccordement d'une installation photovoltaïque au réseau public, soit par le montage d'un système autonome ou en îlotage servant à alimenter les consommateurs éloignés non raccordés à un réseau d'alimentation. Ainsi, on peut opérer la classification des configurations des systèmes photovoltaïques décentralisés pour l'alimentation en courant alternatif comme suit :

a) Photovoltaïque dans les réseaux d'alimentation

* Photovoltaïque seul.
* Photovoltaïque avec accumulateurs électriques.

b) Photovoltaïque dans des applications éloignées du réseau

* Systèmes photovoltaïque batterie.
* Systèmes hybrides photovoltaïques (avec présence d'autres sources).

Les configurations d'alimentation représentées par la Figure IV.1 possèdent une structure modulaire. La structure couplée au réseau est l'application photovoltaïque qui prédomine actuellement dans les nations industrialisées que sont l'Europe, le Japon et les Etats-Unis. **[17][18]**

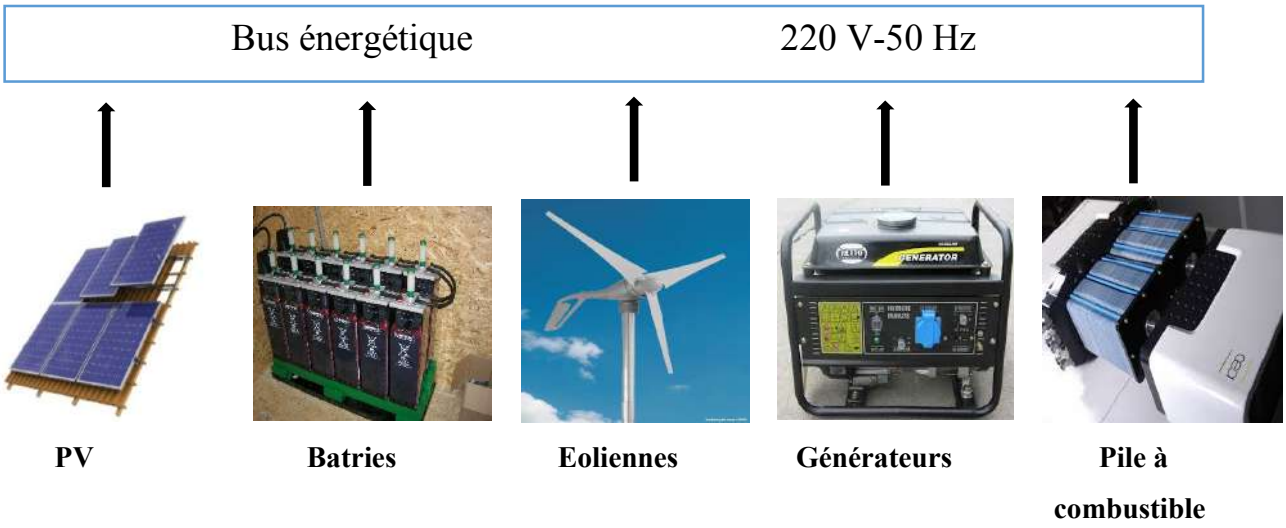


Figure IV.1 : *Représentation de l'ingénierie des systèmes hybrides.*

IV.3 Technologies des onduleurs couplés au réseau

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau.

L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique.

Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure.

Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau. **[18]**

IV.3.1 *Onduleurs modulaires (module inverter)*

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel.

Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant. **[18]**

IV.3.2 *Onduleurs centralisés (central inverter)*

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif.

Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle.

Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série.

Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série. **[18]**

IV.3.3 *Onduleurs "String" ou "de Rangée"*

L'onduleur String est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) de modules solaires sont connectés en série.

Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé. **[18]**

Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs string en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante.

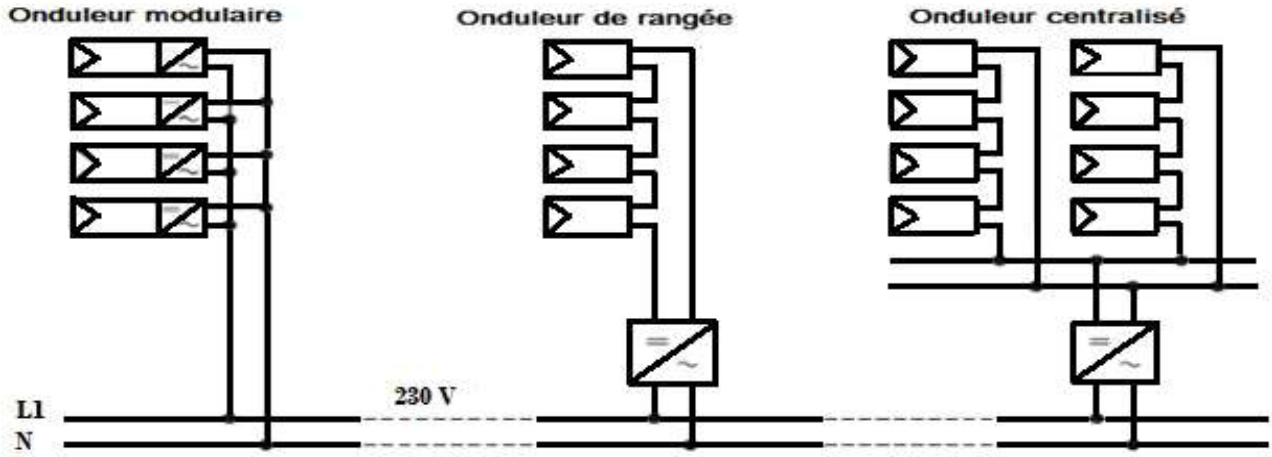


Figure IV.2 : *Classification des onduleurs PV connectés au réseau.* **[18]**

Ils sont toujours conçus en triphasé. La plupart du temps, les systèmes (*PV)* sont installés dans les réseaux de distribution basse tension avec une puissance allant jusqu'à 30 *KVA*.

Le type du réseau choisi au raccordement détermine la possibilité du choix des systèmes de surveillance, et la détection en cas d'islanding (défaut).

IV.4 Classifications des centrales photovoltaïques connectées au réseau (*CPCR)*

Une première classification des (*CPCR)* en fonction de leur taille peut être faite de la manière suivante **:**

IV.4.1 *Centrales de petite taille (Pw = 1 à 10 KW)*

Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings,... Elles se connectent au réseau basse tension.

IV.4.2 *Centrales de taille moyenne (Pw = 10 à 500 KW)*

Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille. **[18][19]**

IV.4.3 *Centrales de grande taille (Pw ≥ 500 KW)*

Ce sont des systèmes centralisés et sont de la propriété de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non. **[18][19]**

IV.5 Structure générale d'un système photovoltaïque

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque **[18] [19**] :

- **Les systèmes à connexion directe au réseau**

Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique.

- **Le système à bus continu intermédiaire**

Le générateur photovoltaïque est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée, celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau.

Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable (230V).

Dans la suite de cette partie, différents montages seront décrits, en précisant leurs avantages et inconvénients.

IV.6 Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau

Les critères de compatibilité de l'onduleur avec le réseau sont **[18]**:

- Temps de réponse
- Facteur de puissance
- Commande de fréquence
- Rendement harmonique
- Synchronisation
- Contribution de courant de défaut
- Injection de courant continu
- Protection

IV.7 Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau

Les problèmes concernant l'interconnexion du système photovoltaïque au réseau sont **[18] :**

- Le débrochage de système photovoltaïque si le réseau présente une défaillance (le problème d'islanding).
- La protection contre la foudre.
- La qualité de puissance fournie au réseau.
- Les effets des systèmes multiples sur une partie du réseau, en particulier monophasé non équilibré.
- Le dosage fiable des flux de puissance.
- Risques techniques et financiers.

IV.8 Etude de la partie contrôle et la commande

La structure du système de commande de l'onduleur peut être séparée en deux sous-systèmes ayant des dynamiques différentes : l'une dite rapide qui est liée aux courants, et une autre dite lente qui est associée à la tension continue.

Pour le réglage de la tension continue, l'utilisation de commandes classiques, en particulier du type proportionnel intégral, semble être suffisante pour obtenir des performances acceptables.

IV.8.1 *Régulateur proportionnel-Intégral*

Nous utilisons simplement pour chacune des phases un régulateur proportionnel Intégral suivi d'un filtre passe bas du premier ordre.

Le rôle de ce filtre est d'atténuer les signaux hauts fréquences venant de la *MLI*.

Le schéma de régulation du courant est représenté par la Figure IV.3 :

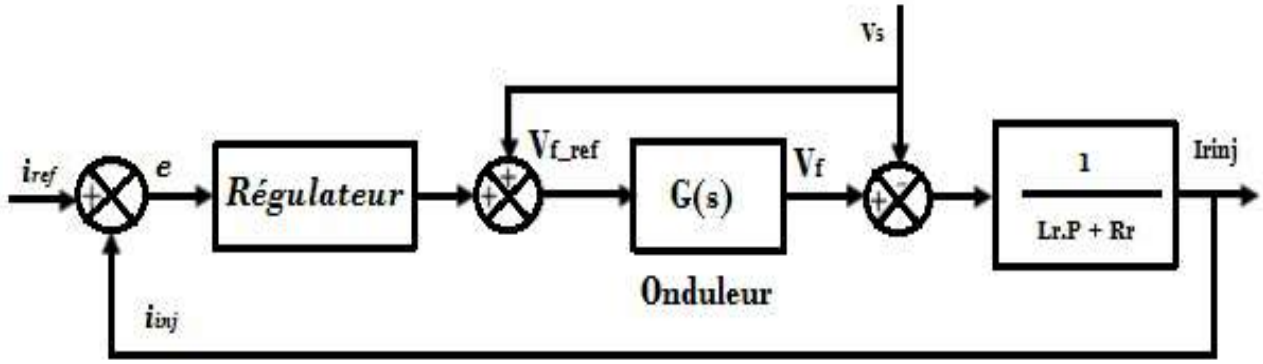


Figure IV.3 : *Schéma de la régulation des courants de l'onduleur.*

Notons par (Δi) la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante **[18]**:

$$\Delta \mathbf{i} = \mathbf{I_{ref}} - \mathbf{Ir_{inj}} \qquad \textbf{(IV.1)}$$

$$\mathbf{Rr}.\mathbf{Ir_{inj}} + \mathbf{Lr}.\frac{\mathbf{dIr_{inj}}}{\mathbf{dt}} = \mathbf{Vs} - \mathbf{Vf} \qquad \textbf{(IV.2)}$$

D'après (*IV*. 1) et *(IV.2)*, et le schéma de la figure IV.3 nous obtenons l'expression suivante :

$$\mathbf{Rr}.\Delta \mathbf{i} + \mathbf{Lr}\frac{\mathbf{d\Delta i}}{\mathbf{dt}} = \left(\mathbf{Vs} + \mathbf{Lr}\frac{\mathbf{dIref}}{\mathbf{dt}} + \mathbf{Rr}.\mathbf{Iref}\right) + \mathbf{Vf} \qquad \textbf{(IV.3)}$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (IV.3) peut être défini comme tension de référence (*Vf_ref*), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$\mathbf{Vf_ref} = \mathbf{Vs} + \mathbf{Lr}\frac{\mathbf{dIref}}{\mathbf{dt}} + \mathbf{Rr}.\mathbf{Iref} \qquad \textbf{(IV.4)}$$

L'onduleur de tension à commande *MLI* est modélisé par un gain Go:

$$\mathbf{Go} = \frac{\mathbf{Udc}}{\mathbf{Up}} \qquad \textbf{(IV.5)}$$

Où

Udc: Tension côté continu de l'onduleur

Up : Amplitude de la porteuse

Pour que (*Vf*) soit égale à *Vf_ref*, nous choisissons *Go* égal à 1.

Rr et *Lr* Respectivement la résistance et l'inductance de raccordement intermédiaire entre l'onduleur et le réseau.

IV.8.2 *Régulateur PI avec compensation de pôle*

Nous utilisons un régulateur *(PI)* représenté par la Figure IV.4 :

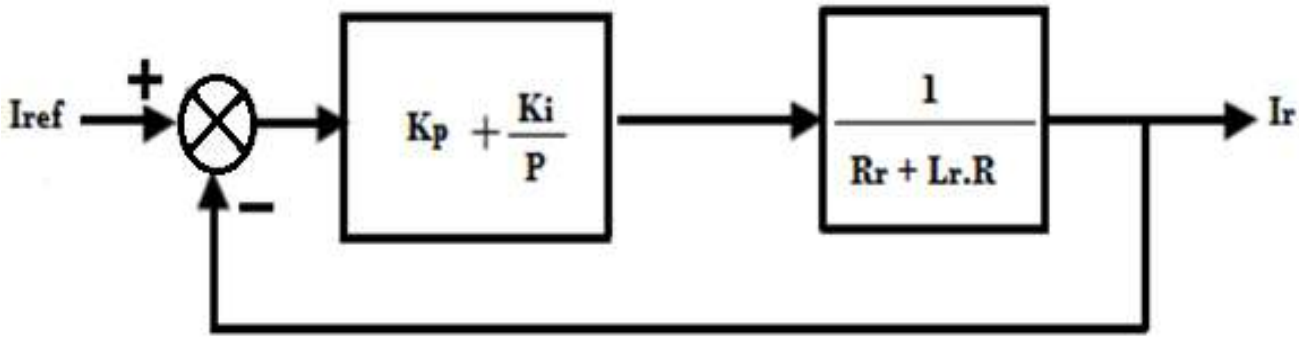


Figure IV.4 : *Schéma bloc du régulateur (PI).*

La fonction de transfert de la boucle fermée et les cœfficients du correcteur (PI) *sont* donnés par les équations suivantes **[18]**:

$$\frac{Ir}{Iref} = \frac{1}{1+\frac{LR}{Kp}.P} = \frac{1}{1+\tau.P} \qquad \textbf{(IV.6)}$$

Où

$$\frac{Ki}{Kp} = \frac{Rr}{Lr} \qquad \textbf{(IV.7)}$$

IV.8.3 *Régulateur (PI) sans compensation de pôle*

Cette méthode consiste à utiliser un régulateur (PI) comme représenté sur la Figure IV.5. Il en résulte la fonction de transfert de la boucle fermée **[18]:**

$$\frac{Ir}{Iref} = \left(\frac{Ki+Kp.P}{P}\right) \frac{\frac{Ki}{Lr}}{P^2+\left(\frac{Kp+Rr}{Lr}\right).P+\frac{Ki}{Lr}} \qquad \textbf{(IV.8)}$$

Nous remarquons la présence d'un zéro en boucle fermée, nous pouvons l'éliminer en ajoutant un filtre passe-bas du premier ordre sur la consigne du courant comme indiqué sur la figure suivante :

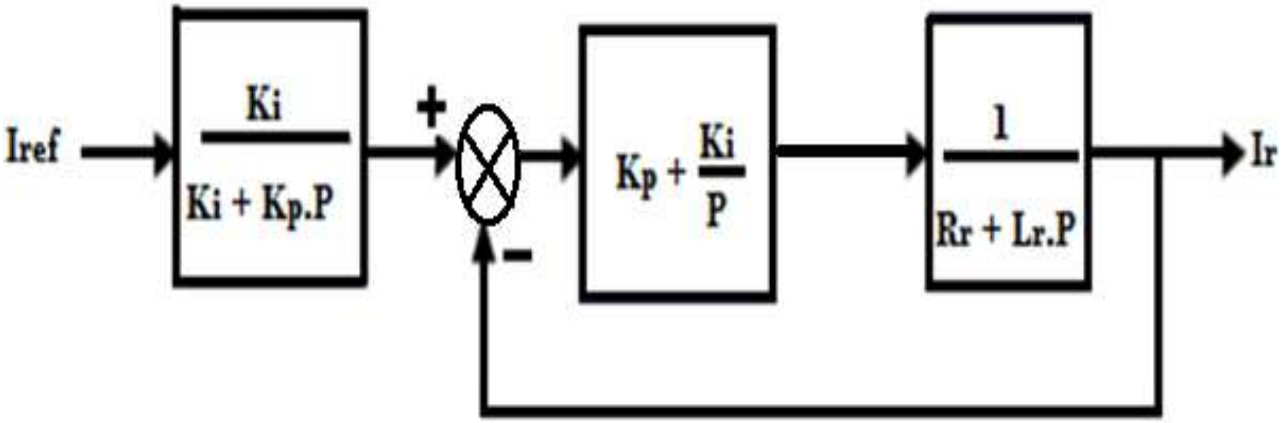


Figure IV.5 : *Schéma bloc de la régulateur PI sans compensation de pôle.*

La réponse du système en boucle fermée peut être identifiée à celle d'un système du second ordre **[18] [20]** :

$$\frac{Ir}{Iref} = \frac{wi^2}{P^2+(2.\zeta.wi).P+wi^2} \qquad \textbf{(IV.9)}$$

Où

$$\mathbf{Ki = wi^2.Lr} \qquad \text{Et} \qquad \mathbf{Kp = 2.\zeta.wi.Lr - Rr}$$

Dans notre étude (nous choisirons le régulateur PI avec compensation de pôle) on a pris les paramètres de réseaux suivant :

$$\mathbf{Rr} = 0.8929 \qquad \text{et} \qquad \mathbf{Lr} = 0.06158$$

En appliquant ces valeurs dans la relation IV.7, Ki et Kp peuvent s'écrit :

$$\mathbf{Ki} = 19.387 \qquad \text{Et} \qquad \mathbf{Kp} = 0.360$$

IV.9 Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau

IV.9.1 *PLL triphasé dans le domaine de Park*

Le principe de la PLL dans le domaine de Park est rappelé sur figure IV.6.

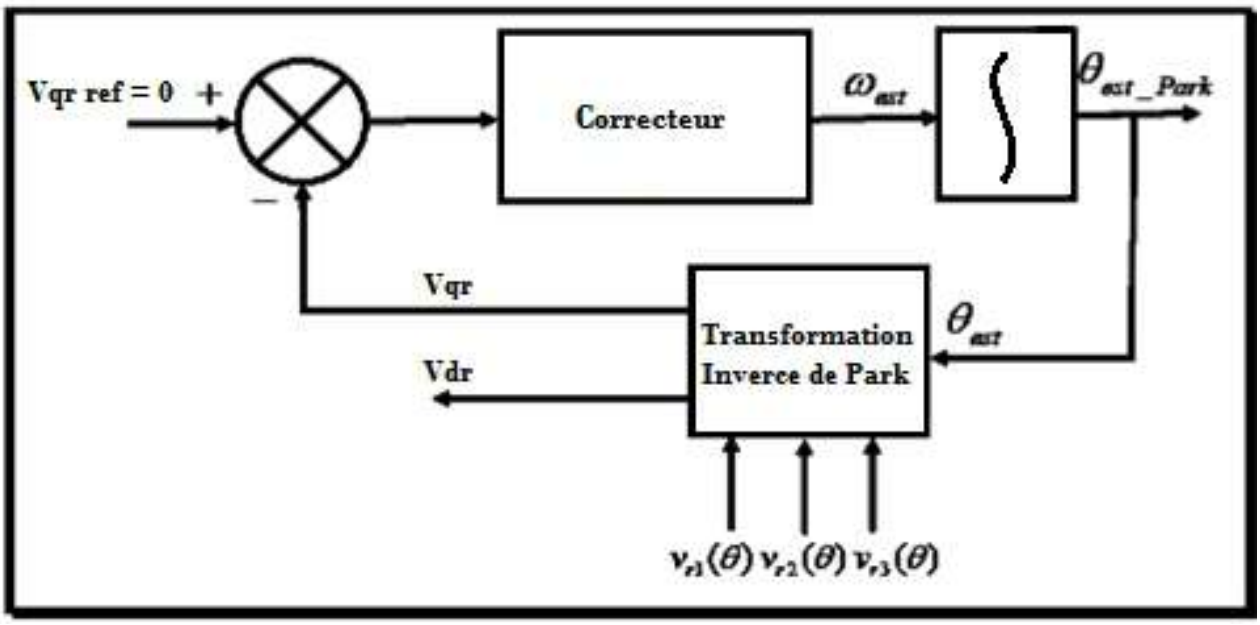


Figure IV.6 : *Principe de la PLL dans le domaine de Park.*

Dans le cas d'un système équilibré, la tension du système triphasé s'exprime de la manière suivante **[18] [20]** :

$$\begin{cases} \mathbf{Vr1(t) = Vm.\sin(\theta)} \\ \mathbf{Vr2(t) = Vm.\sin(\theta - \frac{2.\pi}{3})} \\ \mathbf{Vr3(t) = Vm.\sin(\theta - \frac{4.\pi}{3})} \end{cases} \qquad \textbf{(IV.10)}$$

Le principe de base de la PLL triphasée consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe q générée par cette transformation est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park(θ_{est}) . En régime établi l'angle (θ_{est}) est égal à l'angle (θ_r) du réseau.

$vqr = 0, vdr = |Vm|$ et $\theta_r = \theta_{est}$.

IV.9.2 *Elaboration et réglage des correcteurs d'une PLL triphasée*

La PLL triphasée développée dans le cadre de ce projet utilise une transformée de Park comme suit **[18] [20]** :

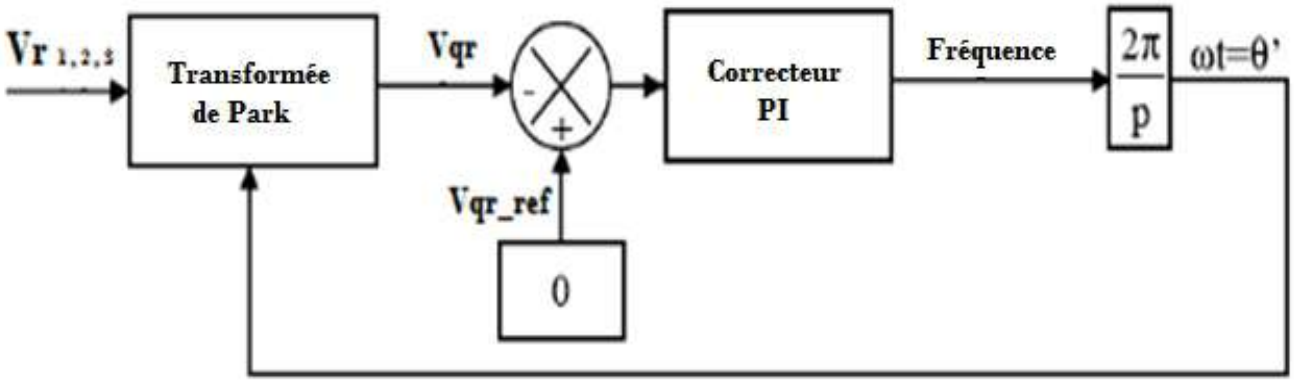


Figure IV.7 : *Schéma de régulateur de la PLL.*

La transformée de Park a le rôle de comparateur de phase. Cette PLL a pour avantage de pouvoir également mesurer la fréquence du signal d'entrée. La figure suivante montre le fonctionnement de la PLL triphasée. En régime permanent, lorsque la PLL « est accrochée », $d = 0$ et $V_{qr} = 0$. On a alors $V_{dr} = V_r$.

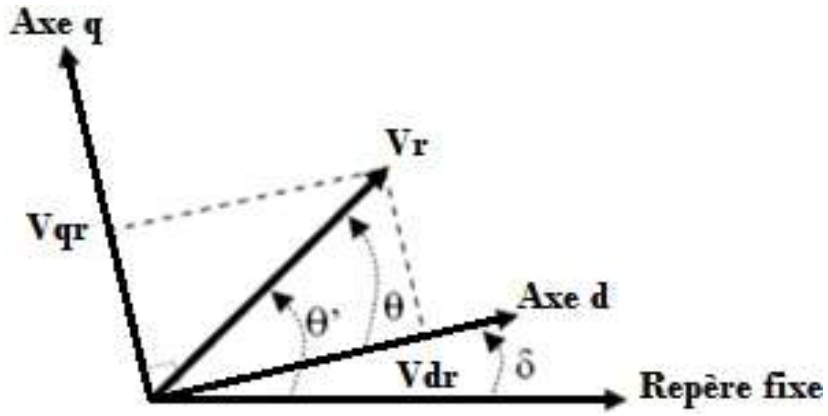


Figure IV.8 : *Fonctionnement de la PLL triphasée.*

IV.10 Modélisation du filtre LC et la charge

IV.10.1 *Fonction de transfert du filtre*

Afin de déterminer plus facilement la transmittance du filtre, on utilise le schéma monophasé équivalent suivant **[18]** :

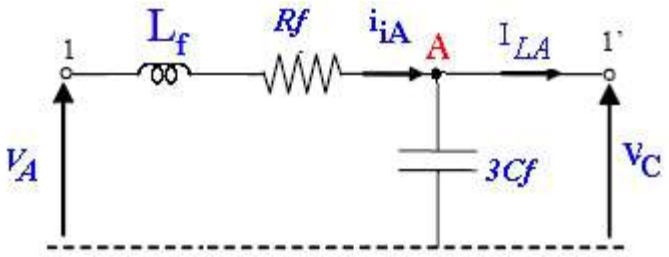


Figure IV.9 : *Schéma monophasé équivalent du filtre LC.*

- la fonction de transfert du filtre est donnée par l'expression suivante :

$$\mathbf{H(p)} = \frac{\mathbf{Vc}}{\mathbf{Va}} = \frac{1}{1+3.Cf.Rf.P+3.Cf.Lf.P^2} \qquad \textbf{(IV.11)}$$

Et la pulsation :

$$\mathbf{Wo} = \frac{1}{\sqrt{3.Cf.Lf}}$$

IV.10.2 *Modèle d'état de l'ensemble (onduleur, filtre LC et la charge (RL))*

Le modèle d'état de l'ensemble onduleur, filtre *LC* et la charge *RL* est donnée par la Figure IV.10.

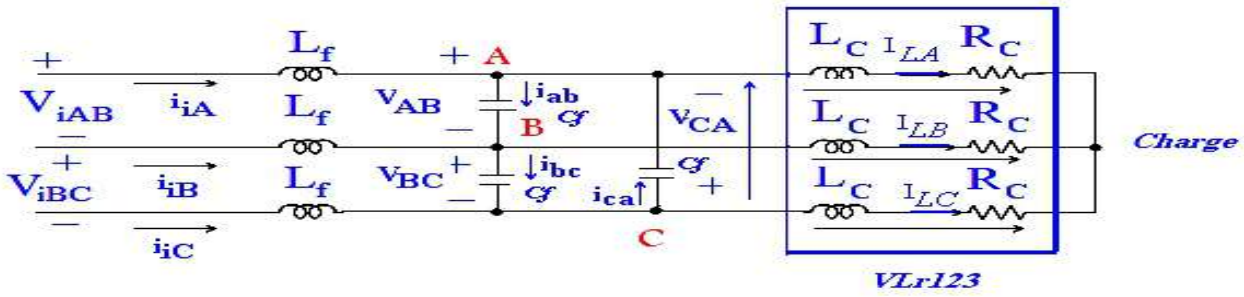


Figure IV.10 : Schéma du filtre *LC* et la charge *RL*.

En appliquant la loi de Kirchhoff aux nœuds A, B, et C, les équations des courants et des tensions du filtre *LC* décrites par la figure IV.12, sont données comme suit :

- Nœud (A) :

$$\mathbf{i_{iA} + i_{ca} = i_{ab} + i_{LA} \Rightarrow i_{iA} + Cf.\frac{dV_{CA}}{dt} = Cf.\frac{dV_{AB}}{dt} + i_{LA}} \qquad \textbf{(IV.12)}$$

- Nœud (B) :

$$\mathbf{i_{iB} + i_{ab} = i_{bc} + i_{LB} \Longrightarrow i_{iB} + Cf.\frac{dV_{AB}}{dt} = Cf.\frac{dV_{BC}}{dt} + i_{LB}} \quad \textbf{(IV.13)}$$

- Nœud (C) :

$$\mathbf{i_{ic} + i_{bc} = i_{ca} + i_{LC} \Longrightarrow i_{iC} + Cf.\frac{dV_{BC}}{dt} = Cf.\frac{dV_{CA}}{dt} + i_{LC}} \quad \textbf{(IV.14)}$$

Avec :

$$\mathbf{i_{ca} = Cf.\frac{dV_{CA}}{dt}} \;, \mathbf{i_{ab} = Cf.\frac{dV_{AB}}{dt}} \quad et \quad \mathbf{i_{bc} = Cf.\frac{dV_{BC}}{dt}}$$

En substituant (IV.13) dans (IV.12), on trouve :

$$\mathbf{i_{iA} - i_{iB} + Cf.\left(\frac{dV_{CA}}{dt} - \frac{dV_{AB}}{dt}\right) = Cf.\left(\frac{dV_{AB}}{dt} - \frac{dV_{BC}}{dt}\right) + i_{LA} - i_{LB}} \quad \textbf{(IV.15)}$$

$$\square \; \mathbf{Cf.\left(\frac{dV_{CA}}{dt} + \frac{dV_{BC}}{dt} - 2.\frac{dV_{AB}}{dt}\right) = -i_{iA} + i_{iB} + i_{LA} - i_{LB}}$$

En substituant (IV.14) dans (IV.13), on trouve :

$$\mathbf{i_{iB} - i_{iC} + Cf.\left(\frac{dV_{AB}}{dt} - \frac{dV_{BC}}{dt}\right) = Cf.\left(\frac{dV_{BC}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt}\right) + i_{LB} - i_{LC}} \quad \textbf{(IV.16)}$$

$$\square \; \mathbf{Cf.\left(\frac{dV_{AB}}{dt} + \frac{dV_{CA}}{dt} - 2.\frac{dV_{BC}}{dt}\right) = -i_{iB} + i_{iC} + i_{LB} - i_{LC}}$$

En substituant (IV.12) dans (IV.14), on trouve :

$$\mathbf{i_{iC} - i_{iA} + Cf.\left(\frac{dV_{BC}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt}\right) = Cf.\left(\frac{dV_{CA}}{dt} - \frac{dV_{AB}}{dt}\right) + i_{LC} - i_{LA}} \quad \textbf{(IV.17)}$$

$$\square \; \mathbf{Cf.\left(\frac{dV_{BC}}{dt} + \frac{dV_{AB}}{dt} - 2.\frac{dV_{CA}}{dt}\right) = -i_{iC} + i_{iA} + i_{LC} - i_{LA}}$$

Afin de simplifier l'équation (IV.15) et (IV.17), nous utilisons le rapport de la somme des tensions algébriques égales à zéro entre les phases de la charge, tel que :

$$\mathbf{V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0} \quad \textbf{(IV.18)}$$

D'après l'équation (IV.18), l'équation (IV.15) et (IV.17) peuvent être écrites respectivement comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dV_{AB}}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.i_{iAB} - \frac{1}{3.Cf}.(i_{LAB}) \\ \frac{dV_{BC}}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.i_{iBC} - \frac{1}{3.Cf}.(i_{LBC}) \\ \frac{dV_{CA}}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.i_{iCA} - \frac{1}{3.Cf}.(i_{LCA}) \end{cases} \quad \textbf{(IV.19)}$$

Avec :

$$i_{iAB} = i_{iA} - i_{iB}, i_{iBC} = i_{iB} - i_{iC}, i_{iCA} = i_{iC} - i_{iA} \text{ Et } i_{LAB} = i_{LA} - i_{LB}, i_{LBC} = i_{LB} - i_{LC}, i_{LCA} = i_{LC} - i_{LA}$$

En appliquant la loi des mailles aux tensions du côté de l'onduleur, les équations des courants peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{iAB}}{dt} = -\frac{1}{Lf}.V_{LAB} - \frac{1}{Lf}.(V_{iAB}) \\ \frac{di_{iBC}}{dt} = -\frac{1}{3.Cf}.V_{LBC} - \frac{1}{Lf}.(V_{iBC}) \\ \frac{di_{iCA}}{dt} = -\frac{1}{3.Cf}.V_{LCA} - \frac{1}{Lf}.(V_{iCA}) \end{cases} \quad \textbf{(IV.20)}$$

En appliquant la loi des mailles du côté charge, les équations des tensions peuvent être décrites comme suit :

$$\begin{cases} V_{AB} = L_r.\frac{di_{LA}}{dt} + R_c.i_{LA} - L_c.\frac{d_{LB}}{dt} - R_c.i_{LB} \\ V_{BC} = L_r.\frac{di_{LB}}{dt} + R_c.i_{LB} - L_c.\frac{d_{LC}}{dt} - R_c.i_{LC} \\ V_{CA} = L_r.\frac{di_{LC}}{dt} + R_c.i_{LC} - L_c.\frac{d_{LA}}{dt} - R_c.i_{LA} \end{cases} \quad \textbf{(IV.21)}$$

L'équation (IV.21) peut être récrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{LAB}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c}.i_{LAB} + \frac{1}{L_c}.V_{LAB} \\ \frac{di_{LBC}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c}.i_{LBC} + \frac{1}{L_c}.V_{LBC} \\ \frac{di_{LCA}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c}.i_{LCA} - \frac{1}{L_c}.V_{LCA} \end{cases} \quad \textbf{(IV.22)}$$

Par conséquent, nous pouvons écrire les équations (IV.19), (IV.20) et (IV.22) sous forme matricielle, respectivement :

$$\begin{cases} \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.I_i - \frac{1}{3.Cf}.I_L \\ \frac{dI_j}{dt} = \frac{1}{Lf}.V_C + \frac{1}{Lf}.V_j \\ \frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L_r}.V_C + \frac{R_r}{L_r}.I_L \end{cases} \quad \textbf{(IV.23)}$$

A la fin de cette étude du côté onduleur et charge, nous avons programmé sur Matlab/SIMULINK l'ensemble, onduleur, filtre *LC* et la charge (*LR*), les paramètres de ces dernier sont donnes dans le tableau suivant :

Paramètre	Lf	Cf	Rc	Lc	Rr	Lr
valeur	70 mH	100 µF	20 Ohm	0.5 mH	0.89 Ohm	16.6 mH

Tableau IV.1 : *Paramètres de simulation.*

IV.11 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à quelques notions et définitions relatives aux systèmes photovoltaïques connecté au réseau et on a cité un régulateurs PI avec et sans compensation de pole (on va utiliser la méthode de la régulation avec compensations de pole dans notre simulation), une étude de la synchronisation des convertisseurs sur le réseau par le PLL.

Chapitre V :

Simulation du système

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va simuler dans l'environnement Simulink/Matlab d'un système photovoltaïque et les résultats de simulation de PV sont présentés. Ce système est constitué d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC-DC survolteur « boost » raccordé au réseau par un onduleur triphasé cinq niveaux a structure NPC, on utilise l'algorithme « perturbation et observation » P&O pour le contrôleur MPPT et la stratégie MLI tringulo-sinusoidal à quatre porteuses pour la commande de l'onduleur et à la fin on va simuler le système globale.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink avec le toolbox simpower.

V.2 L'outil Simulink/Matlab

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

V.2.1 *Simpower*

SimPower utilisés dans les domaines de l'électronique, l'électronique de puissance, l'électromécanique est une extension à Simulink/Matlab pour modéliser des systèmes physiques. Contrairement à Simulink, basé sur la notion de fonction de transfert ou des entrées-sorties d'un système, Simpower fournit des éléments de puissance comme les composant à semi-conducteur de puissances (diodes, thyristors, transistors), les machines triphasées (synchrones, asynchrones, etc.), les systèmes de production d'énergie (éoliennes, alternateurs, pile à combustible etc.) pour la modélisation et la simulation des circuits et des systèmes électriques de puissance. **[21] [5]**

V.3 Schéma générateur photovoltaïque dans Matlab

Le modèle du générateur photovoltaïque a été mis en application dans Simulink suivant les indications de la figure (V.1). La température et l'irradiante sont spécifiées. La simulation laisse avoir la courbe I-V et des caractéristiques de PV. Le modèle de Simulink emploie une source courante, la source de tension et la valeur de résistance en série et le parallèle du PV.

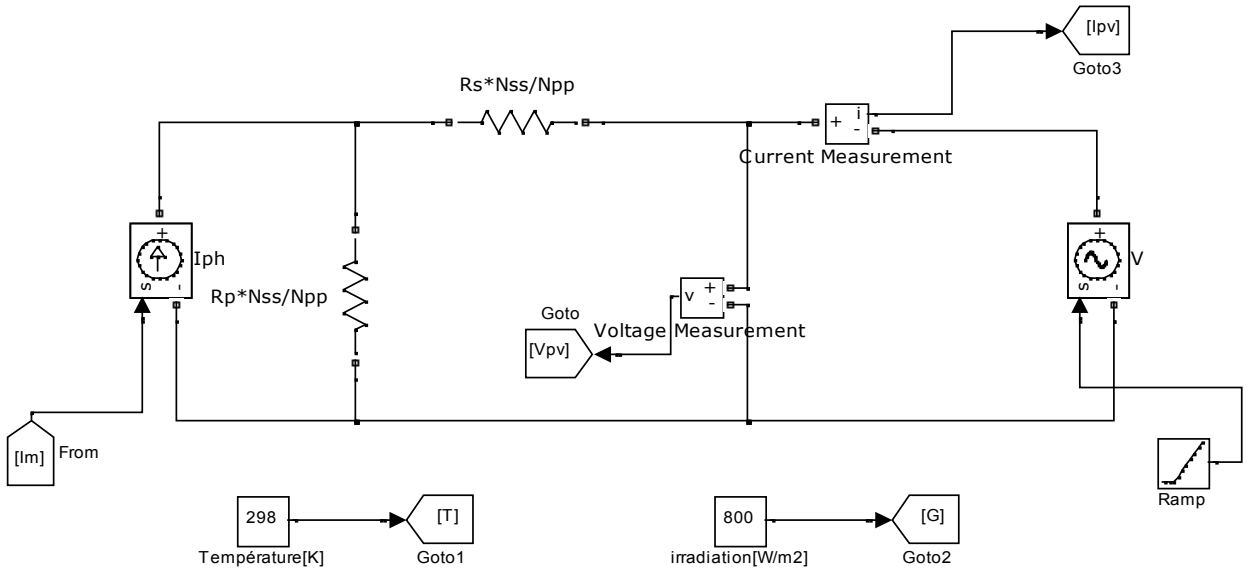


Figure V.1 : *Simulation du module de PV.* [1]

Le nombre de modules en série et le parallèle est donné par Nss et Npp comme le tableau V.1 montre. Le résultat du courant Im est employé pour le bloc de Simulink comme source courante pour obtenir la tension et le courant fournis par le GPV.

Nombre de modules en série N_{ss}	6
Nombre de modules en parallèle N_{pp}	6
Courant au point de puissance maximum	21.36 A
Tension au point de puissance maximum	202.2 V
Puissance maximale Pmax	4320 W

Tableau V.1 : *Caractéristiques de 4320 W photovoltaïque.*

La figure V.2 est le bloc de représentation du PV qui peut être employé avec différents circuits de puissance dans Simulink. Il peut noter que les entrées du PV sont l'irradiation et la température, les sorties sont la tension et le courant [1].

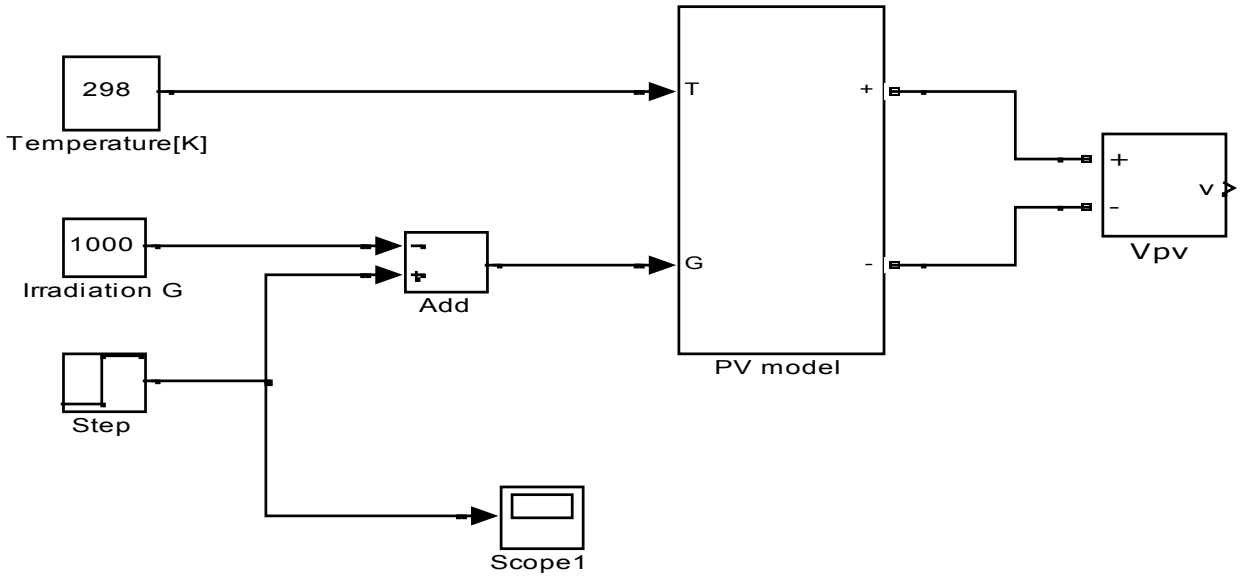


Figure V.2 : *bloc de Simulink de générateur photovoltaïque*. [2]

La figure V.4 montre l'interface de masque de ce modèle de PV. Le paramètre d'entrée pour ce modèle est le courant photovoltaïque. La variation du courant du photovoltaïque varie la tension photovoltaïque de rendement. Le modèle de Simulink est dérivé du modèle décrit de dans [3].et les citer les l'équation :

- $\mathbf{I_m = I_{ph} - I_0\left(e^{qV_d/KT} - 1\right)}$
- $\mathbf{I_{sc}(T1) = \left(\frac{G}{G_{nom}}\right) I_{sc}\left(T_{1,nom}\right)}$ **avec Isc □ Iph**
- $\mathbf{I_0(T_1) = \frac{I_{ph}(T_1)}{\left(e^{\frac{qV_{oc}}{KT-1}}\right)}}$

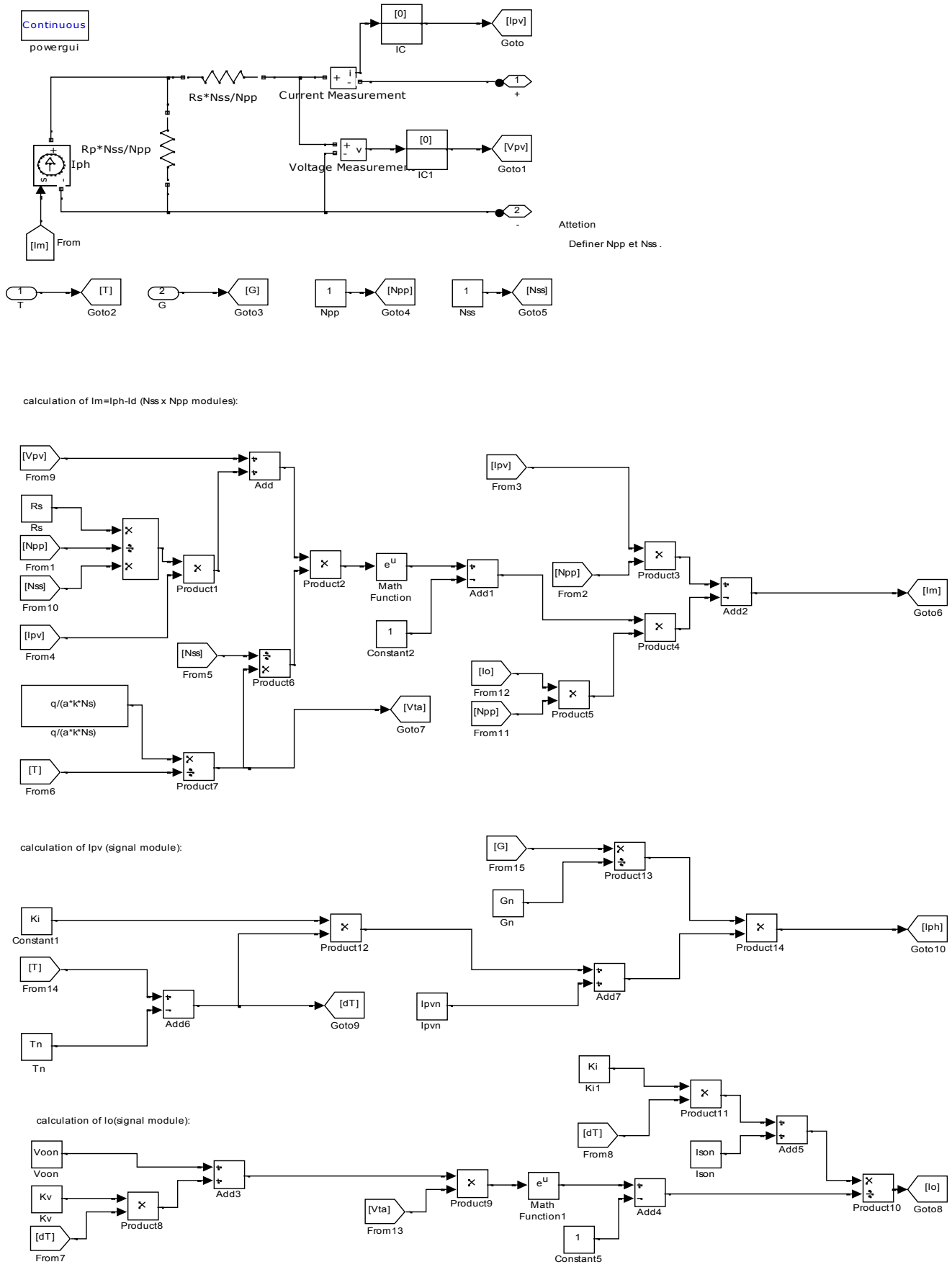


Figure V.3 : *Modèle de sous-système de Simulink de la rangée de photovoltaïque.* [3]

V.4 Modèle de Simulink de convertisseur boost avec le contrôleur de MPPT

La figure (V.4) montre le convertisseur boost.la tension d'entrée de convertisseur est la tension de sortie de GPV. L'inductance et le condensateur ont besoin être spécifié. La commande de commutation du transistor est obtenue à partir du MPPT contrôleur.

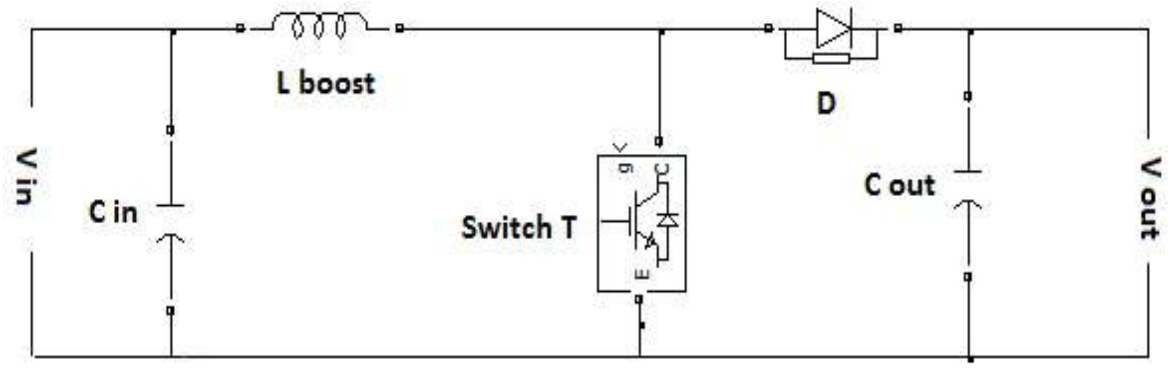


Figure V.4 : *Simulation de convertisseur boost.*

V.5 Simulation de la méthode MPPT

Le bloc de contrôleur de MPPT est montré sur la figure (V.5). La tension et le courant de panneau photovoltaïque (Vpv et Ipv) sont les entrées du contrôleur, et le rapport cyclique (D) est la sortie. Le rapport cyclique est comparé avec un signal triangulaire pour générer la MLI.

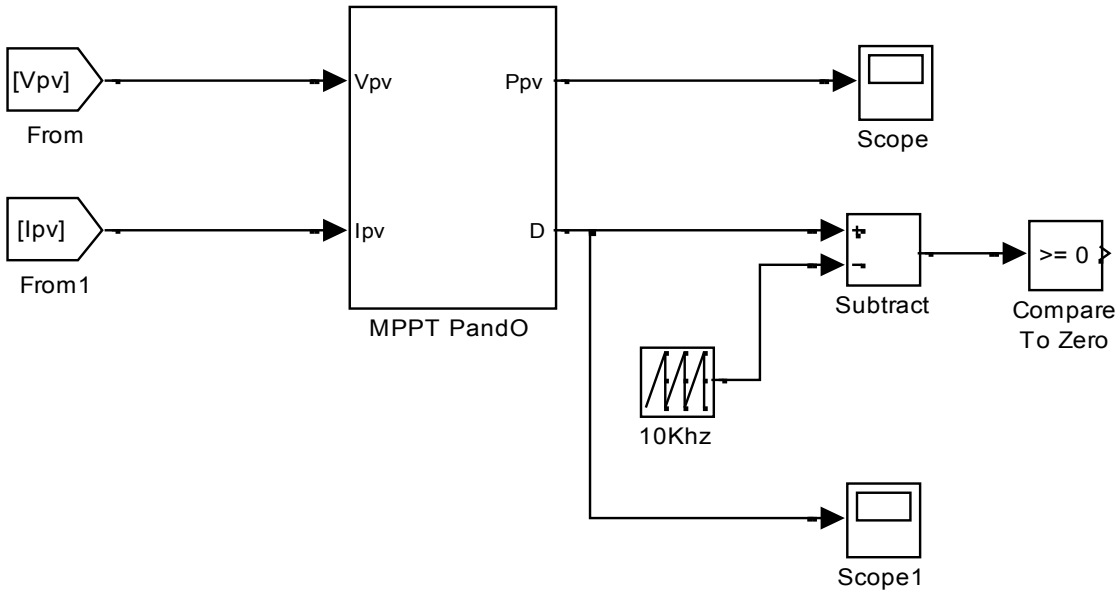


Figure V.5 : *Bloc de Simulink pour MPPT.*

L'algorithme P&O est implémenté et montré sur la figure (V.6).

Le rapport cyclique est augmenté ou diminué jusqu'à ce que le point de puissance maximale du photovoltaïque soit atteint. Le pas de rapport cyclique est constant, et il détermine l'efficacité et l'exactitude du contrôleur MPPT.

Un l'imitateur de valeur (0.01 0.9) est utilisé pour limiter le rapport cyclique.

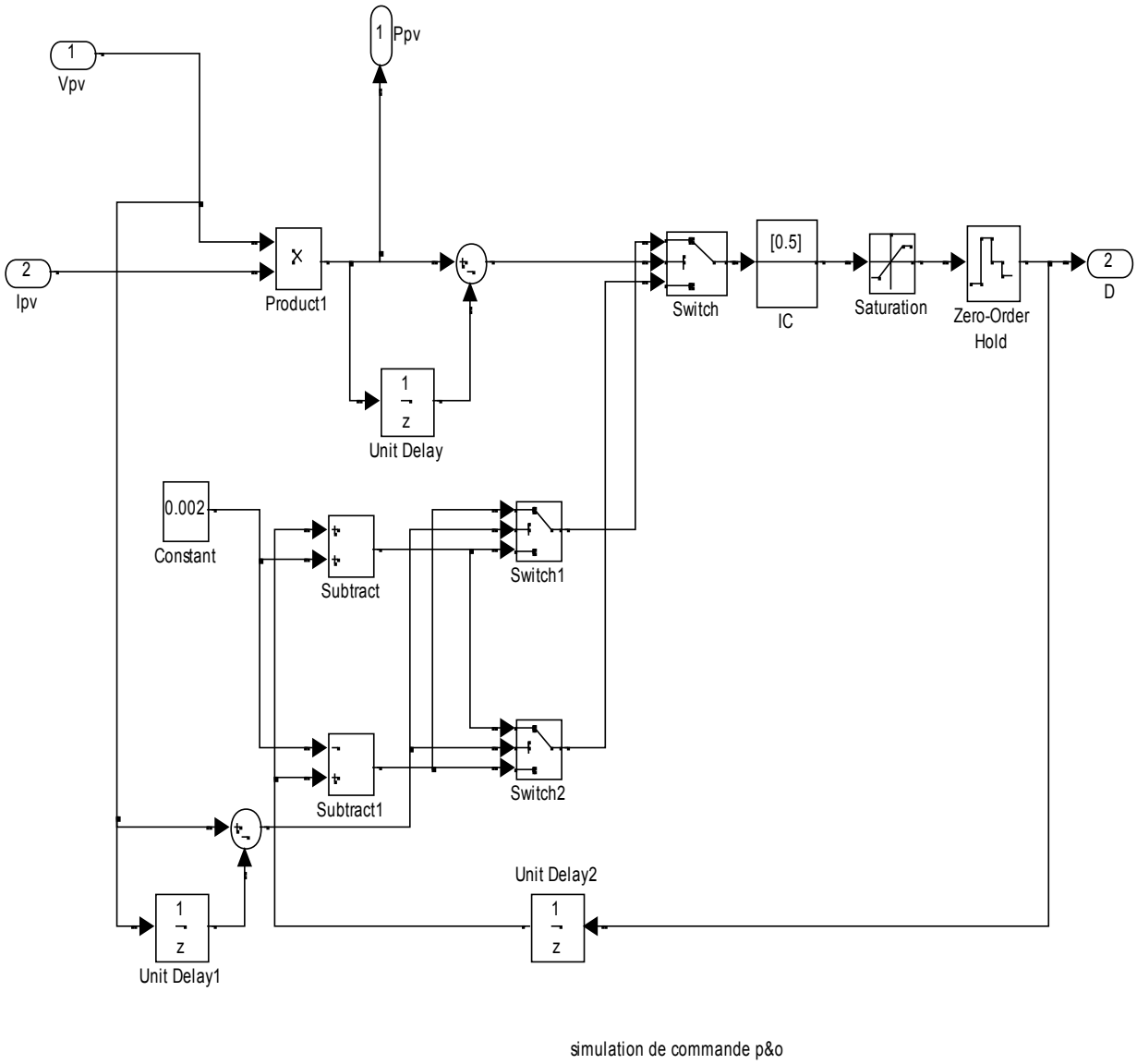


Figure V.6 : *Simulation de commande p&o.*

V.6 La Charge

Une charge de 4320 watt à 202.2 volt est utilisée pour validée le model de PV est le contrôleur MPPT (P&O).

La charge sur le côté (DC) est une résistance idéel (R_{ch}=148.15Ω) **[l'nnexe.1]**

V.7 Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge)

La figure (V.7) présente le système : le convertisseur boost, de panneau photovoltaïque et du contrôleur MPPT dans Simulink. Le système a une charge résistive pour tester la simulation.

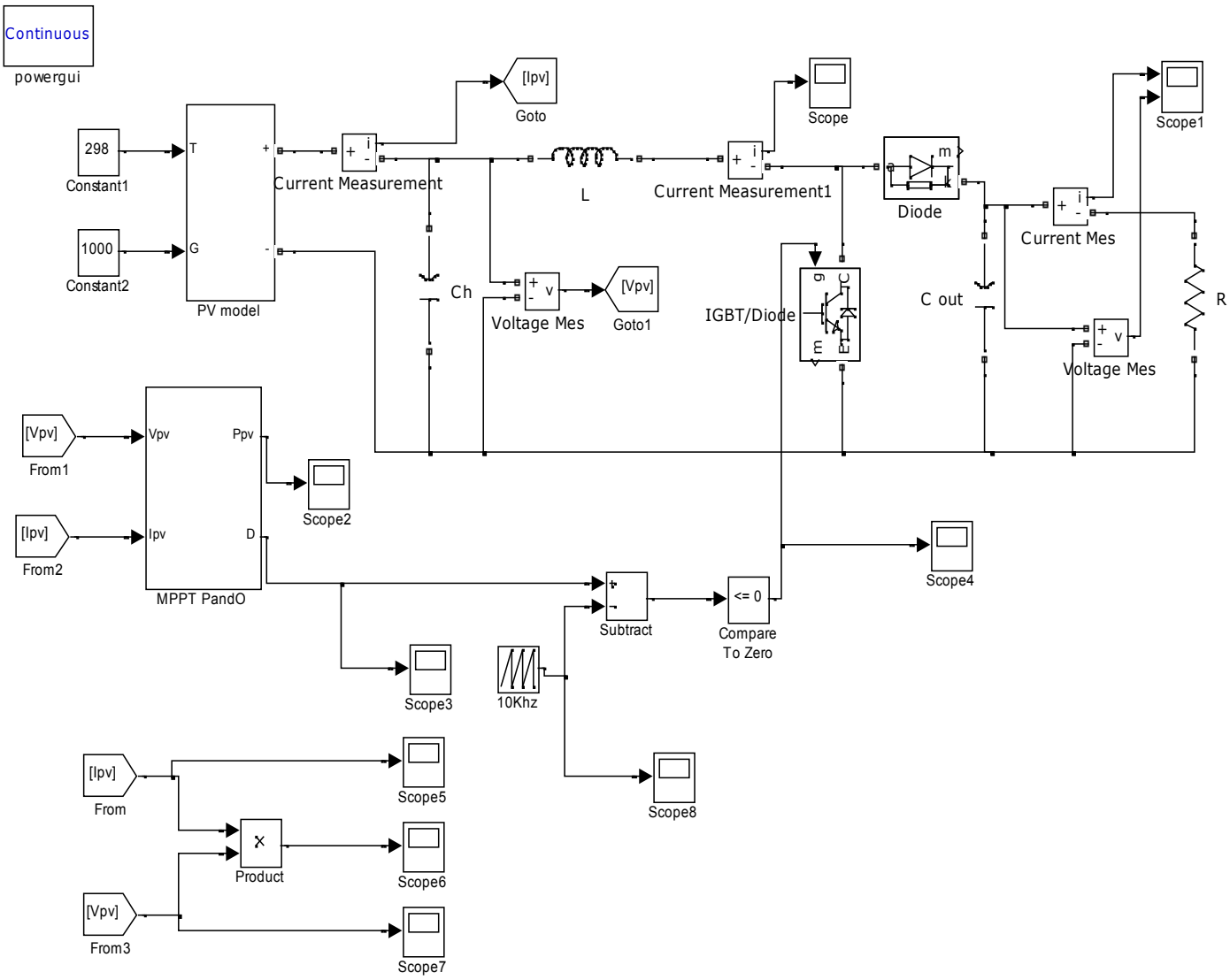


Figure V.7 : *Système globale (GPV, convertisseur, MPPT, charge).*

V.8 Résultats de simulation de PV

Le modèle du système photovoltaïque dans le chapitre II est employé pour déterminer l'exécution du contrôleur de MPPT avec le convertisseur boost. Cette simulation présente une analyse du panneau photovoltaïque avec le convertisseur et la charge résistive. La température, l'irradiante et la charge, sont variés pour déterminer l'exécution du MPPT et pour dépister la puissance maximum du PV.

V.8.1 *Caractéristiques du générateur photovoltaïque*

V.8.1.1 *Les caractéristiques d'I-V et de P-V*

Le modèle photovoltaïque utilisé est BP MSX 120. Il a un résultat de puissance maximum 4320 W. La fiche technique du PV est donnée dans **[l'annexe.2]**.

Sur la figure (V.9), les caractéristiques courant-tension du module BP MSX 120 de PV est montrées. Il peut noter que le rendement courant maximum est Impp=21.36 A et la tension maximale est Vmpp= 202.2 V.

La figure (V.8) présent la courbe caractéristique de courant en fonction de la tension de BP MSX 120.

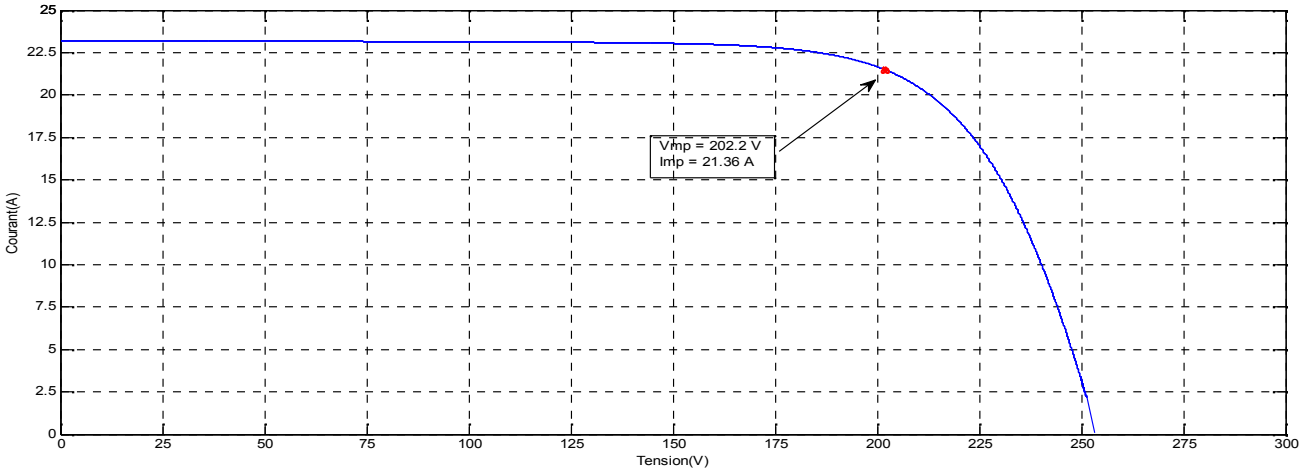


Figure V.8 : *Caractéristique I= f(V) du panneau PV(T=25C°, G=1000W/m^2)*

La figure (V.9) présente la courbe de puissance en fonction de la tension de BP MSX 120. Il peut noter que la puissance maximum du panneau est 4320 W.

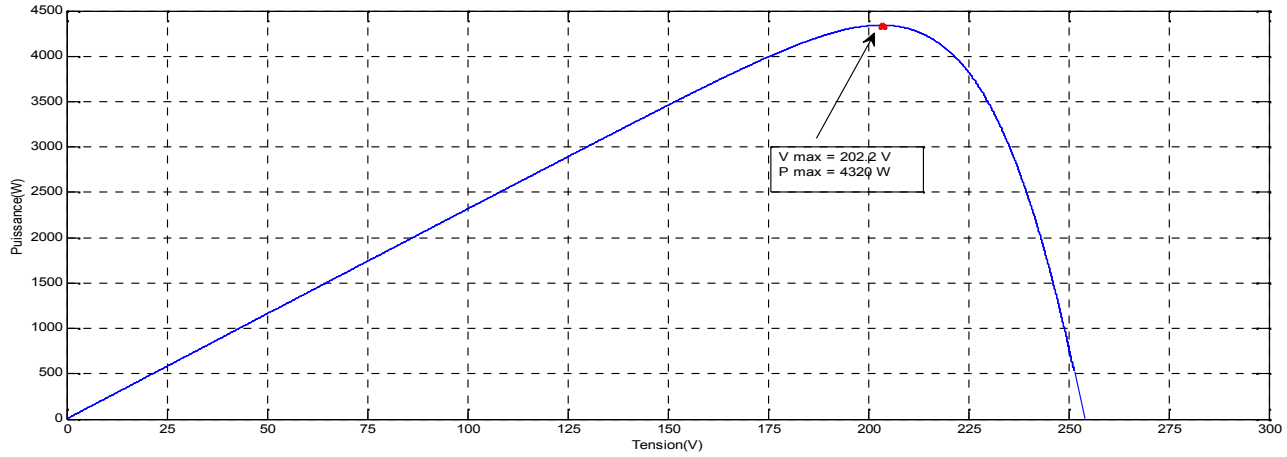


Figure V.9 : *Caractéristique P = f(V) du panneau PV (T = 25 C°, G = 1000W / m^2)*

V.8.1.2 *Simulation PV avec variation de la température*

Sur les figures (V.10) (V.11), la température varie de 0 Cº, de 25 Cº, de 50 Cº et de 100 Cº. La variation de la température a un impact à la tension de rendement du PV. La variation de la température affecte le courant de sortie moins.

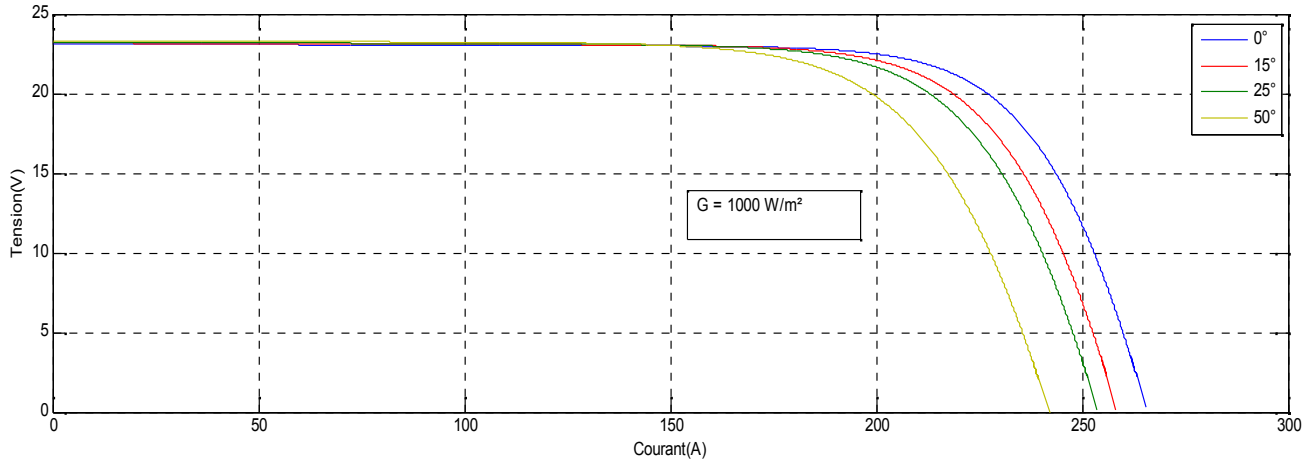


Figure V.10 : *Résulta de simulation des Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque I=f(V) pour différente températures et un éclairement; G =1000W//m2.*

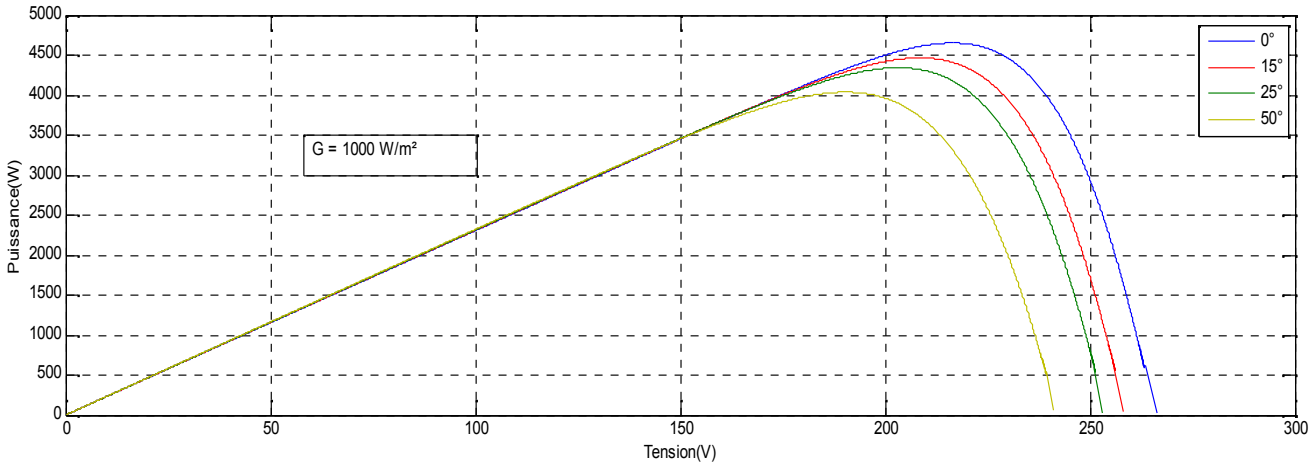


Figure V.11 : *Résulta de simulation des Caractéristiques d'un panneau PV, P = f(V); Pour différente températures et un éclairement G = 1000W/m2.*

V.8.1.3 *Simulation du PV avec variation de l'irradiation*

Dans ce cas-ci, l'irradiante varie de 400, 600, 800 et 1000 et la température est constante. Le modèle de Simulink sur la figure (V.2) a été employé. Le résultat sur le Figure (V.12) est courbe de puissance-tension qui prouve que la puissance maximum de la diminution de PV quand les diminutions d'irradiante. Le figure (V.13) est la courbe courant-tension, qui prouve que le courant diminue de manière significative quand l'irradiante diminue.

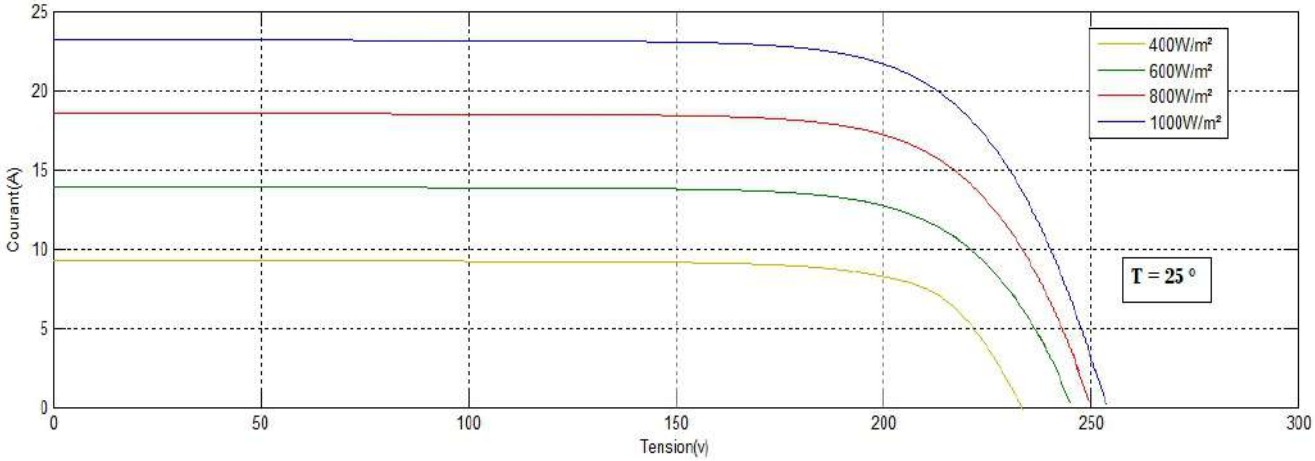


Figure V.12 : *Résulta de simulation des Caractéristiques d'un panneau PV, P = f(V); Pour différents éclairement et une température T=25C°.*

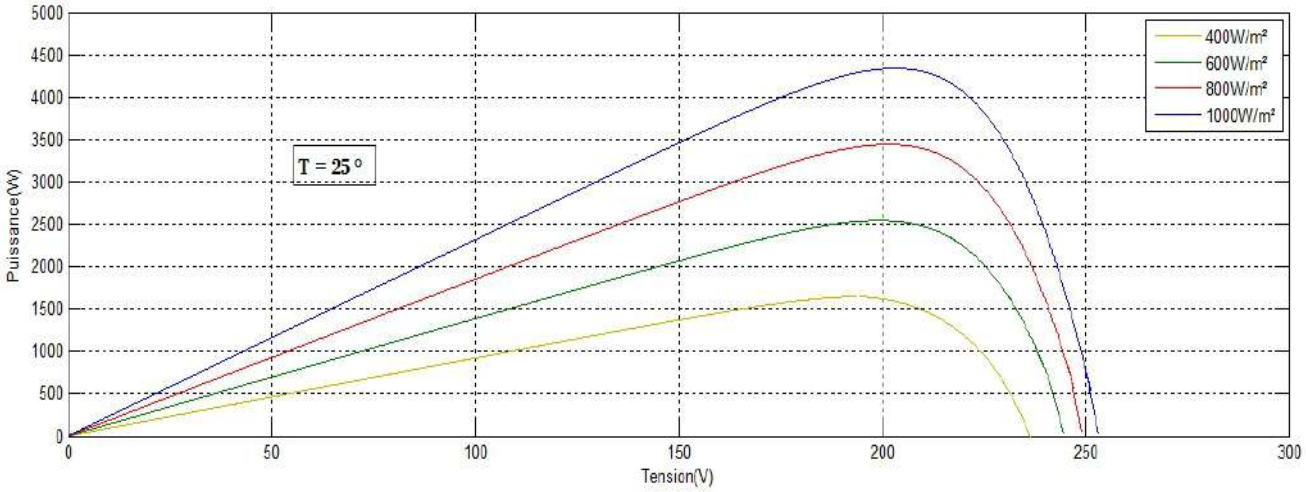


Figure V.13 : *Résulta de simulation des Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque I=f(V) pour déférente éclairement et une T=25C°.*

V.9 Simulation du l'onduleur commandé par (MLI) sinus-triangle

La Figure V.14, présente le schéma synoptique du modèle d'état de l'équation (IV.23) commandée en (MLI) sinus-triangle. **[22] [18]**

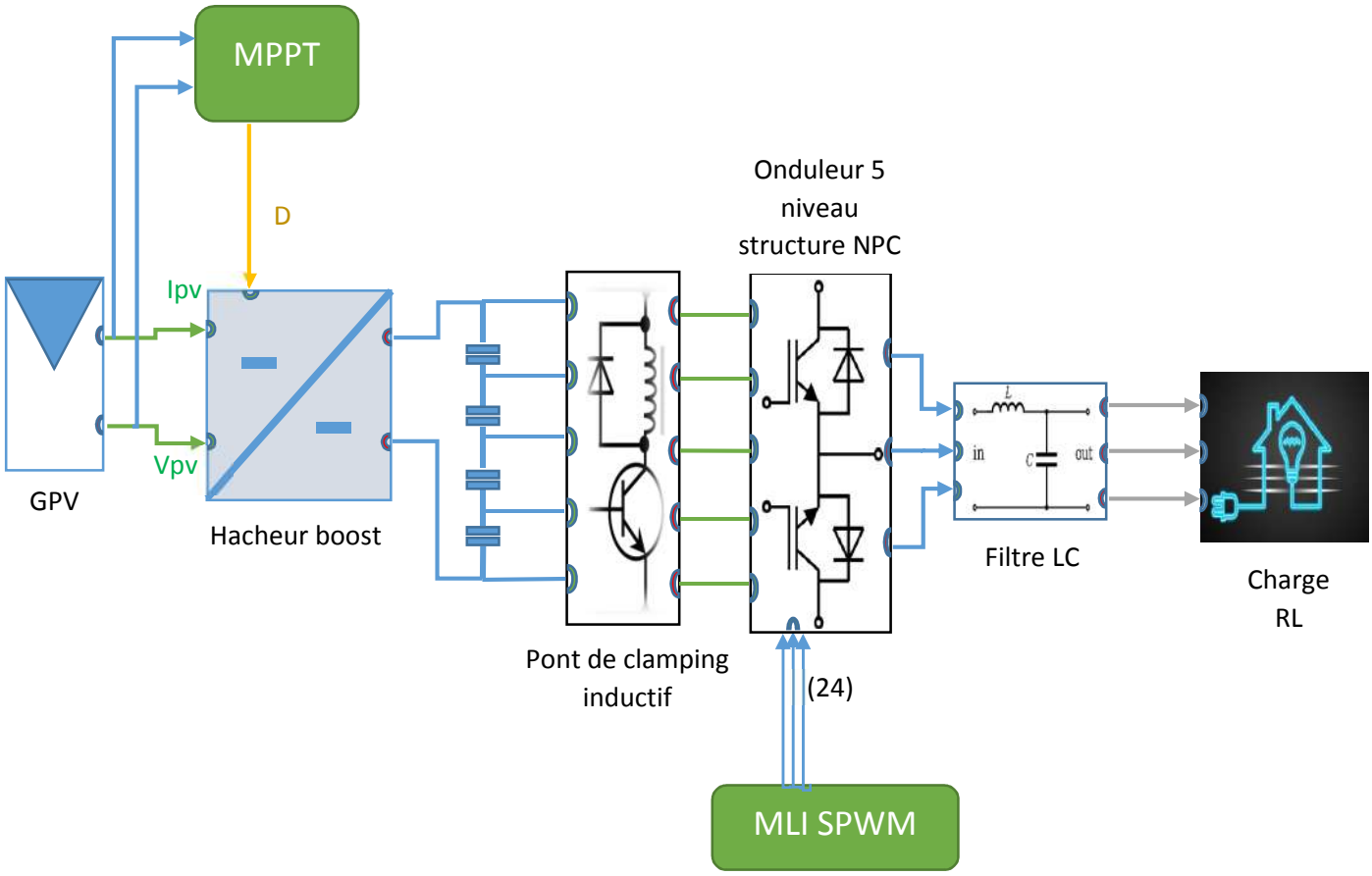


Figure V.14 : *Schéma de simulation de l'onduleur sur MATLAB-Simulink.*

Les diffèrent block de l'onduleur en simulation MATLAB-Simulink :

- Circuit d'équilibrage (pont de clamping inductif) :

Le schéma de circuit d'équilibrage de tension de l'onduleur et donnée par la figure V.15.

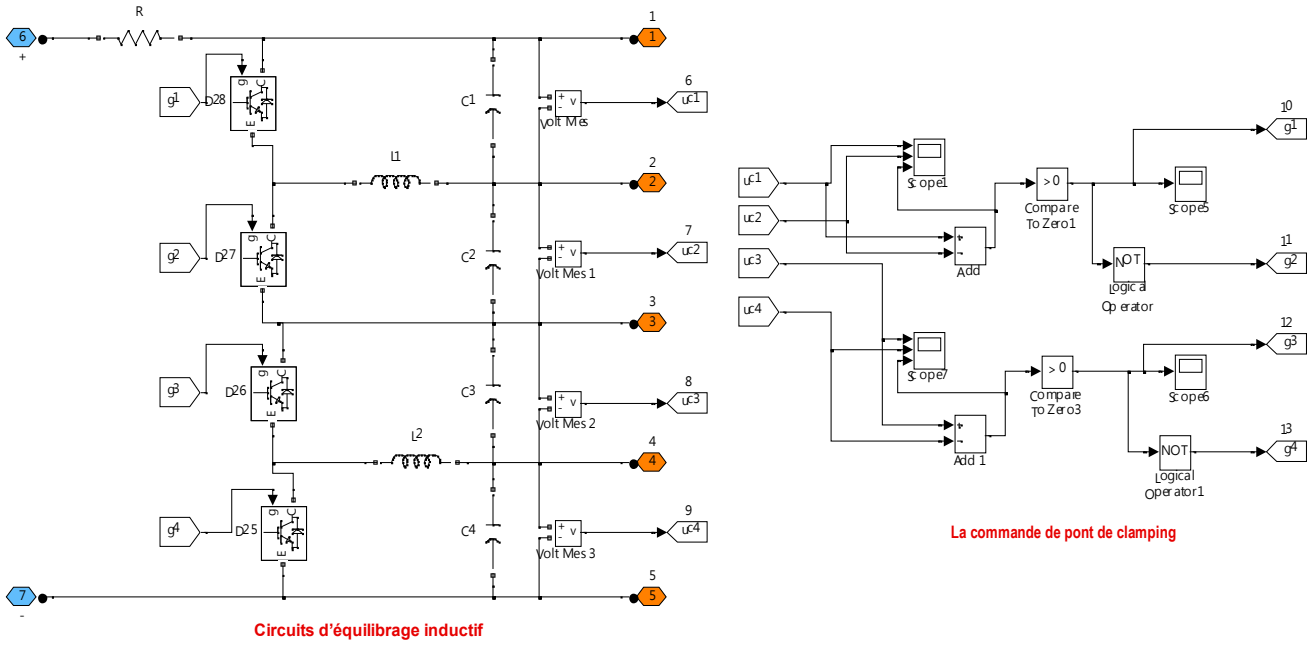


Figure V.15 : *schéma de circuit d'équilibrage de tension de l'onduleur.*

- Les bras de l'onduleur :

Le schéma circuit des trois bras de l'onduleur donné par la figure III.9.

- Commande des bras de l'onduleur (MLI) sinus-triangle :

Le schéma circuit de commande de l'onduleur donne par la figure V.16

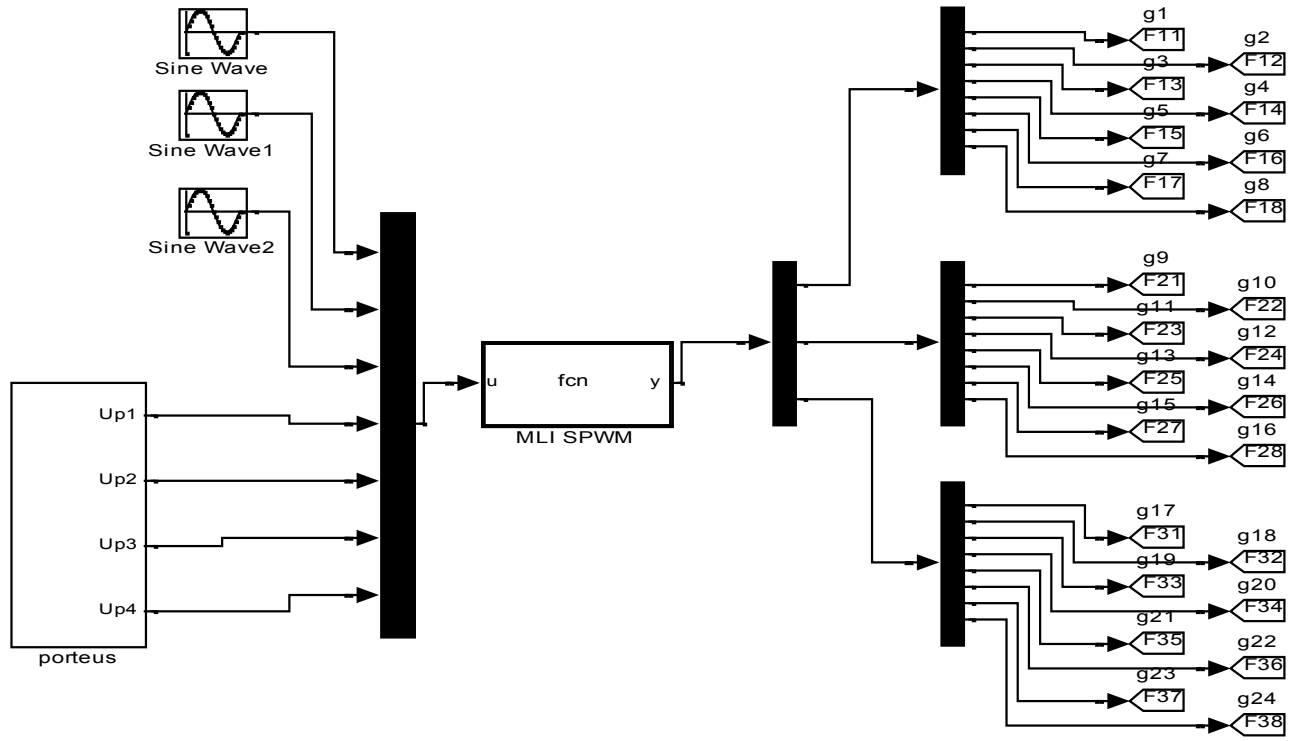


Figure V.16 : *Schéma circuit de la commande MLI SPWM.*

- Le filtre :

Le schéma circuit de filtrage après l'onduleur donne par la figure V.17

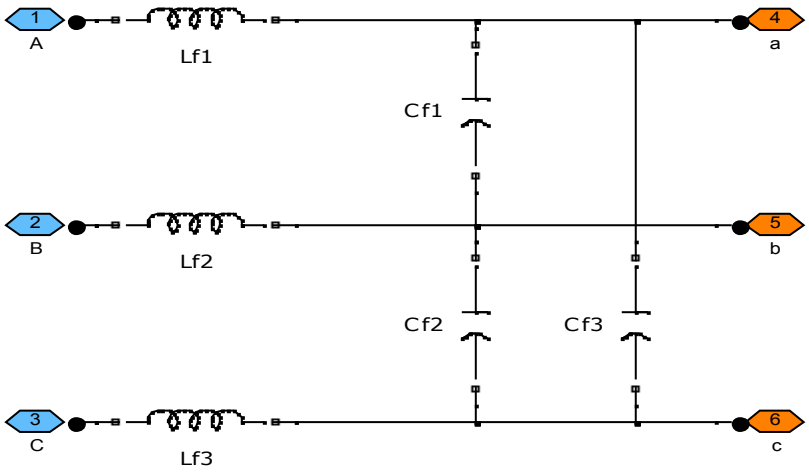


Figure V.17 : *Schéma circuit de filtrage après l'onduleur.*

Les résultats de simulations de la figure V.16 caractérisant les tensions, et les courants sont donnés par les figures suivantes :

- **Tensions simples à la sortie de l'onduleur**

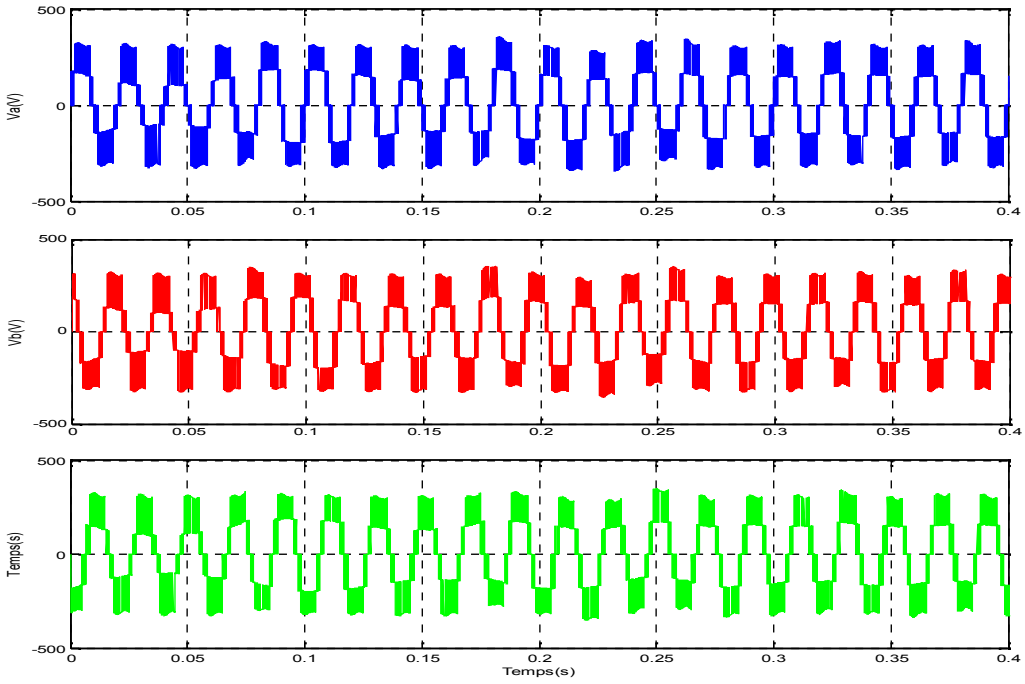


Figure V.18 : *Caractéristiques des tensions simple délivrées par l'onduleur.*

- **Tensions composées à la sortie de l'onduleur**

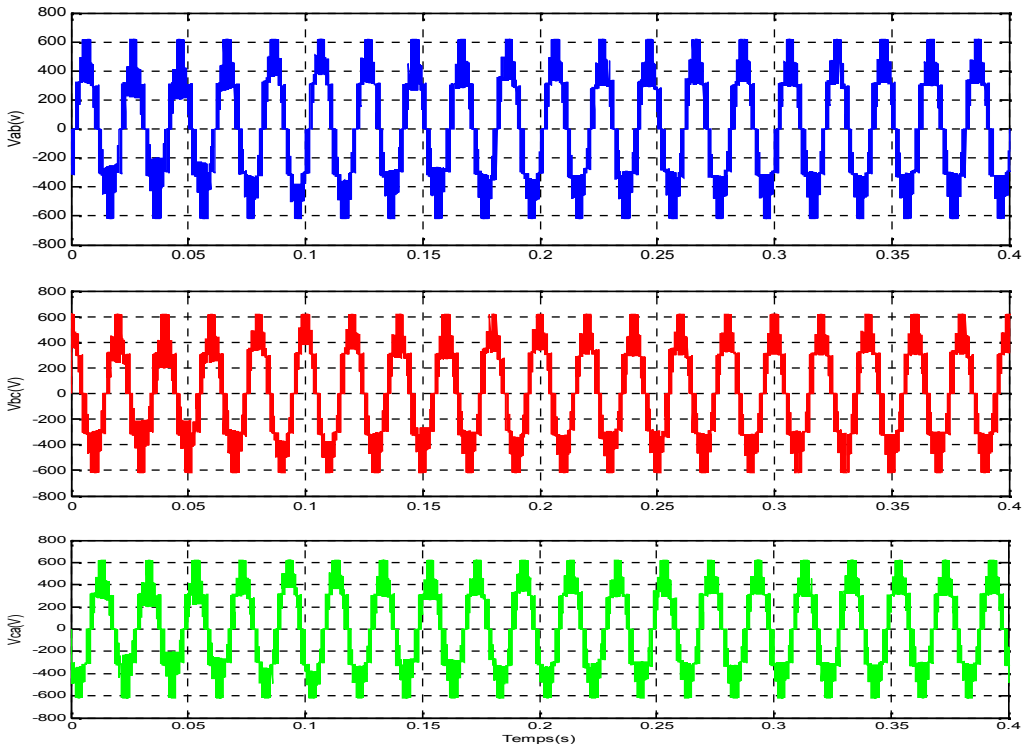


Figure V.19 : *Caractéristiques des tensions composées à la sortie de l'onduleur.*

- **Courants de lignes à la sortie de l'onduleur**

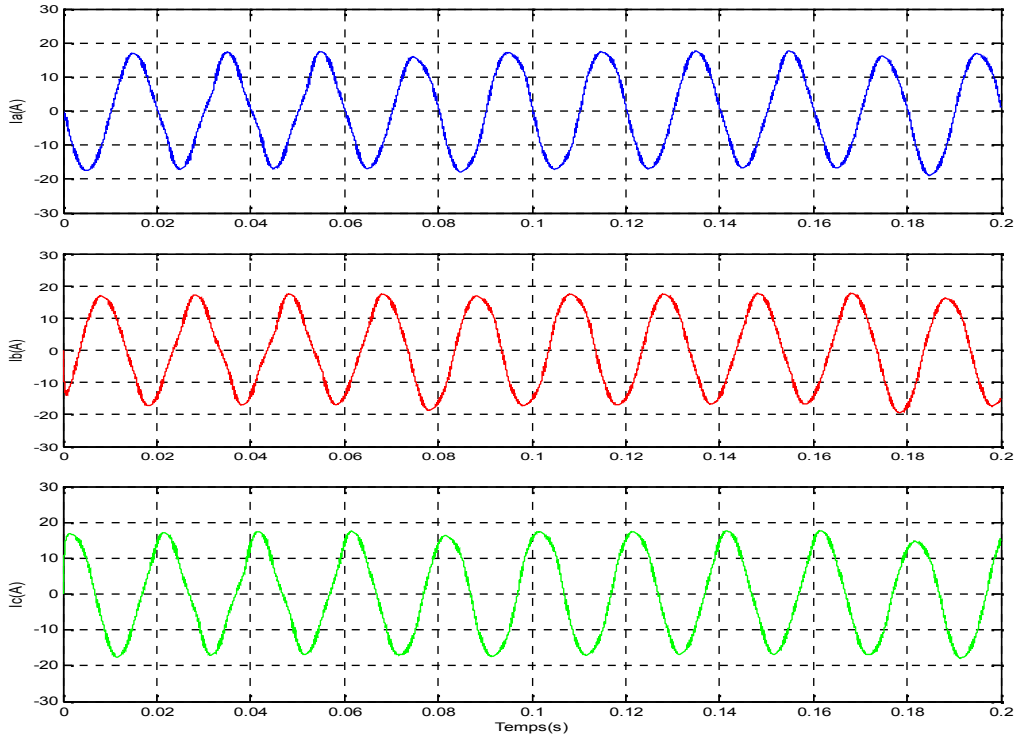


Figure V.20 : *Caractéristiques des courants de ligne à la sortie de l'onduleur.*

- **Tensions filtrées (aux bornes des condensateurs et de la charge)**

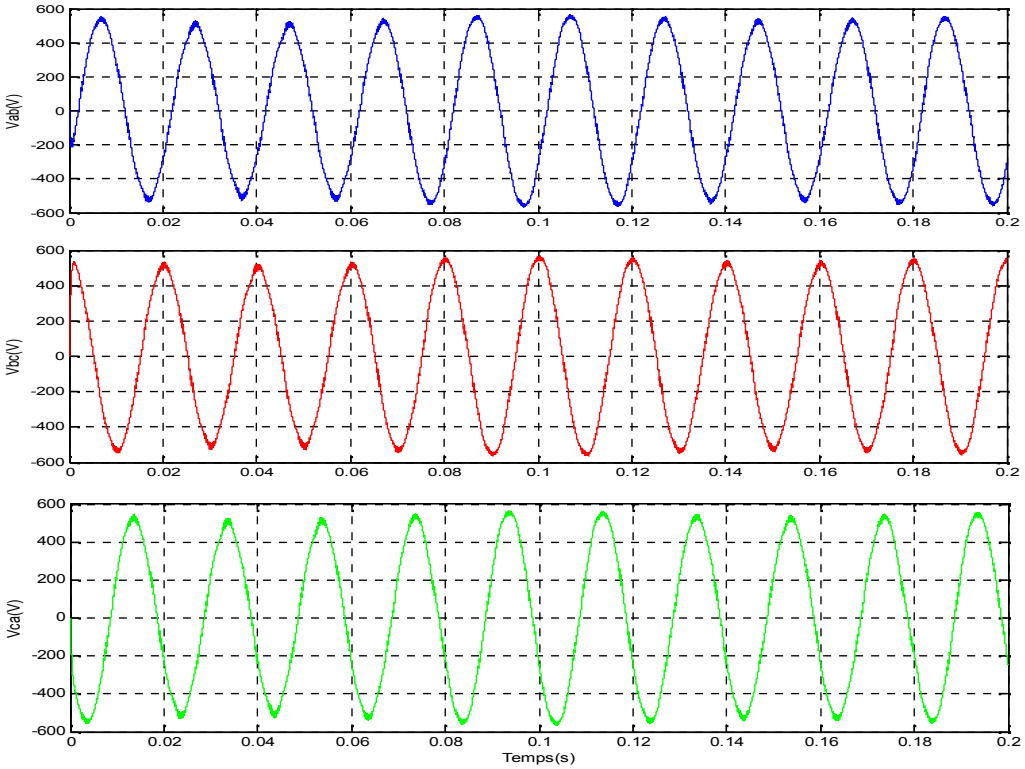


Figure V.21 : *Caractéristiques des tensions à la sortie du filtre.*

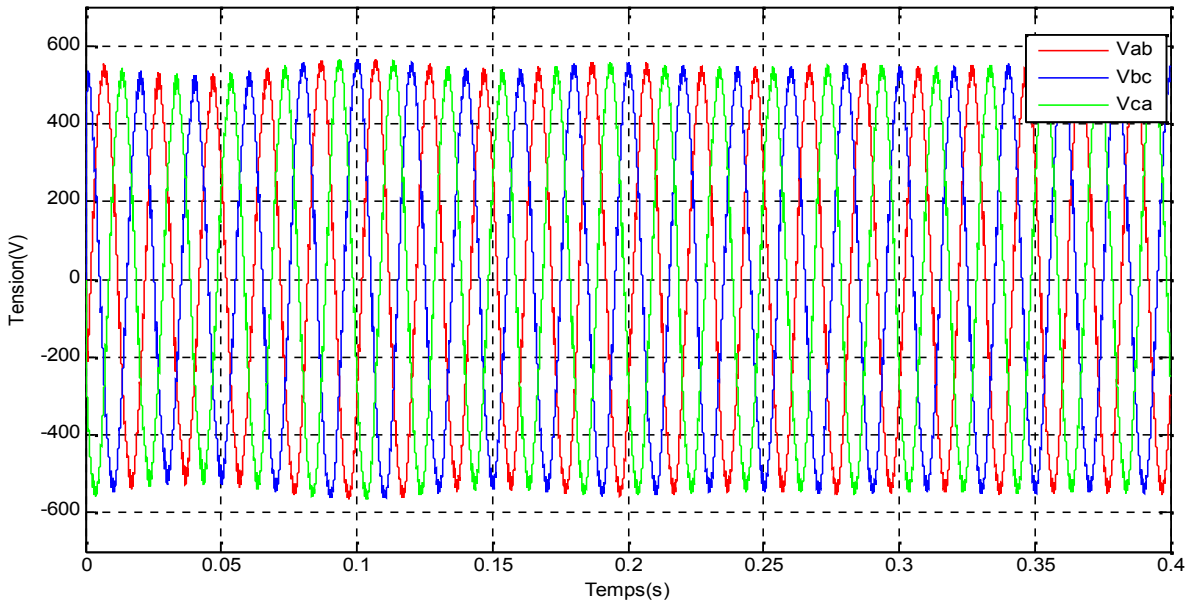


Figure V.22 : *Caractéristiques des tensions à la sortie du filtre après le régime transitoire.*

V.10 Simulation de la PLL avec MATLAB-Simulink

Le schéma simplifié de régulation et de simulation de la PLL dans domaine de Park est donné par la Figure V.23 :

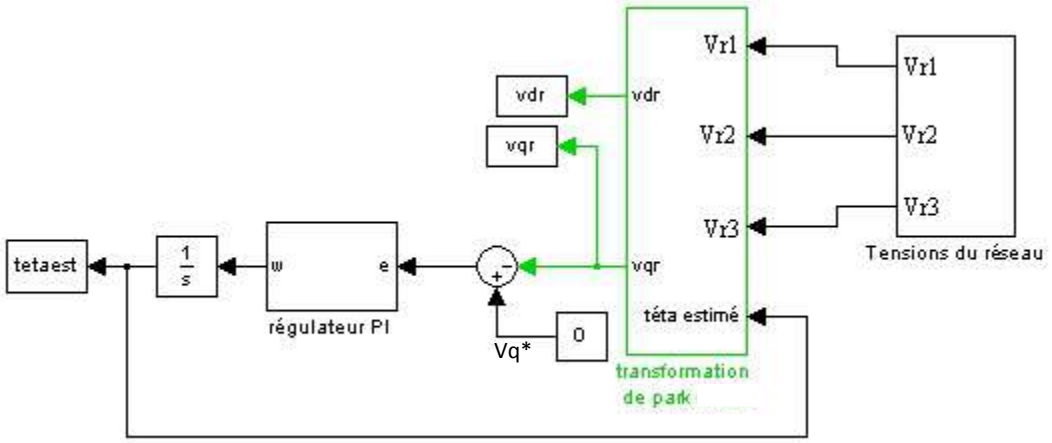


Figure V.23 : *Schéma block Simulink de la de la PLL.*

La caractéristique des tensions (*vdr, vqr*), des tensions triphasés du réseau (*Vr1, Vr2etVr3)* exprimée par la PLL dans le domaine de Park est donnée par la figure V.24 :

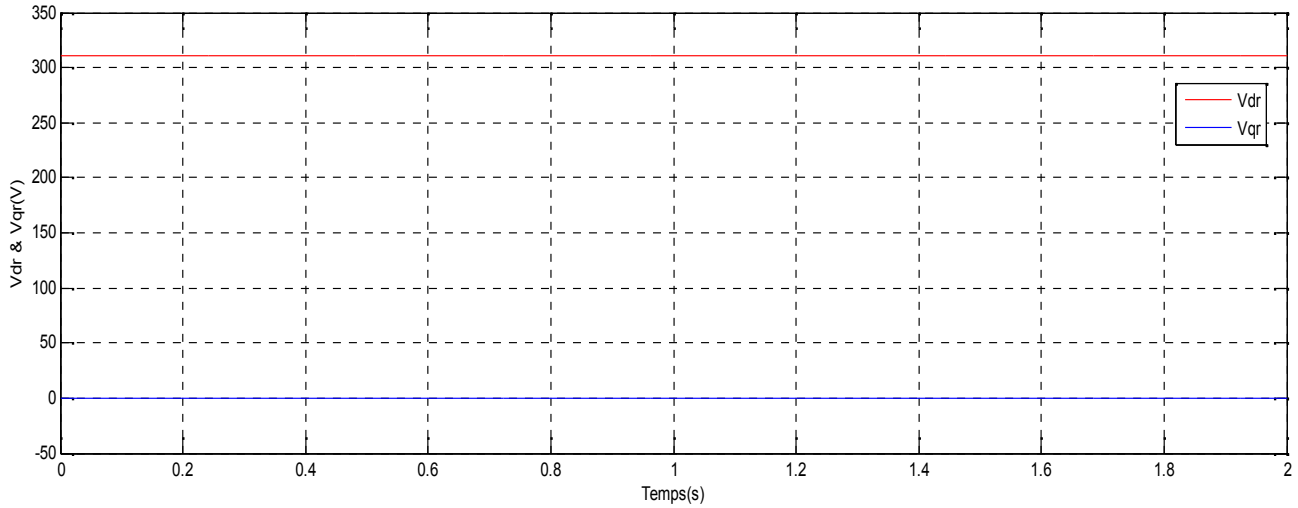


Figure V.24 : *caractéristiques des tensions* (*vdr, vqr*) *exprimé dans le domaine de Park.*

V.11 Schéma synoptique de connexion au réseau

Le schéma synoptique de connexion au réseau électrique se présente comme suit :

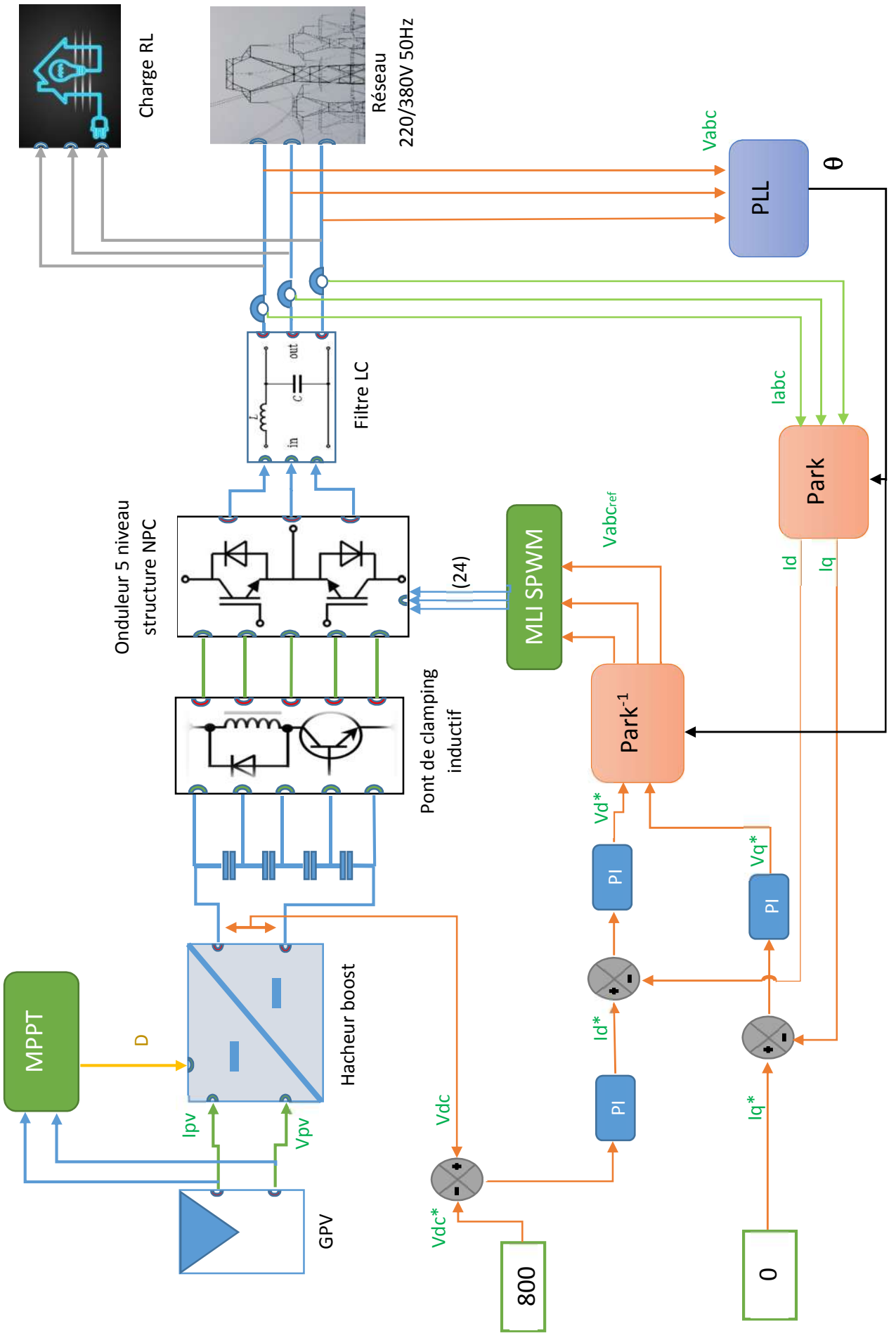


Figure V.25 : *Schéma synoptique de commande de la connexion au réseau*

V.12 Résultat de simulation

D'après la figure V.25 on a simulé sous MATLAB-Simulink le schéma globale de simulation de la connexion au réseau électrique. [Voir l'annexe 2]

V.12.1 Test simulation lorsque G=1000W/m²

Pour le contrôle et l'injection de la puissance au réseau électrique on a utilisé tous les diffèrent block indiquer, un test sera fait supposons que les irradiations maximal G=1000W/m² et une température T= 25°.

- Les résultats de simulation par rapport à l'injection de la totalisée de la puissance active dans ces différents passages sont donnée par les caractéristiques de la figure V.26

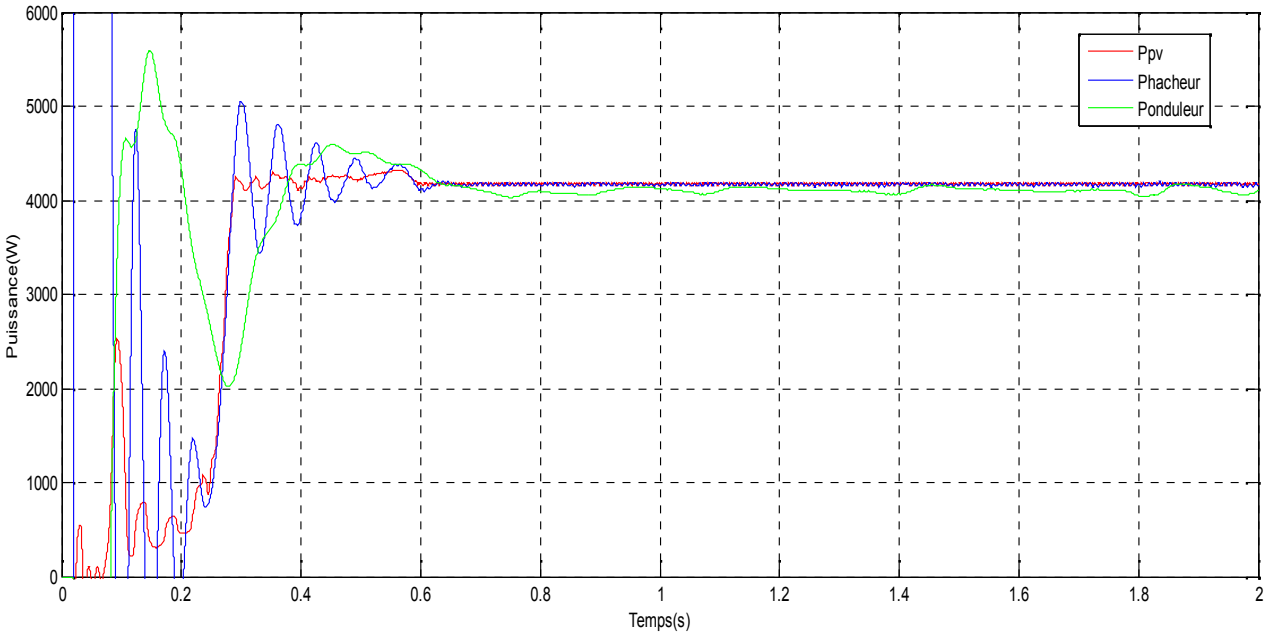


Figure V.26 : *caractéristiques des puissances injectées au réseau.*

- La puissance réactive qui est nulle et données par la figure V.27

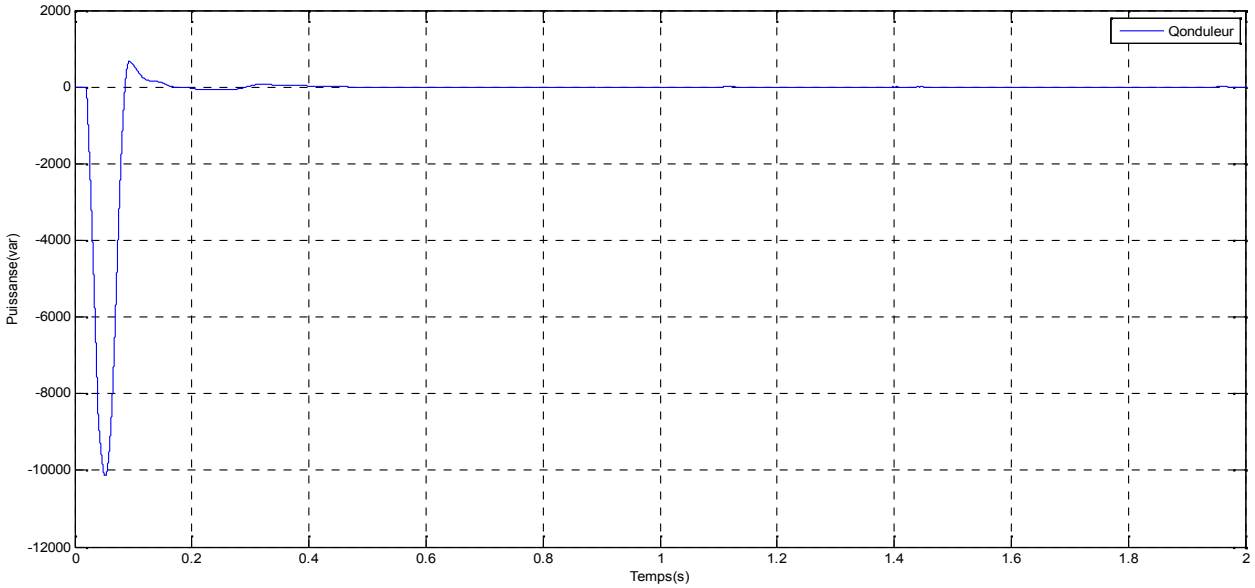


Figure V.27 : *puissance réactive injectés au réseau*

- Les caractéristiques du courant et tension injectes au réseau donné par la figure V.28

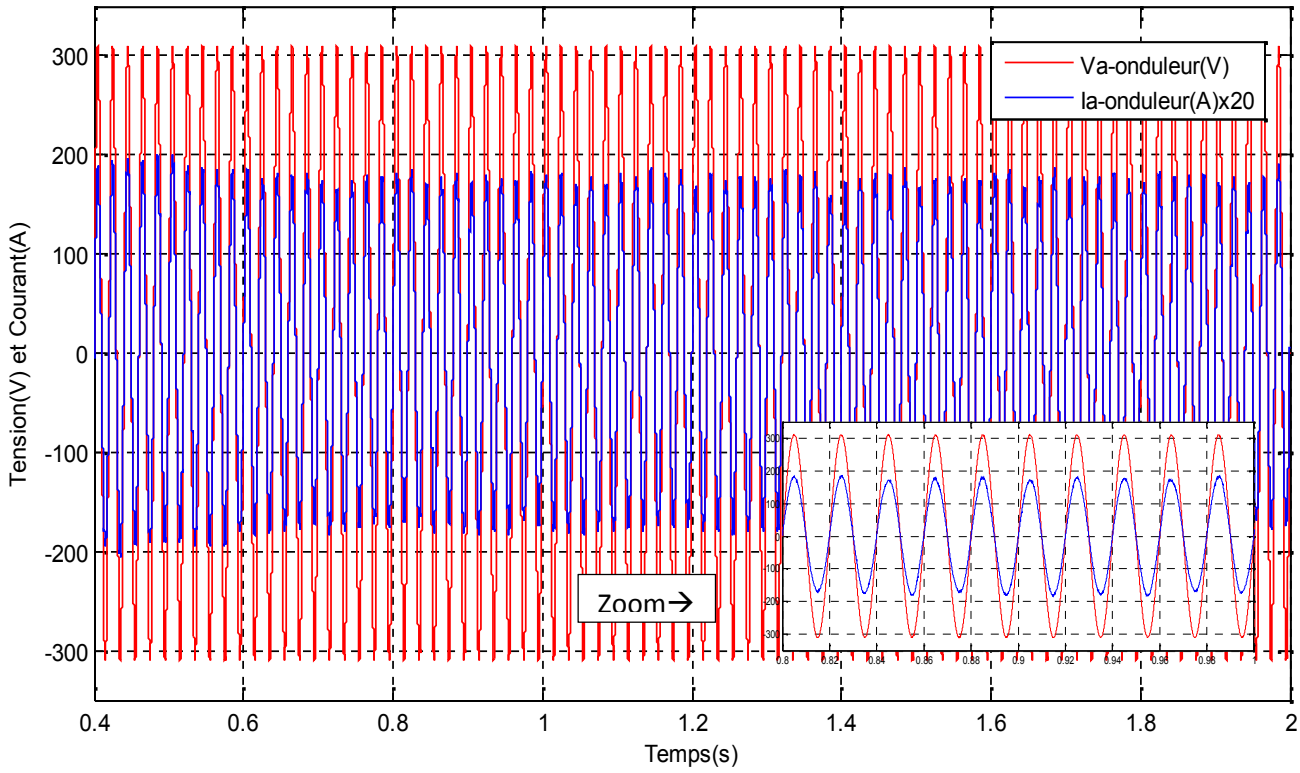


Figure V.28 : *tension et courant injectés au réseau*

- Les caractéristiques du courant simple représenté dans le domaine de park (idr iqr) donnée par la figure V.29

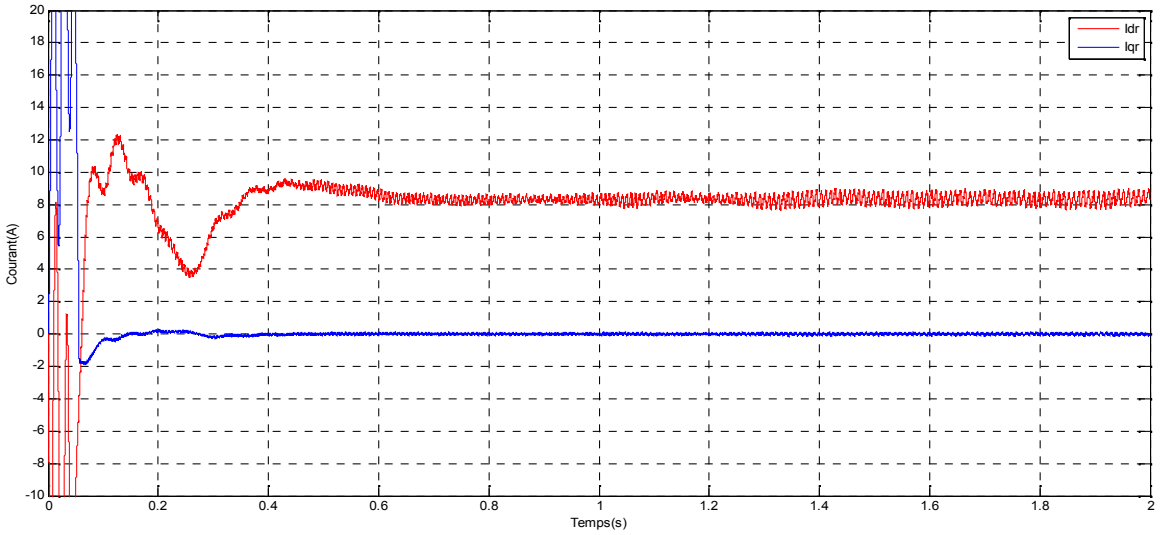


Figure V.29 : *Caractéristiques des courants actifs et réactif (idr, iqr)*

- Les caractéristiques des tensions et courant simple donnée par la figure V.30

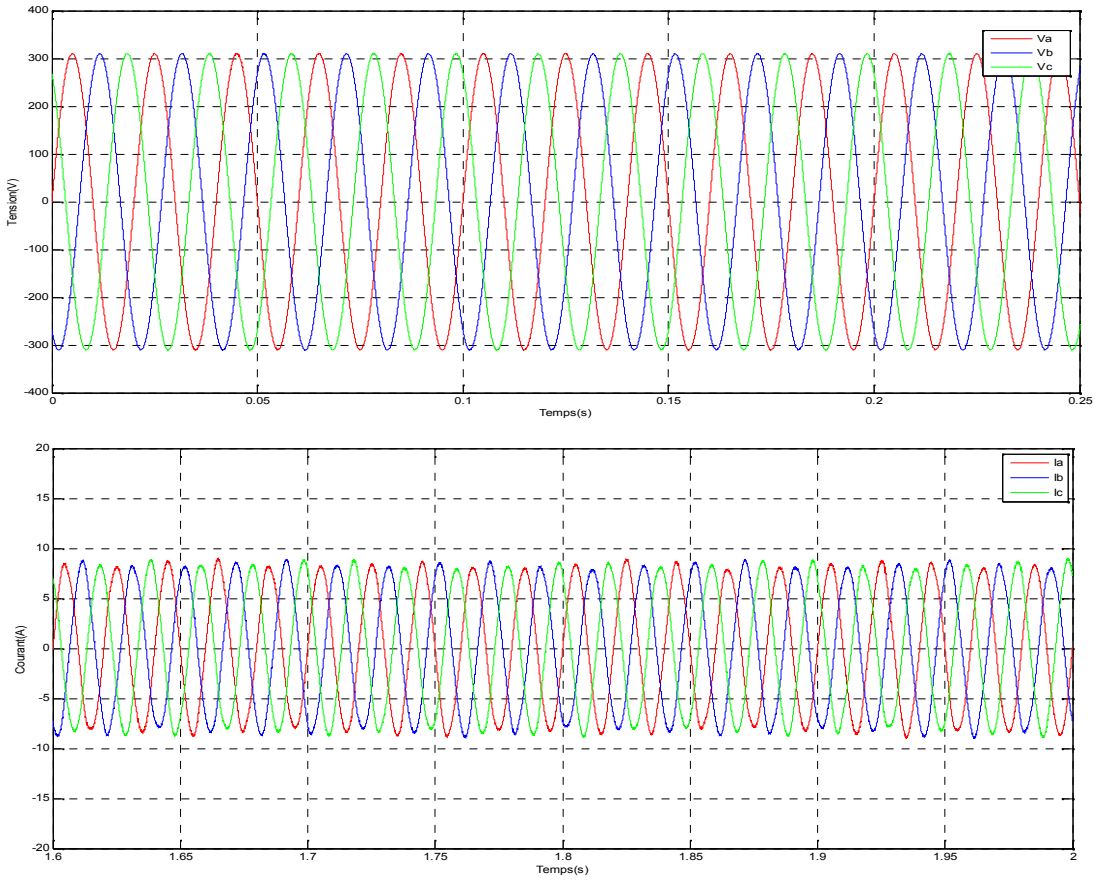


Figure V.30 : *Caractéristiques des tensions et courant simple*

- Caractéristiques de courant de référence avec courant injectés donnée sur la figureV.31

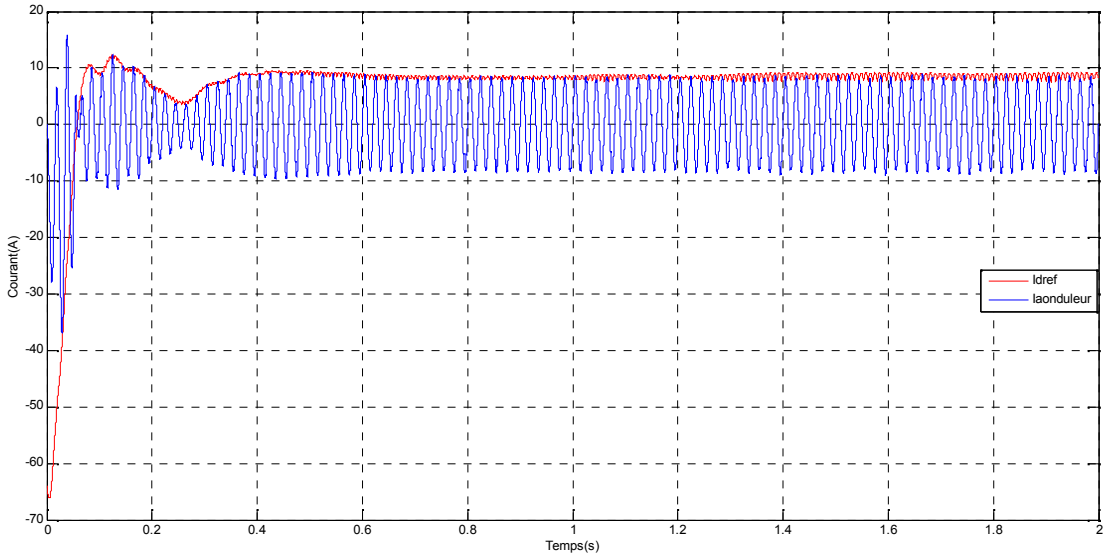


Figure V.31 : *Caractéristique de courant de référence avec courant onduleur*

- Les caractéristiques de tension de charge de la sortie d'hacheur et donnée par la figureV.32

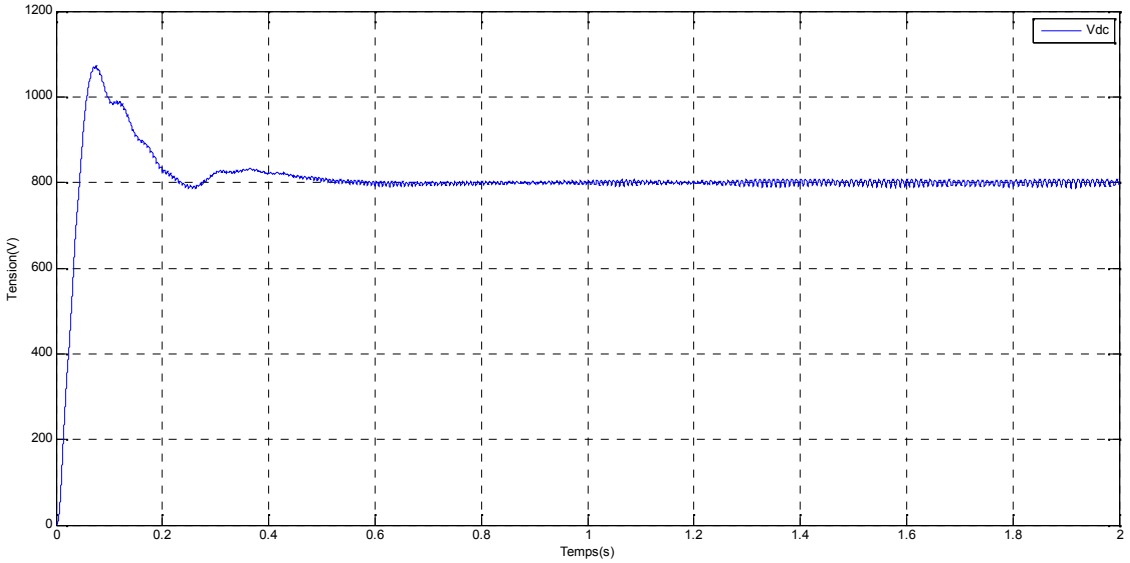


Figure V.32 : *caractéristiques de tension de charge de la sortie d'hacheur*

- caractéristiques de rapport cyclique D donnée par la figure V.33

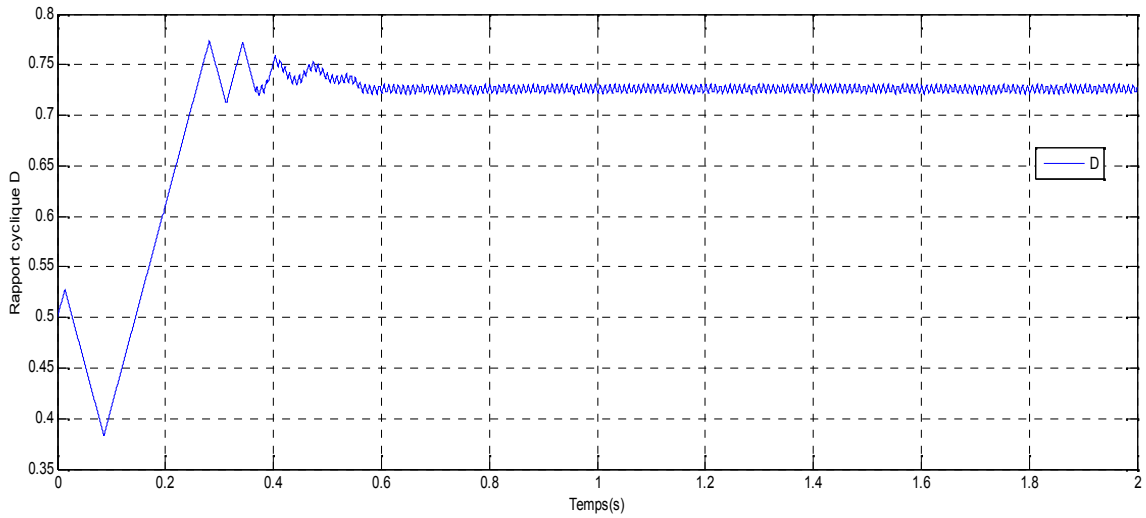


Figure V.33 : *Caractéristiques de rapport cyclique D*

V.12.2 Test simulation lorsque G=1000W/m² vers 700W/m² (Changement rapide)

Un test sera fait supposons que les radiations maximal G=1000W/m² ensuit les irradiations vont changer vers 700W/m² rapidement et une température T= 25° suivant l'indication de la figureV.34

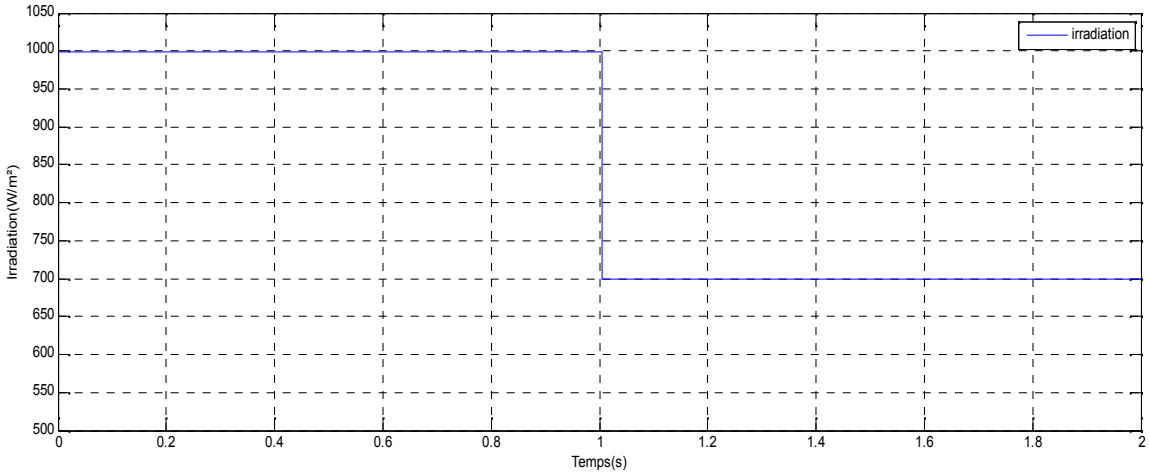


Figure V.34 : *Caractéristiques de changement d'irradiation*

- Les caractéristiques de puissance injectée au réseau en cas de changement rapide d'irradiation donnée par la figureV.35

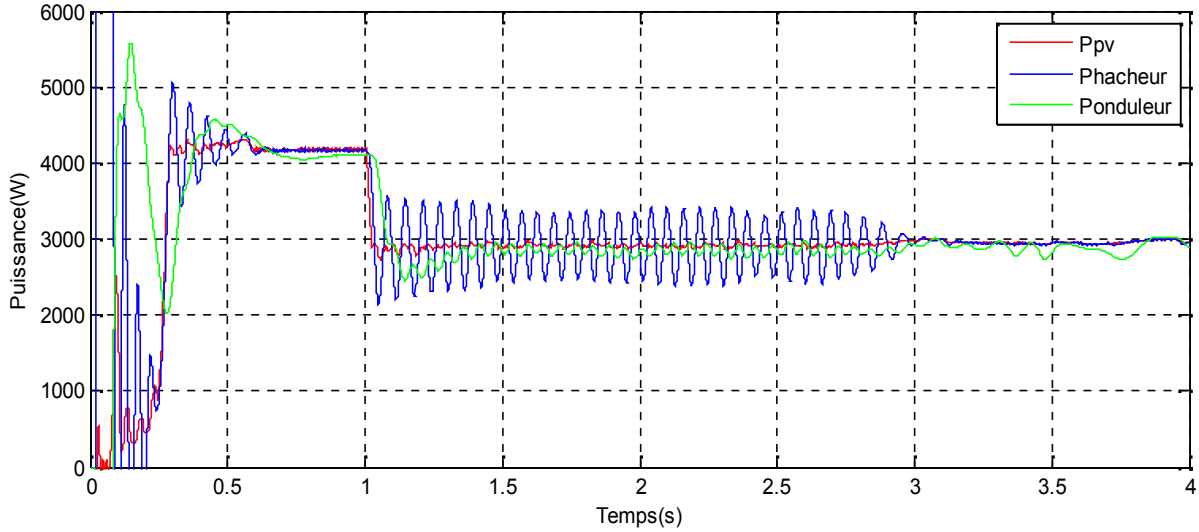


Figure V.35 : *Caractéristiques des puissances injectée au réseau en changement rapide d'irradiations*

- Les caractéristiques du courant et tension injectes au réseau en cas de changement rapide d'irradiation donné par la figure V.36

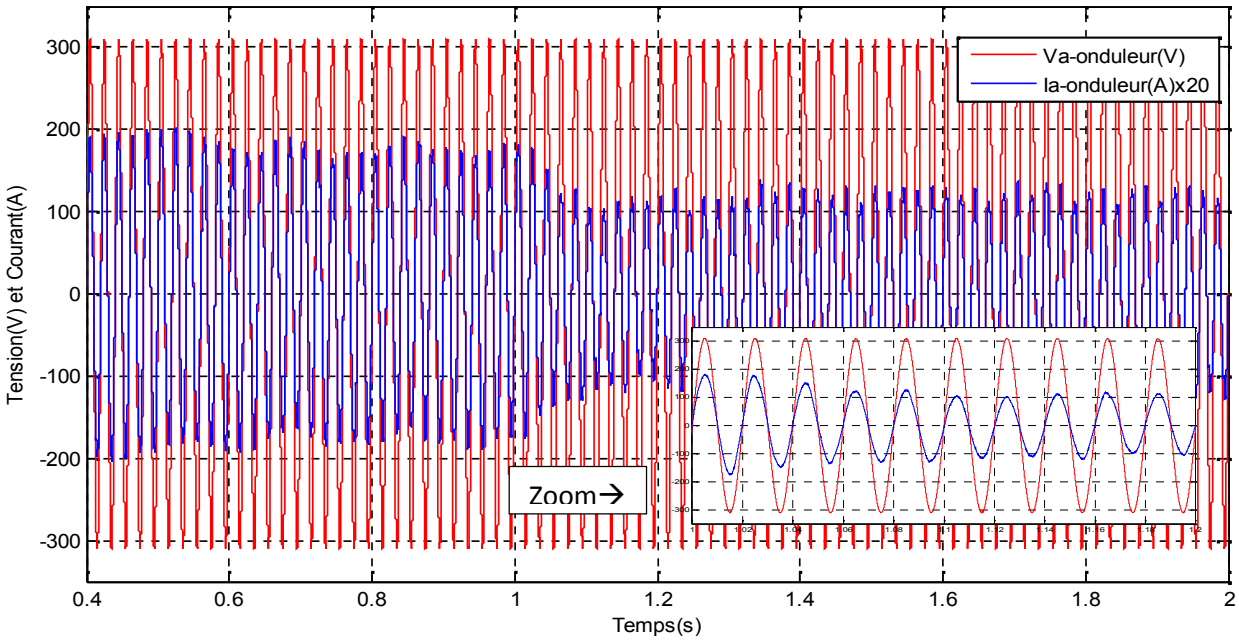


Figure V.36 : *Caractéristiques du courant et tension injectée au réseau en changement rapide d'irradiation*

- Les caractéristiques du courant simple représenté dans le domaine de park (idr iqr) avec changement rapide d'irradiation sont données par la figure V.37

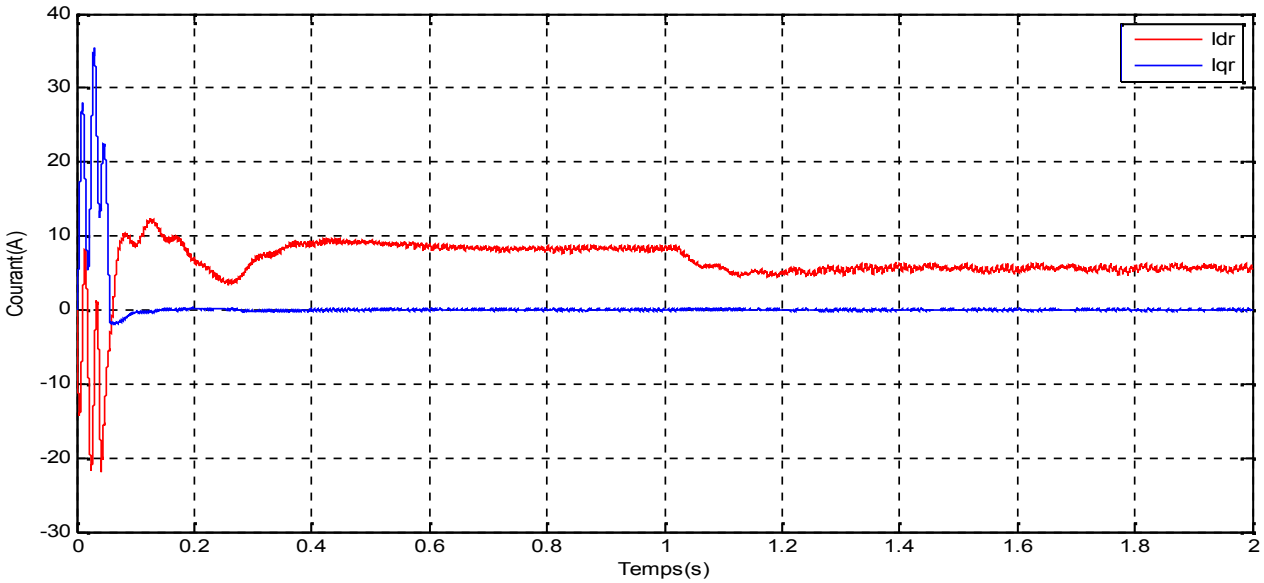


Figure V.37 : *Caractéristiques des courant actif et réactif (idr,iqr)changement rapide d'irradiation*

- Caractéristiques de courant de référence est courant injectés avec changement rapide d'irradiation est donnée sur la figureV.38

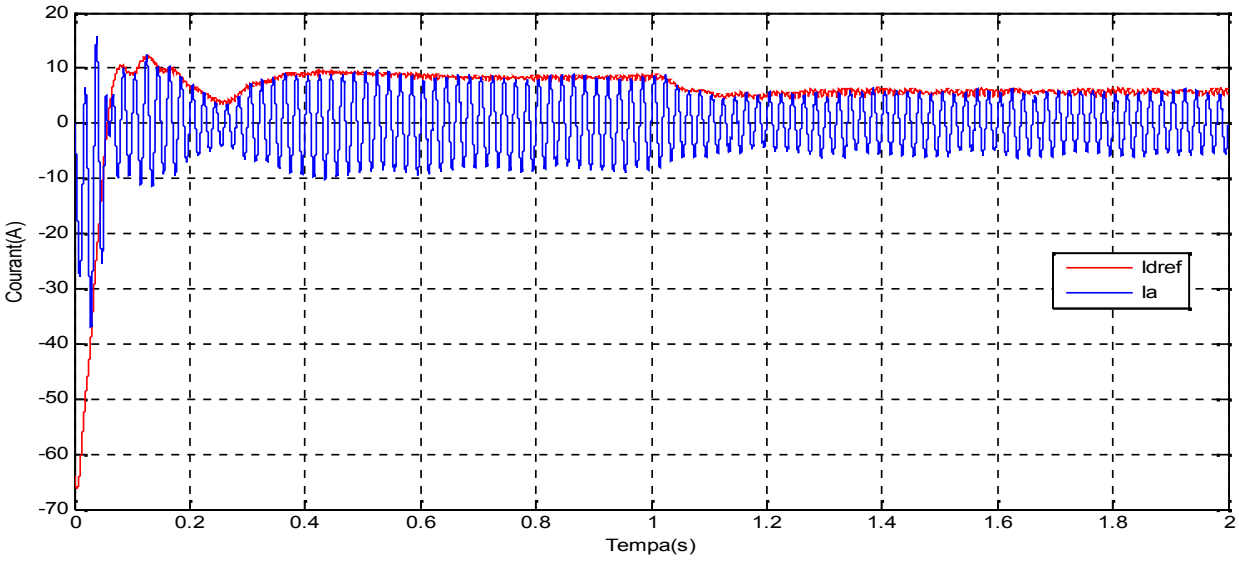


Figure V.38 : *Caractéristiques de courant de référence et courant injectés avec changement rapide d'irradiation*

- Les caractéristiques de tension de charge de la sortie d'hacheur en cas de changement rapide d'irradiation et donnée par la figureV.39

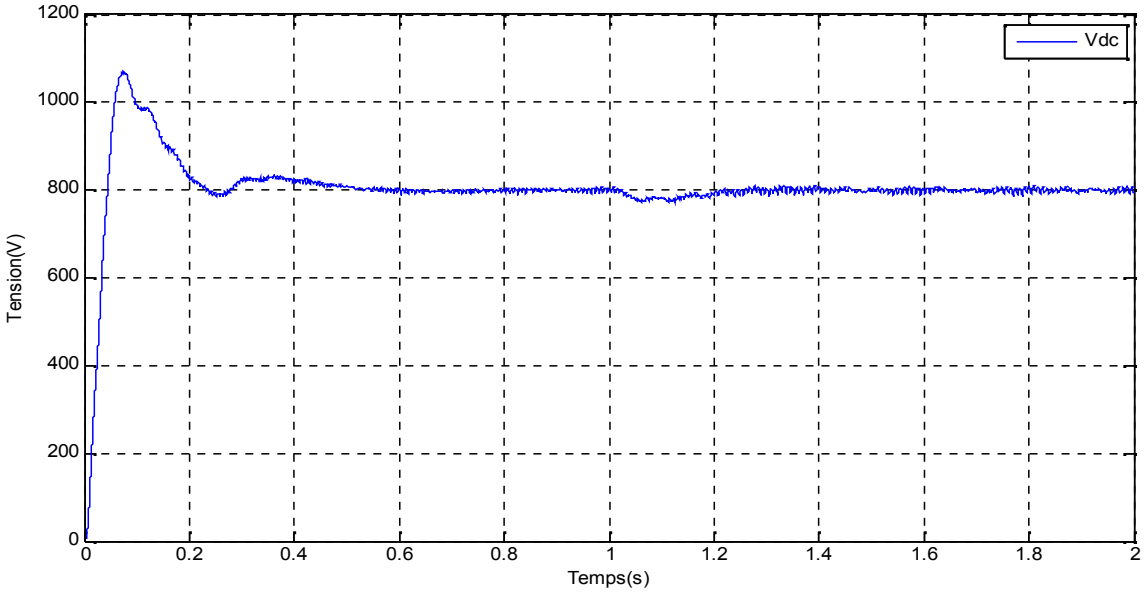


Figure V.39 : *Caractéristiques de tension de charge de la sortie d'hacheur en cas de changement rapide d'irradiation.*

- Les caractéristiques de rapport cyclique D en cas de changement rapide d'irradiation donnée par la figure V.40

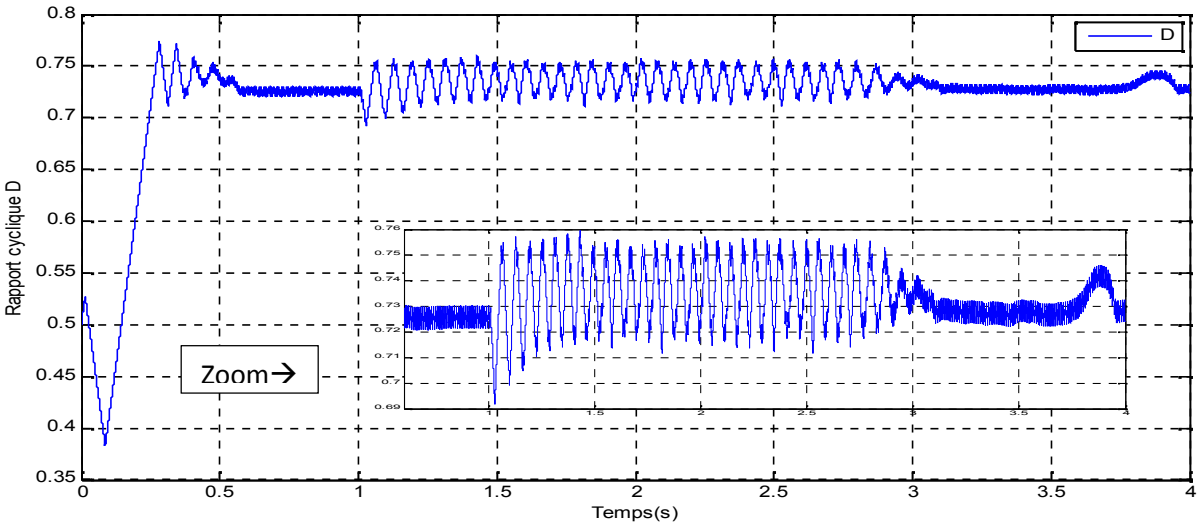


Figure V.40 : *caractéristiques de rapport cyclique D en cas de changement rapide d'irradiation*

La saturation de rapport cyclique D résultant de changement brusque d'irradiation et il faut un temps suffisant pour qu'il puis retourne en son fonctionnement normal.

V.12.3 Test simulation lorsque G=1000W/m² vers 700W/m² (Changement lent)

Un test sera fait supposons que les radiations maximal G=1000W/m² ensuit les irradiations vont changer vers 700W/m² lentement et une température T= 25° suivant l'indication de la figureV.41

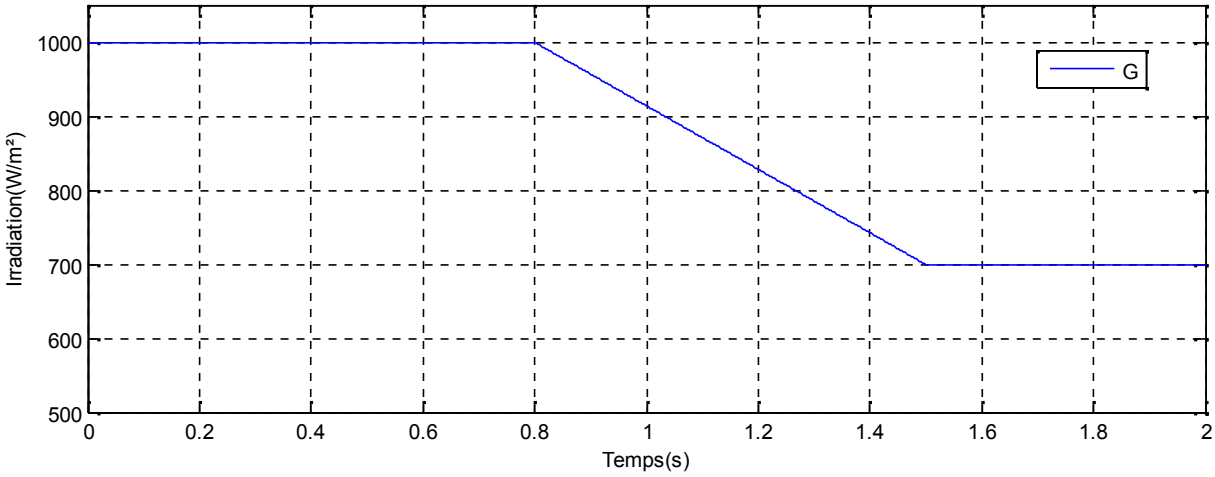


Figure V.41 : *Caractéristiques de changement d'irradiation*

- Les caractéristiques de puissance injectée au réseau en cas de changement lent d'irradiation donnée par la figureV.42

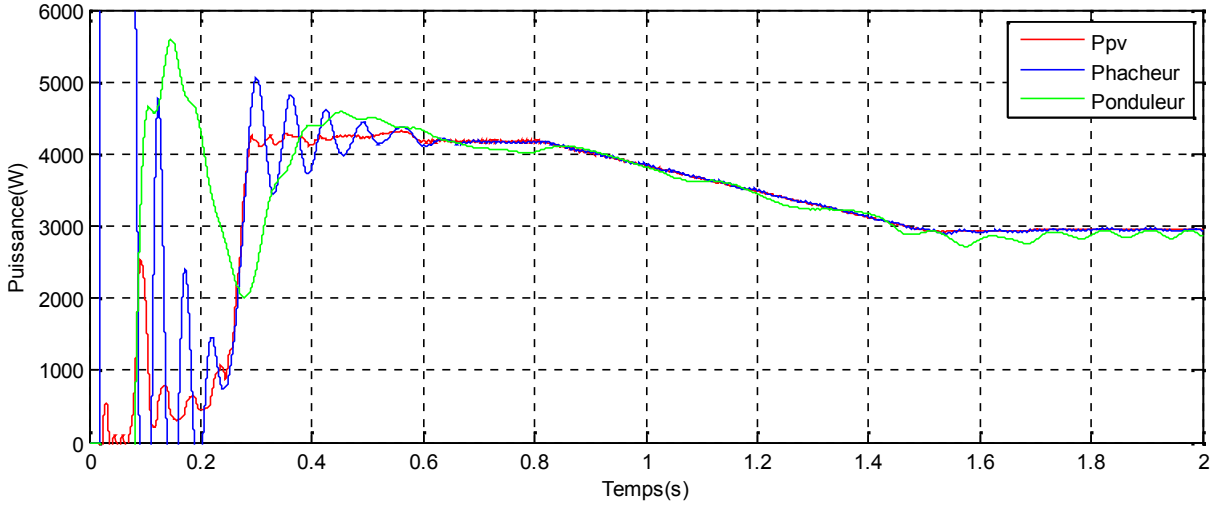


Figure V.42 : *Caractéristiques des puissances injectée au réseau en changement lent d'irradiations*

- Les caractéristiques du courant et tension injectes au réseau en cas de changement lent d'irradiation donné par la figure V.43

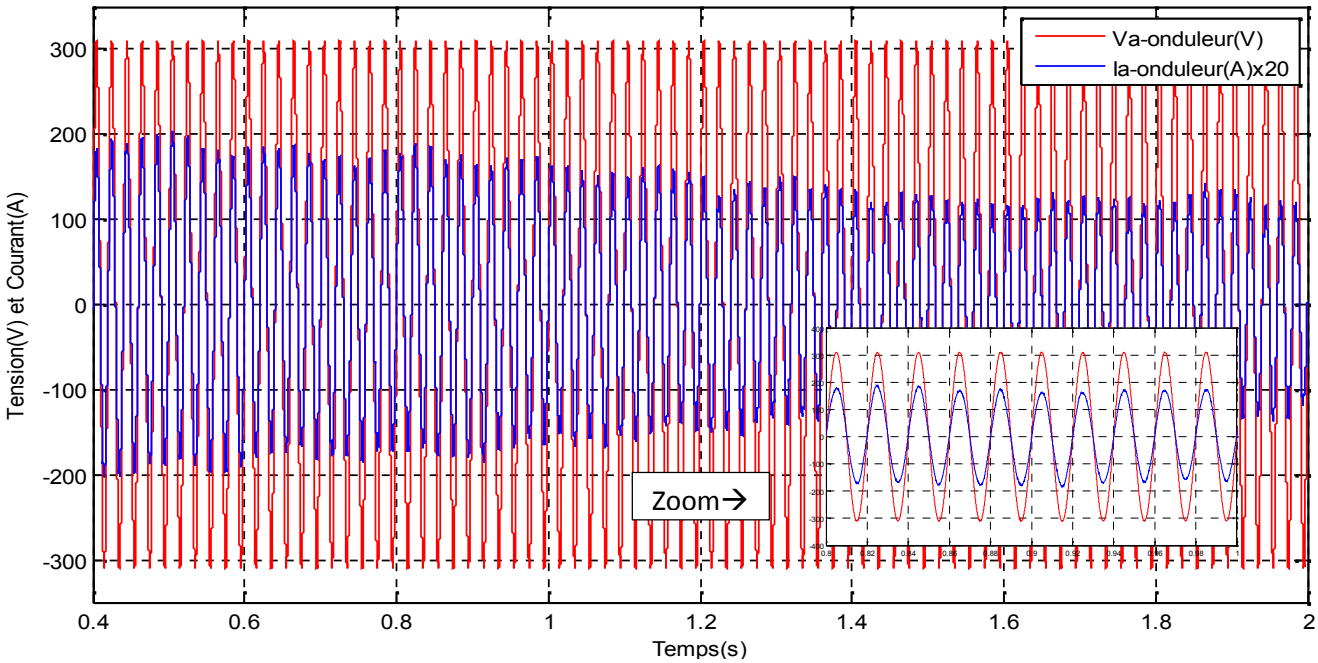


Figure V.43 : *Caractéristiques du courant et tension injectée au réseau en changement lent d'irradiation*

- Les caractéristiques du courant simple représenté dans le domaine de park (idr iqr) avec changement lent d'irradiation sont données par la figure V.44

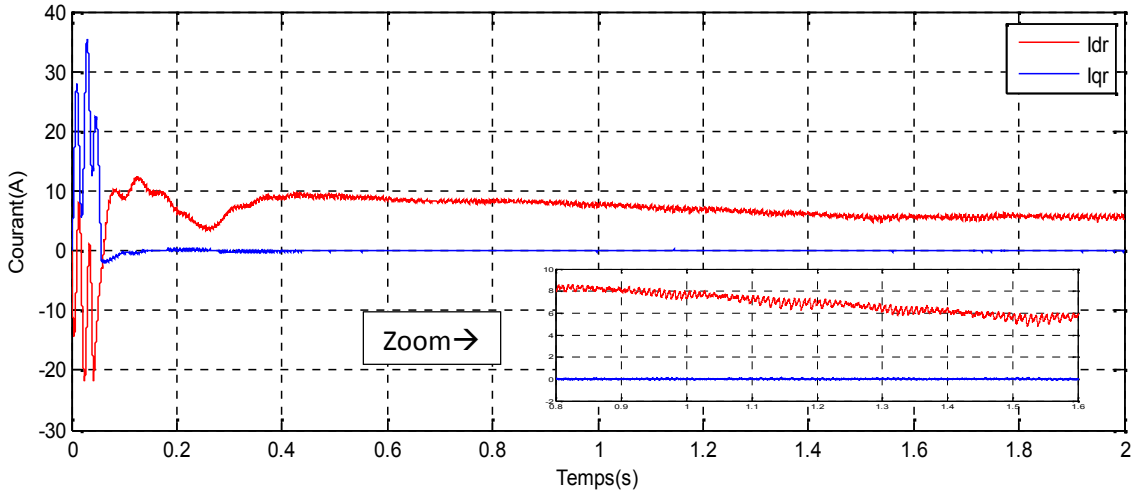


Figure V.44 : *Caractéristiques des courant actif et réactif (idr,iqr)changement lent d'irradiation*

- Caractéristiques de courant de référence est courant injectés avec changement lent d'irradiation est donnée sur la figureV.45

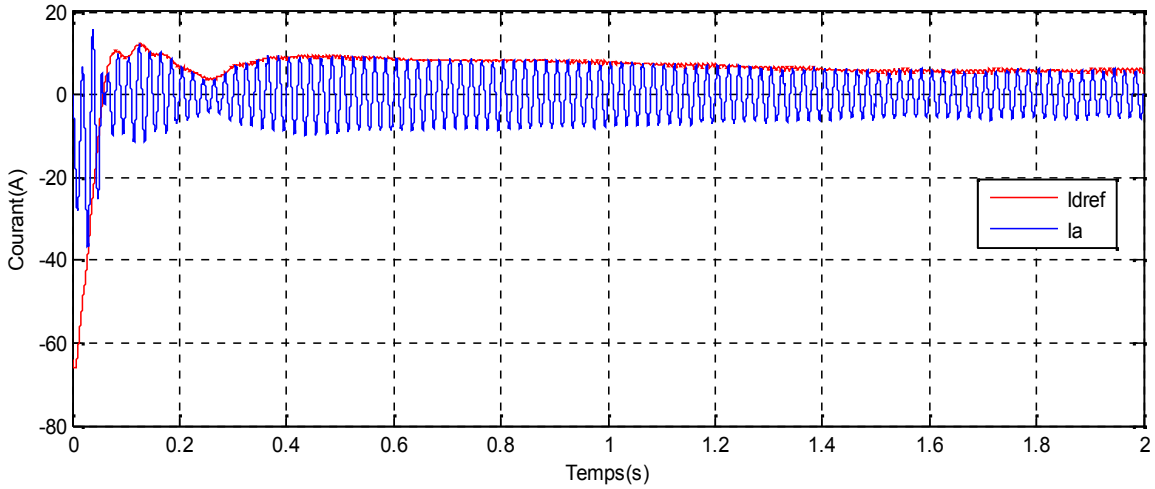


Figure V.45 : *Caractéristiques de courant de référence et courant injectés avec changement lent d'irradiation*

- Les caractéristiques de tension de charge de la sortie d'hacheur en cas de changement lent d'irradiation et donnée par la figureV.46

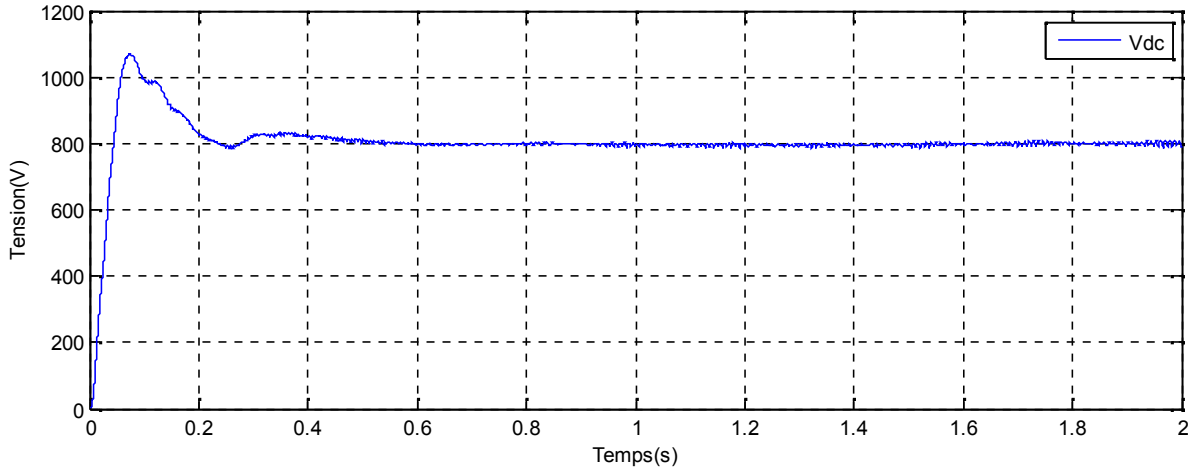


Figure V.46 : *Caractéristiques de tension de charge de la sortie d'hacheur en cas de changement lent d'irradiation*

- Les caractéristiques de rapport cyclique D en cas de changement lent d'irradiation donnée par la figure V.47

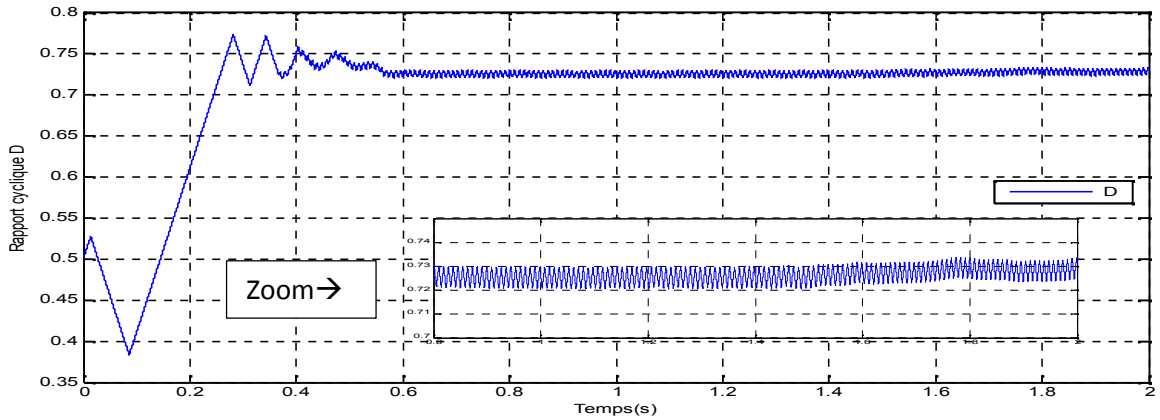


Figure V.47 : *caractéristiques de rapport cyclique D en cas de changement lent d'irradiation*

Interprétations des résultats :

Les résultats présenté dans ce chapitre présent premièrement la simulation des panneaux (6x6) connectée a hacheur boost, on observe à travers les figures présentées qu'on a réussi à garder la puissance photovoltaïque (Ppv) à la sortie du hacheur (P hacheur), cette résultat prouve notre bon fonctionnement du MPPT (ce qui est montrée dans les figure de rapport cyclique D), ensuit on présenter les figures de sortie de l'onduleur multiniveaux a structure NPC avant et après le filtre et dernièrement on a la simulation du système globale dans le mode parfait lorsque l'irradiation sont maximale 1000W/m² et la température 25°C et lorsque un changement d'irradiation une fois rapide et autre lent, on observant à la sortie d'onduleur dans le premier cas (mode parfait) une puissance active de bon rendement et puissance réactive nulle, courant et tension synchroniser avec le réseau et dans les deux autre cas on observe une poursuit de courant et de puissance symétries au changement d'irradiation.

V.13 Conclusion

Dans ce chapitre, les composants proposés de système sont mis en application dans des environnements de logiciel MATLAB/SIMULINK. Le comportement dynamique du système est étudié, à l'aide des outils de ce logiciel, montrant l'interaction entre différents paramètres de panneau photovoltaïque PV connecté au réseau électrique. En plus de la recherche dynamique de comportement, la simulation a montré l'échange de flux de puissance entre différents composants du système pour différents modes d'opération.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes photovoltaïques raccordé au réseau électrique. Ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production et d'un meilleur respect de l'environnement. Associées à une production centralisée, ces petites ou moyennes unités peuvent permettre une mutualisation avantageuse de ressources très réparties, très fluctuantes, et contribuer à une meilleure gestion de l'énergie électrique dans un contexte de développement durable.

Ainsi, après un bref rappel sur les ressources énergétiques renouvelables et sur les systèmes de production associés, nous nous sommes intéressés aux chaînes de production photovoltaïque, les études énergétiques, menées aussi bien sur les plans théoriques.

Ce Mémoire est consacré à l'étude des sources photovoltaïque application à une cascade source photovoltaïque - onduleur cinq niveaux à structure NPC.

Dans le premier chapitre, nous avons procédé à la définition, l'effet et la modélisation d'un générateur photovoltaïque, ainsi on a présenté sa topologie générale.

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé la modélisation de la cellule PV ainsi que le développement de différentes techniques de poursuite de point de puissance maximale (MPPT).

La poursuite de point de fonctionnement maximale (PPM) par la méthode P&O est une technique relativement simple, rapide, n'utilisant qu'un nombre réduit de capteurs, s'adaptant assez bien au changement des conditions météorologique et à ceux de la charge. L'inconvénient majeur de cette méthode vient de pertes de puissance engendrées par l'oscillation du point de fonctionnement du système photovoltaïque autour de sa position optimale. Ces pertes augmentent avec le pas d'incrémentation du rapport cyclique du hacheur. Par ailleurs, un pas très faible augmentera le temps de réponse du système. Un compromis doit être adopté entre rapidité et perte de puissance.

Dans le troisième chapitre, nous avons décrit le dimensionnement de trois topologies de base de convertisseur statique DC/DC. Par suite on a présenté le modèle de fonctionnement de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC. L'utilisation des fonctions de connexion des interrupteurs et celle des demi bras de cet onduleur nous ont permis de montrer que ce est équivalent à deux onduleurs à trois niveaux en série, ainsi, nous avons utilisé une stratégie de commande MLI, (la commande triangulo-sinusoïdale avec 4 porteuses) de l'onduleur de

tension à cinq niveaux à structure NPC, et pour éliminer le déséquilibrage des tension on a utilisé un pont de climping inductif.

Dans le quatrième chapitre, nous avons étudié les systèmes photovoltaïques connectés au réseau et les différentes technologies des onduleurs couplés au réseau.

Dans le cinquième chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation par une Simulink/Matlab d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique.

Les travaux futurs qui pourraient être poursuivis à partir des résultats et de la recherche effectuée dans ce travail de projet sont entre autres les suivants :

- La gestion de systèmes multisources-multistockage en vue d'optimiser les services fournis aux réseaux électrique afin d'améliorer la fiabilité tout en augmentant l'efficacité énergétique et en utilisant des convertisseurs multiniveaux.
- Elaboration de nouveaux algorithmes d'extraction de puissance maximale (réseau de neurone, floue ou lieu des correcteur PI,…..) et des convertisseurs multiniveaux. Il serait intéressant de tester, sur un banc expérimental.

Annexe

L'annexe 1 : Paramètres du convertisseur boost :

Les paramètres du convertisseur boost est :

- V_{pv} : $(6 * 6) * 5.61 = 202.2$ V
- V_{cha} : 800 V
- Puissance maximale PV : (6*6) * 120 = 4320 W
- F_s : 10 KHz
- Temps des ondulations Max du courant de l'inductance L : 10%

L'équation de calcul de l'inducteur L

$$\mathbf{L \geq \frac{V_{cha} \cdot D_{m.}(1 - D_m)}{F_s \left|\Delta I_{L\,ripple}\right|}}$$

L'équation de calcul de rapport cyclique

$$\mathbf{\frac{V_0}{V_{pv}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1 - D}}$$

$$\mathbf{D = 1 - \frac{V_{pv}}{V_{cha}}}$$

$$\mathbf{D = 0.726}$$

L'équation de calcul de courant de sortie de l'hacheur

$$\mathbf{I_{cha} = \frac{P_{cha}}{V_{cha}}}$$

Le courant de sortie de l'hacheur

$$\mathbf{I_{cha} = \frac{4320}{800} = 5.3\ A}$$

La résistance charge est

$$\mathbf{R_{cha} = \frac{800}{5.3} = 148,15\ Ohm}$$

L'inductance L est

$$\mathbf{L \geq \frac{800 * 0.726 * (1 - 0.726)}{10000 * 2 * 21.36 * 0.1}}$$

$$\mathbf{L \geq 3432\ \mu H}$$

La capacité d'entrée C_{in} utilisée la relation

$$\mathbf{C_{in}} \geq \frac{\mathbf{I_{om}} \cdot \mathbf{D_{m^2}}}{\mathbf{0.02(1-D_m)F_s V_{mp}}}$$

$$\mathbf{C_{in}} \geq \frac{\mathbf{5.3 * 0.726^2}}{\mathbf{0.02(1-0.726) * 10000 * 202.2}}$$

$$\mathbf{C_{in}} \geq \mathbf{277\ \mu F}$$

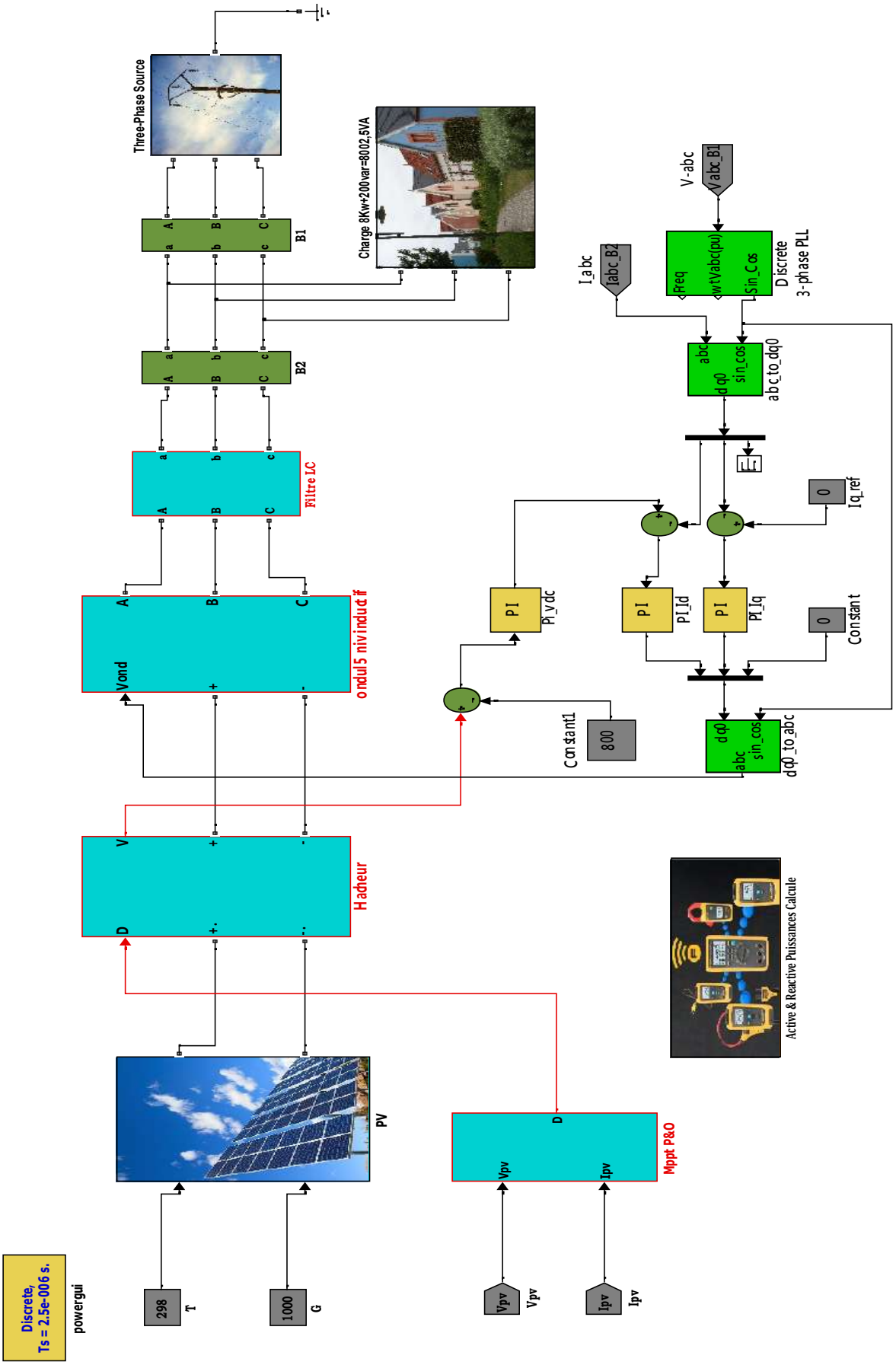
La capacité d'entrée C_{out} utilisée la relation

$$\mathbf{C_{out}} \geq \frac{\mathbf{V_{cha}.D}}{\mathbf{F_s \Delta V_{cha} R_{cha}}}$$

$$\mathbf{C_{out}} \geq \frac{\mathbf{800*0.726}}{\mathbf{10000*8*148,15}}$$

$$\mathbf{C_{out}} \geq \mathbf{5.8\ \mu F}$$

L'annexe 2 : schéma globale de simulation MATLAB/Simulink de la connexion au réseau électrique.



BP MSX 120

120-Watt Multicrystalline
Photovoltaic Module

BP Solar's MSX series is a premium line of PV modules with a 25-year performance warranty, tightly controlled electrical parameters, and labeling showing each module's tested electrical characteristics. Providing 120 watts of nominal maximum power, the MSX 120 is used primarily in large battery-equipped PV systems or — through an inverter — to provide AC power directly to a load. Typical applications include grid-supplemental residential and commercial systems, telecommunications, remote villages and clinics, pumping, and land-based navigation aids. Its attractive bronze-anodized frame also suits it well for architectural applications.

This product is available as a framed module or an unframed laminate, in 12V or 24V nominal configurations, with either:

- Dual high-volume junction boxes which allow on-site 12V/24V selection by rewiring (MSX 120);
- Installation-speeding DC-rated polarized connectors (MSX 120MC).

Proven Materials and Construction

BP Solar's quarter-century of field experience shows in every aspect of these module's construction and materials:

- 72 multicrystalline silicon solar cells configured as one series string or two 36-cell series strings (bypass diodes are included);
- Cells are laminated between sheets of ethylene vinyl acetate (EVA) and high-transmissivity low-iron 3mm tempered glass;
- Frame strength exceeds requirements of certifying agencies.

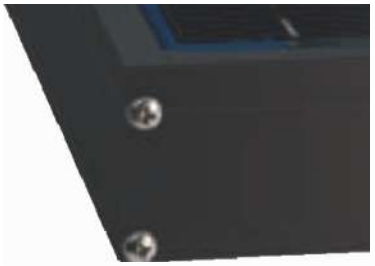


Weatherproof Connectors

MSX 120MC output is via heavy-duty (4mm²/AWG #12) output cables with polarized weatherproof DC-rated connectors which provide reliable Low-resistance connections, eliminate wiring errors, and speed installation. Asymmetrical cables enable side-by- side or end-to-end module placement in arrays.

High-Capacity Versatile Junction Box

The junction boxes of the MSX 120 are rain tight (IP54 rated) and accept PG13.5 or 1/2" nominal conduit or cable fittings. Their volume (411cc, 25 cubic inches) and 6-terminal



Universal Frame

Connection blocks enable most system array connections (putting modules in series or parallel) to be made right in the boxes. Options include:

- An oversize terminal block which accepts conductors up to 25mm² (AWG #4); standard terminals accept up to 6mm² (AWG #10);
- A Solar state™ charge regulator.

Products with junction boxes may be rewired to provide 12V or 24V output.

Limited Warranties

- Power output for 25 years;
- Freedom from defects in materials and workmanship for 5 years.

See our website or your local representative for full terms of these warranties.

Individually Tested and Labeled

Each module tested and labeled with its actual output — voltage, current, and power at maximum power point (P_{max}) — at Standard Test Conditions and Standard Operating Conditions.



BP MSX 120

MSX 120 laminates also qualify for the above listings and certifications; MSX 120MC laminates are UL-recognized. MSX 120 modules and laminates with junction boxes are also certified by Power Mark Corporation and approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations.

Quality and Safety

MSX 120 and MSX 120MC modules are manufactured in our ISO 9001-certified factories, listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating), certified by TÜV Rheinlander as Class II equipment, and comply with the requirements of IEC 61215 including:

- repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
- Simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
- A "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C And 85% relative humidity;
- A "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
- Static loading, front and back, of 2400 Pascal (50 psf); front loading (E.g. snow) of 5400 Pascal (113 psf).

Electrical Characteristics[1]

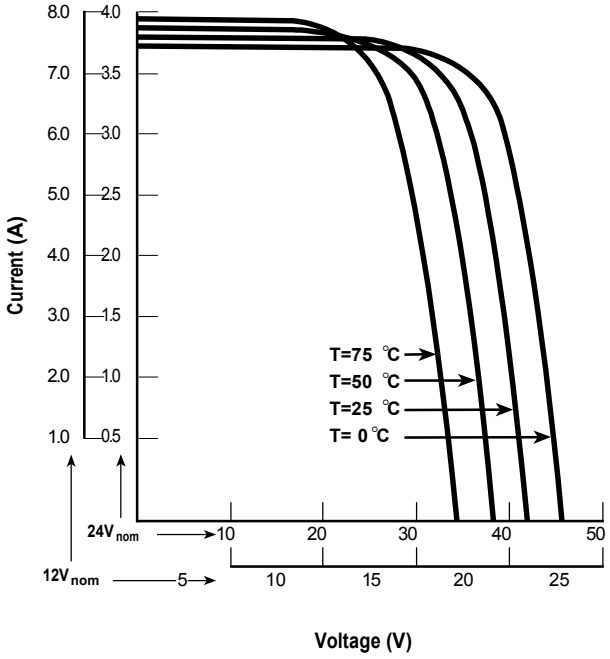
	MSX 120	MSX 110[4]
Voltage at P_{max} (V_{mp})	33.7V	33.6V
Minimum P_{max}	114W	105W
Short-circuit current (I_{sc})	3.87A	3.6A
Open-circuit voltage (V_{oc})	42.1V	41.6V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT[3]	47±2°C	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	
Maximum series fuse rating	20A	

Notes

1. These data represent the performance of typical MSX 110 and MSX 120 products in 24V configuration. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
   - Illumination of 1 kW/m² (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
   - Cell temperature of 25°C.
2. During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical P_{max}.
3. The cells in an illuminated module operate hotter than the

   Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m², And wind speed of 1 m/s.
4. The power of solar cells varies in the normal course of production; the MSX 110 is assembled using cells of slightly lower power than the MSX 120.

MSX 120 I-V Curves



Bibliographie

[1] Y. Jannot, «*Thermique solaire***».** Livre solaire, Octobre 2003**.**

[2] M.Angel, C.Pastor, «*Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques***».** Mémoire de doctorat de l'Institut National des Sciences, Toulouse, septembre 2006.

[3] Beriber. B, «*Cellules photovoltaïques organiques souples a grande surface***»**, Thèse de doctorat, L'université bordeaux I, 2004.

[4] S. Petibon, «*Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques*». Mémoire de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.

[5] M. Ahmed BETTACHE, «*Application de la technique du Mode Glissant pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT) d'un générateur photovoltaïque*», mémoire de Master, UNIVERSITE DR. YAHIA FARES, Médéa, 2014.

[6] http://www.les-energies-renouvelables.eu/9702fonctionnement-dune-cellule photovoltaique.html**.**

[7] Abdelkader Morsli, «*Etude d'un système solaire photovoltaïque utilisant des super condensateurs*», mémoire de Magister, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE. Médéa, 2010.

[8] C. Domestiques, "*Etude de faisabilité technico-économique de la filière photovoltaïque raccordée réseau au Sénégal*.",2009.

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

[10] J.Youngseok, S.Jungnun, **Y.Gwonjog and C.Jaeho**, « *Amélioration de la perturbation et l'observation méthode de contrôle MPPT pour le système d'énergie photovoltaïque* », la 31e Conférence des spécialistes photovoltaïques, pp.1788-1791, Floride 3-7 janvier 2005.

[11] R. W. Erickson, «*Fundamentals of Power Electronics Instructor's slides*». Power Electronics Group, University of Colorado at Boulder, Publisher and vitals New York: Chapman and Hall, May 1997.

[12] O.Boukli-Hacene., «*conception Réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure Gestion énergétique»,* Mémoire d'ingéniorat, université de Tlemcen, Algérie, 2011.

[13] OULD CHERCHALI Noureddine « *analyse et commande d'un onduleur multiniveaux. Application à la machine asynchrone*», memoire de magister, Centre universitaire de Medea 2006.

[14] Boulkhracherf. S. « *Analyse et Commande D'un Onduleur à Cinq Niveaux à Structure NPC Application à La Machine Asynchrone Commandée par Logique Floue* » thèse de magister, ENP, 2001.

[15] ZAOUI Aboubakr «*Etude des techniques MPPT pour les sources photovoltaïques. Application à une cascade source photovoltaïque onduleur multiniveaux*», mémoire d'ingénieur, Université Dr YAHIA FARES, Médéa, juin, 2011.

[16] S .Ait cheikh, «*Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*». Thèse de doctorat, Ecole National Polytechnique El-Harrach, Décembre, 2007.

[17] A. Mabrouk, «*Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique*». Mémoire de magister en électricité solaire de l'école Nationale Polytechnique El Harrach, ALGER, 2008.

[18] ABBASSEN Lyes, «*Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque*». Département d'Electrotechnique, université Mouloud MAMMERI, Tizi Ouzou mai, 2011.

[19] F. Bouchtouche cherfa «Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.

[20] E. Gholipour Shahraki, «*Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques*». Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.

[21] Filipov, A.f *«Differential equation with discontinuous right-hand side»* .Amer.MatSoc

.Trans 62p: 199-231, 1960.

[22] S. E. Evju «*Fundamentals of Grid Connected Photovoltaic Power ElectronicConverter Design*». Norwegian University of Science and Technology (NTNU) Department of Electric Engineering, January 2007.