

*République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
L'enseignement supérieur et de la recherche scientifique*



Université Abderrahmane Mira-Bejaia

Faculté de technologie

Département de Génie électrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme master en électronique

Spécialité : Instrumentation

Thème

Onduleur monophasé connecté au réseau pour les modules photovoltaïques

Réalisé par :

M^{elle} KHENTACHE Yamina

M^{elle} KHANOUCHE Sarah

Encadré par :

M. CHARIKH

Devant le jury composé de:

Mme. IDJDARENE

M. MOKRANI

Année universitaire :2019/2020

Dédicaces

On dédie ce modeste travail :

A nos chers parents que nous remercions énormément pour leurs aides et leurs patiences ;

A nos sœurs et frères qui nous souhaitent un avenir prospère ;

A nos familles sans exception ;

A nos enseignants ;

A toutes les personnes qui nous ont apporté de l'aide.

Remerciement

Avant tout, on remercie le Dieu tout puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier vivement Mr. CHARIKH pour nous avoir honorés par son encadrement, ses orientations, ses précieux conseils et ses encouragements qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

On remercie aussi les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Un énorme merci à nos familles et amis pour leurs éternel soutien et la confiance qu'ils ont en nos capacités.

Table des matières

Liste d'abréviations.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des tableaux.....	V
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Historique des onduleurs monophasé connectés au réseau	
I.1. Introduction	3
I.2. Définition d'un onduleur.....	3
I.3. Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau.....	3
I.4. Caractéristique des onduleurs compatible avec le réseau.....	4
I.5. Technologie des onduleurs pour les systèmes couplés au réseau.....	4
I.5.1. Les onduleurs centraux.....	4
I.5.2. Les onduleurs strings.....	5
I.5.3. Les onduleurs intégrés aux panneaux.....	6
I.5.4. Les onduleurs multi-strings.....	6
I.6. Problèmes de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau.....	7
I.6.1. Qualité de puissance fournie au réseau.....	7
I.6.2. Problèmes d'inslanding.....	7
I.7. Conditions techniques d'interconnexion	7
I.7.1. Raccordement	7
I.7.2. Jugement de conformité	8
I.7.3. Accord de raccordement	8
I.7.4. Dispositif de coupure	8
I.7.5. Dispositif de protection	9
I.7.6. Couplage	9
I.7.7. Harmonique et inter harmoniques	9
I.7.8. Protection contre l'injection de courant continu.....	9
I.8. Les défauts du réseau	10

I.8.1. Creux de tension	10
I.8.2. Surtensions	10
I.8.3. Variation et fluctuation de tension.....	10
I.8.4. Fluctuation de fréquence	10
I.9. Conclusion	11
CHAPITRE II : Onduleur monophasé alimenté par les modules photovoltaïques	
II.1. Introduction	12
II.2. La cellule photovoltaïque	12
II.3. Le module photovoltaïque	12
II.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	12
II.5. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	13
II.6. Influence de l'éclairement et de la température	15
II.6.1. Influence de l'éclairement	15
II.6.2. Influence de la température	17
II.7. Influence de l'association des modules photovoltaïques	19
II.7.1. Influence de l'association série des modules photovoltaïques	19
II.7.2. Influence de l'association parallèle des modules photovoltaïques	19
II.7.3. Influence de l'association mixte des modules photovoltaïques (série et parallèle)...	20
II.8. Concept technique des onduleurs PV	20
II.9. Principaux types d'onduleurs rencontrés	22
II.10. Conclusion	24
CHAPITRE III : Stratégie de commande	
III.1. Introduction	25
III.2. Le convertisseur DC-DC	25
III.2.1. Le convertisseur DC-DC survolteur (Boost)	25
III.2.2. Le convertisseur DC-DC dévolteur (Buck)	26
III.2.3. Le convertisseur DC-DC dévolteur -survolteur (Buck-Boost)	26

III.3. Commande des convertisseurs DC-DC (Méthodes de poursuite du point de puissance maximal)	27
III.3.1. Méthode avec contre réaction de tension	28
III.3.2. Méthode avec contre réaction de courant	29
III.3.3. Méthode avec contre réaction de puissance	29
III.4. La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	30
III.4.1. Caractéristique de la modulation MLI	31
III.4.2. Les différents types de la modulation MLI	31
III.4.2.1. Modulation d'échantillonnage naturelle bipolaire	31
III.4.2.2. Modulation d'échantillonnage naturelle unipolaire	32
III.4.2.3. MLI optimisé (calculée)	33
III.5. Conclusion	34

CHAPITRE IV : Simulation et interprétations des résultats

IV.1. Introduction	35
IV.2. Présentation du logiciel de simulation PSIM	35
IV.3. Caractéristique du module photovoltaïque SOLAREX MSX-60	35
IV.4. Simulation du module photovoltaïque	36
IV.5. Simulation du hacheur élévateur à contre réaction de puissance	37
IV.6. Simulation d'un onduleur monophasé	38
IV.6.1. Simulation d'un onduleur monophasé en pont	38
IV.6.2. Simulation d'un onduleur monophasé à commande MLI	40
IV.6.3. Influence de la fréquence de la porteuse de la commande MLI	41
IV.7. Simulation de notre système photovoltaïque	45
IV.8. Simulation de notre système photovoltaïque avec une batterie	46
IV.9. Influence de la variation de la charge	47
IV.9.1. Influence de l'éclairement	48
IV.9.2. Influence de la température	49
IV.9.3. Influence de la variation de la température et de l'éclairement	50
IV.10. Protection du système.....	50

IV.11. Connexion au réseau.....	52
IV.12. Conclusion	52
Conclusion générale	53
Bibliographie.....	54

Liste d'abréviations

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

DC/DC : Continu / Continu.

DC/AC : Continu /Alternatif.

P&O : Perturbation et Observation.

PPM : Maximum Power Point.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

MT/BT: Moyenne Tension/Basse Tension.

Ns : Nombre des cellules en série.

Np : Nombre des cellules en parallèle.

Liste des figures

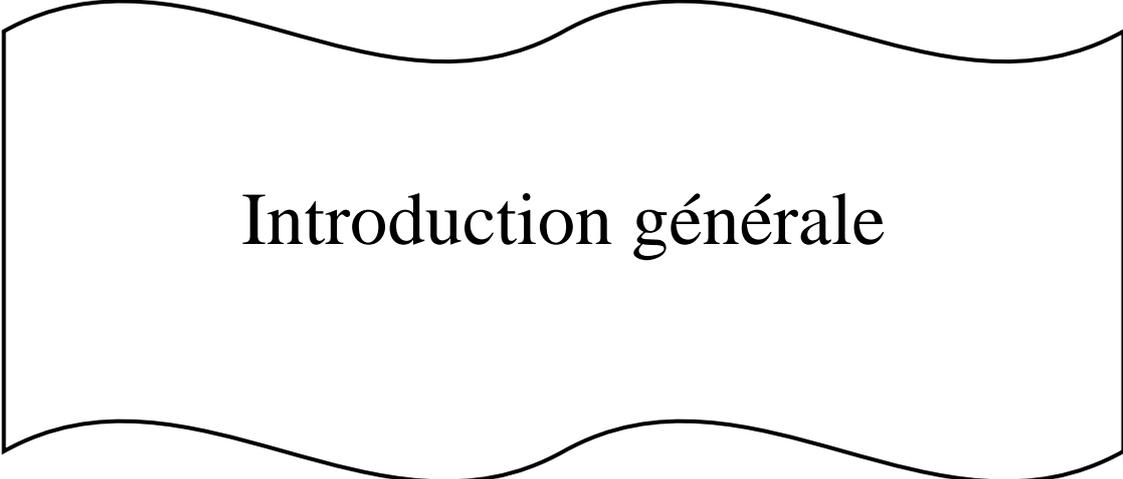
Figure I.1 : Circuit de puissance du système photovoltaïque connecté au réseau.....	4
Figure I.2 : Représentation schématique des onduleurs centraux.....	5
Figure I.3 : Représentation schématique des onduleurs strings.....	5
Figure I.4 : Représentation schématique des onduleurs intégrés au panneaux.....	6
Figure I.1 : Représentation schématique des onduleurs multi-string.....	6
Figure II.1 : Coupe d'une cellule PV.....	13
Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	14
Figure II.3 : Schéma de simulation à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$	15
Figure II.4 : La caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$	16
Figure II.5 : La caractéristique $P(V)$ d'un générateur PV à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$	16
Figure II.6 : Schéma de simulation à diverses températures à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	17
Figure II.7 : La caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV à diverses températures à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	18
Figure II.8 : La caractéristique $P(V)$ d'un générateur PV à diverses températures à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$	18
Figure II.9 : Association séries des modules photovoltaïques.....	19
Figure II.10 : Association parallèle des modules photovoltaïques.....	19
Figure II.11 : Association mixte des modules photovoltaïques.....	20
Figure II.12 : Caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV.....	21
Figure II.13 : Caractéristique $P(V)$ d'un générateur PV.....	21
Figure II.14 : Montage de base d'un onduleur PV.....	22
Figure II.15 : Onduleur PV avec convertisseur élévateur.....	23
Figure II.116 : Onduleur PV avec transformateur haute fréquence et redresseur.....	23
Figure II.17 : Onduleur PV avec transformateur basse fréquence 50Hz.....	23
Figure III.1 : Schéma synoptique d'un système PV raccordé au réseau.....	25
Figure III.2 : Circuit électrique du hacheur survolteur.....	26
Figure III.3 : Circuit électrique du hacheur dévolteur.....	26

Figure III.4 : Circuit électrique de hacheur dévolteur-survolteur.....	27
Figure III.5 : Caractéristique type d'un générateur photovoltaïque.....	28
Figure III.6 : Principe de la méthode avec contre réaction de tension.....	28
Figure III.7 : Principe de la méthode avec contre réaction de courant.....	29
Figure III.8 : Principe de la méthode avec contre réaction de puissance.....	29
Figure III.9 : Algorithme de la méthode avec contre réaction de puissance P&O.....	30
Figure III.10 : Schéma synoptique de la MLI.....	31
Figure III.11 : schéma synoptique de la MLI naturelle.....	32
Figure III.12 : Signaux de la modulation d'échantillonnage naturelle bipolaire.....	32
Figure III.13 : Signaux de la modulation d'échantillonnage naturelle unipolaire.....	33
Figure III.10 : Signal MLI calculé.....	33
Figure IV.1 : Simulation d'un module photovoltaïque.....	36
Figure IV.2 : Caractéristiques ($I_{pv} = f(V_{pv})$) et ($P_{pv} = f(V_{pv})$).....	37
Figure IV.3 : Simulation du hacheur élévateur avec la commande P&O.....	37
Figure IV.4 : Caractéristiques d'entrée V_e et de sortie V_{ch} du hacheur élévateur.....	38
Figure IV.5 : Simulation de l'onduleur monophasé en pont.....	38
Figure IV.6 : Allures de la tension et du courant au bornes d'une charge RL.....	39
Figure IV.7 : Spectre du courant pour une charge RL.....	39
Figure IV.8 : Simulation d'un onduleur monophasé MLI.....	40
Figure IV.9 : Résultats de la simulation d'un onduleur monophasé MLI.....	41
Figure IV.10 : Allure du courant pour une fréquence $f=1000\text{Hz}$	42
Figure IV.11 : Spectre du courant pour $f=1000\text{Hz}$	42
Figure IV.12: Allure du courant pour une fréquence $f=3000\text{Hz}$	43
Figure IV.13 : Spectre du courant pour $f=3000\text{Hz}$	43
Figure IV.14 : Allure du courant pour une fréquence $f=5000\text{Hz}$	44
Figure IV.15 : Spectre du courant pour $f=5000\text{Hz}$	44
Figure IV.16 : Paramètres du générateur photovoltaïque.....	45
Figure IV.17 : Montage de simulation de notre système photovoltaïque.....	45
Figure IV.18 : Montage de simulation de notre système photovoltaïque avec une batterie.....	46
Figure IV.19 : Allures du courant et de la tension au borne de la charge RL avec batterie.....	46

Figure IV.20 : Allures des tensions pour différentes valeurs de la charge.....	47
Figure IV.21 : Allures des courants pour différentes charges RL.....	48
Figure IV.22 : Allures des tensions pour différentes valeurs de l'éclairement G.....	49
Figure IV.23 : Allures des tensions pour différentes valeurs de la température T.....	49
Figure IV.24 : Allures des tensions pour différentes valeurs de la température T et de l'éclairement G.....	50
Figure IV.25 : Montage du système avec protection.....	51
Figure IV.26 : Allure du courant et de la tension pour différentes charges.....	51

Listes des tableaux

Tableau IV.1 : Caractéristiques d'un module photovoltaïque SOLAREX MSX-60.....	36
Tableau IV.2 : Résultats de la variation de la charge RL.....	47
Tableau IV.3 : Résultats de la variation de l'éclairement G.....	48
Tableau IV.4 : Résultats de la variation de la température T.....	49
Tableau IV.5 : Résultats de la variation de la température T et de l'éclairement G.....	50



Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des sources primaires fossiles (le pétrole, le gaz, ...etc.). L'utilisation de ces sources entraîne des émissions de gaz à effet de serre et par conséquent l'augmentation de la pollution d'où le danger sur l'environnement. En outre cette consommation exorbitante réduit les réserves de ce type d'énergie d'une façon néfaste pour les générations futures.

Vue que les sources d'énergie fossiles sont limitées, l'exploration des énergies renouvelables est d'une importance primordiale pour les années qui suivent. Ces dernières sont de plusieurs types à savoir: hydraulique, éolienne, photovoltaïque... Dans notre projet, on s'intéresse à l'énergie photovoltaïque.

Avantageusement le rayonnement solaire est reparti sur toute la surface de la terre, sa densité n'étant pas grande ce qui évite tout conflit entre les pays. Le problème réside dans la nature de cette énergie qui n'est pas directement exploitable. C'est pourquoi nous devons recourir à des procédés de conversion. La première étape est donc de convertir l'énergie lumineuse du soleil en une énergie électrique. Cette conversion se fait à l'aide d'un système photovoltaïque qui se compose d'un ensemble de modules photovoltaïques et de composants qui adapte l'électricité produite par ces modules aux spécifications des récepteurs. La tension fournit par les modules solaires est continue, nous devons avoir recours a des convertisseurs afin de la transformé pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative.

Dans ce mémoire on s'intéresse à l'onduleur qui est un élément important dans la conversion de l'énergie électrique continue produite en une énergie alternative qui sera utilisée directement où injectée dans le réseau.

Notre rapport se divise en quatre chapitres. L'objectif du premier chapitre est de présenter un aperçu sur l'historique des onduleurs monophasés connectés aux réseau, les différentes topologies, et les problèmes d'interconnexion rencontrés.

Le deuxième chapitre présente une étude sur le fonctionnement des modules photovoltaïques qui servent d'alimentation aux onduleurs monophasés.

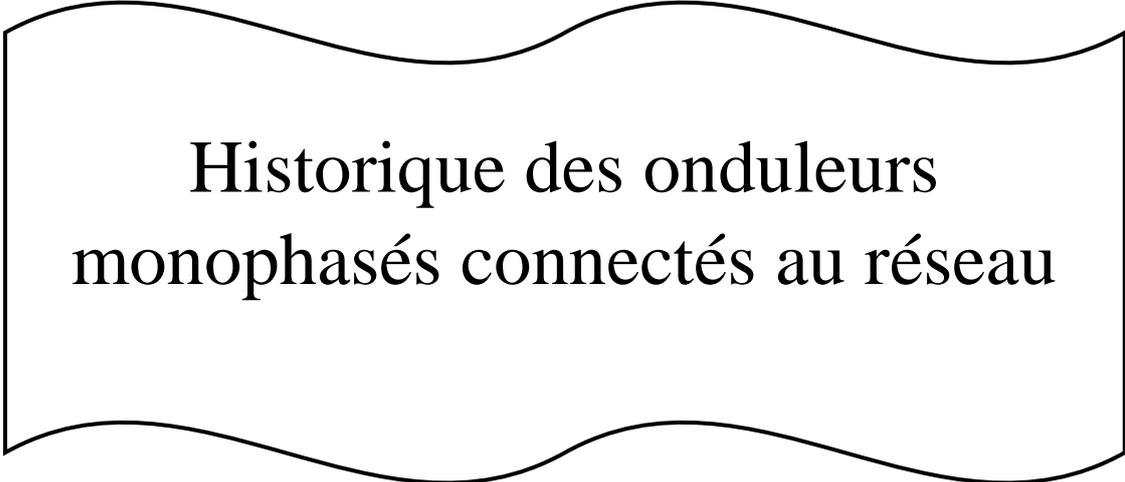
Le troisième chapitre décrit la stratégie de commande des convertisseurs DC-DC et DC-AC constituant les systèmes photovoltaïques connectés au réseau. Ce chapitre inclut également

des sections sur des techniques de commande de ces convertisseurs comme l'algorithme P&O, et la modulation de largeur d'impulsion dite MLI.

Le quatrième chapitre, sera consacré à la simulation sur le logiciel PSIM, d'un système photovoltaïque connecté au réseau. Ce chapitre inclut également les résultats de simulation obtenus.

Enfin nous clorons cette étude par une conclusion générale qui résume les travaux réalisés et des perspectives.

Chapitre I



Historique des onduleurs monophasés connectés au réseau

CHAPITRE I : Historique des onduleurs monophasés connectés au réseau

I.1. Introduction

Dans un système photovoltaïque relié au réseau, l'onduleur constitue véritablement l'élément essentiel et principal. Il permet de convertir une tension continue en une tension alternative, et assure en même temps un point de fonctionnement optimal au champs de modules, et constitue une interface totalement compatible avec le réseau.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'historique des onduleurs monophasés connectés aux réseau, ainsi que les différentes topologies, problèmes produits, et conditions techniques d'interconnexion.

I.2. Définition d'un onduleur

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue.

Ils sont utilisés pour :

- Soit fournir une tension ou courant alternatif de fréquence et d'amplitude variable.
- Soit fournir une tension alternative de fréquence et d'amplitude fixe.

On distingue des onduleurs de tension et des onduleurs de courant, et cela dépend de la source d'entrée continue.

I.3. Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau

La figure (I.1) représente la configuration d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique de distribution. Le générateur photovoltaïque est relié à un convertisseur DC-DC qui assure le suivi du point de fonctionnement optimal (PPM). L'ensemble est connecté au réseau électrique, par l'intermédiaire d'un convertisseur DC-AC commandé par une stratégie qui permet de synchroniser la source photovoltaïque avec le réseau.

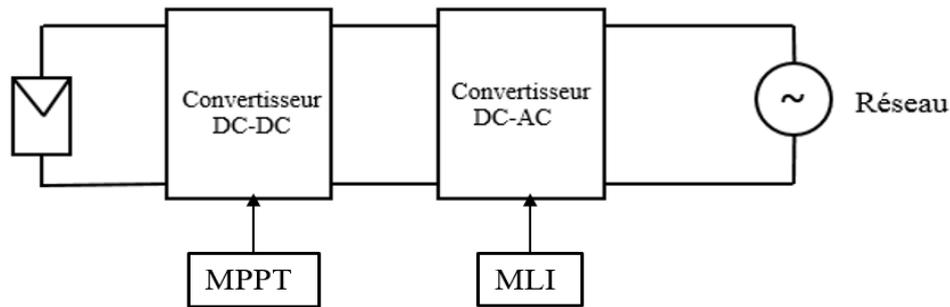


Figure I.1 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

I.4. Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau

L'onduleur connecté au réseau est un convertisseur de puissance permettant de convertir la tension continue créée par les modules photovoltaïques en une tension alternative pour l'injection dans le réseau, il permet d'adapter sa tension à la fréquence et à la tension du réseau. Cet onduleur doit être capable de supporter la puissance maximale délivrée par les modules photovoltaïques.

Parmi les critères de compatibilité de l'onduleur avec le réseau [1] :

- Temps de réponse.
- Facteur de puissance.
- Commande de fréquence.
- Synchronisation.
- Protection.

I.5. Technologies des onduleurs pour les systèmes couplés au réseau

Il existe de différentes technologies et topologies disponibles pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau qui sont classées en fonction de la valeur de puissance.

Dans les applications de centrales PV, divers concepts technologiques sont utilisés pour connecter le GPV au réseau [2].

Parmi ces topologies :

I.5.1. Les onduleurs centraux

Le générateur PV est constitué par des panneaux solaires reliés entre eux pour former une chaîne, chaque chaîne est couplée en parallèle avec d'autres chaînes via des diodes anti-retours. Le générateur ainsi constitué, généralement de forte puissance est relié du côté continu à un seul onduleur.

La fonction principale est de transformer la tension continue créé par les modules PV en tension alternative. Toute l'installation dépend d'un seul onduleur, une panne de l'onduleur central entraine l'arrêt de l'installation et donc de la production en général.

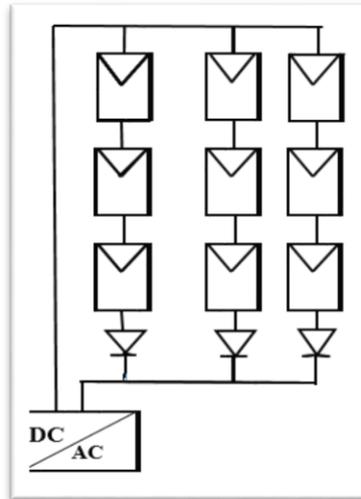


Figure I.2 : Représentation schématique des onduleurs centraux.

I.5.2. Les onduleurs strings

L'onduleur string est constitué d'un ensemble de panneaux PV reliés entre eux pour former une chaîne.

Chaque string est relié à son propre onduleur, qui fonctionne avec son propre point de puissance maximal PPM. La technique string minimise le risque de problème d'adaptation. L'avantage de cette architecture est qu'une panne d'un onduleur string n'affecte pas la production générale de l'installation.

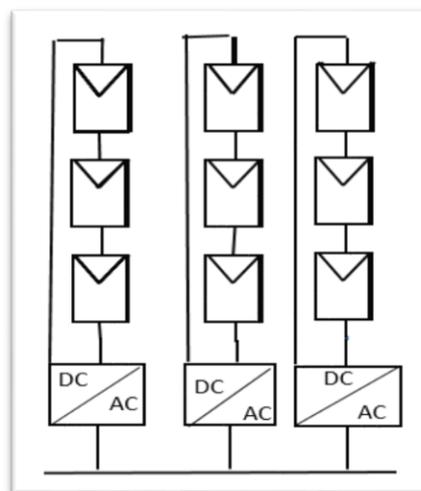


Figure I.3 : Représentation schématique des onduleurs strings.

I.5.3. Les onduleurs intégrés aux panneaux

Dans les onduleurs intégrés aux panneaux, chaque panneau dispose de son propre onduleur et chaque panneau fonctionne à son propre PPM.

Le problème de cette installation est que chaque panneau doit être relié au réseau, ce qui nécessite plus de câblages. Cet onduleur ne s'applique que dans les installations d'une puissance allant de 50W à 400W.

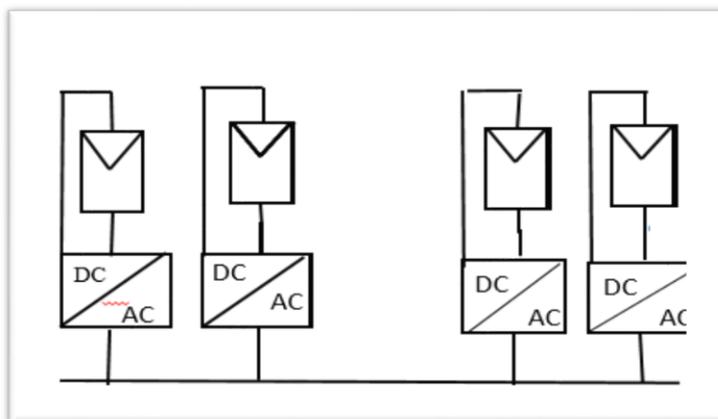


Figure I.4 : Représentation schématique des onduleurs intégrés aux panneaux.

I.5.4. Les onduleurs multi-strings

Cette architecture est la plus utilisée dans les systèmes PV raccordés au réseau, on la trouve dans les installations photovoltaïques d'une plage de puissance allant de 3 à 10 KW.

Cette conversion est basée sur les convertisseurs DC-DC connectés à un onduleur, chaque convertisseur DC-DC dispose de sa propre commande MPPT permettant à chaque chaîne de fonctionner à son PPM. Avec cette structure, le fonctionnement de l'ensemble du champ ne sera pas affecté par le dysfonctionnement d'un seul GPV.

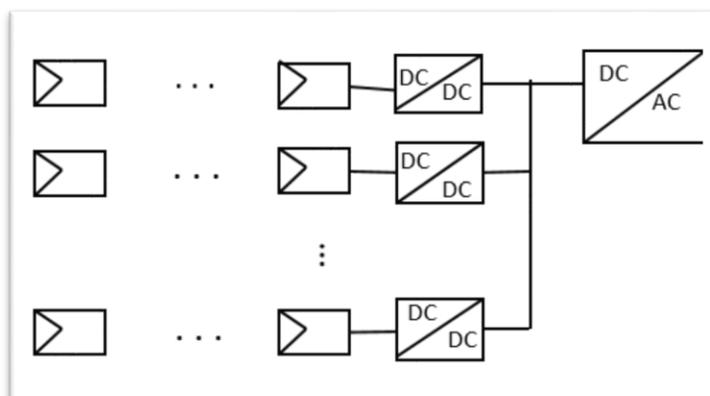


Figure I.5 : Représentation schématique des onduleurs multi-strings.

I.6. Problèmes de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau [3] [4]

Les problèmes d'interconnexion du système photovoltaïque au réseau incluraient :

- Débrochage du système photovoltaïque si le réseau présente une défaillance (Problème d'islanding).
- Protection contre la foudre.
- Qualité de puissance fournie au réseau.
- Effets des systèmes multiples sur une partie du réseau, en particulier non équilibré.
- Dosage fiable des flux de puissance.
- Risques techniques et financiers.

Voici quelques détails au sujet de ces problèmes :

I.6.1. Qualité de puissance fournie au réseau

Beaucoup de normes imposent plusieurs règles pour assurer une haute qualité de puissance injectée au réseau. Par exemple, elle impose que ces systèmes photovoltaïques devraient fournir une tension compatible (forme et fréquence) avec celle du réseau électrique [5].

I.6.2. Problèmes d'Islanding

Le phénomène d'islanding est le fonctionnement du système PV en absence du réseau. Ce phénomène a pu causer des surintensités passagères quand la puissance du réseau est perturbée. Des circuits de commande de protection sont développés et constamment mis à jour pour protéger le réseau et le système photovoltaïque contre ce problème et d'autres problèmes tels que les courts circuits et foudre [5].

I.7. Conditions techniques d'interconnexion [3] [4]

Les conditions techniques d'interconnexion au réseau électrique sont :

I.7.1. Raccordement

En fonction de la puissance à raccorder, des caractéristiques du réseau sur lequel elle est appelée à être raccordée et du maintien d'une qualité de tension dans les limites fixées par des normes, le gestionnaire du réseau établit les dispositions du raccordement. Le réseau qui doit assurer le transit de la production décentralisée est soumis à plusieurs contraintes. Il doit pouvoir maintenir le plan de tension dans les limites d'exploitation avec et sans la présence de la production décentralisée.

Dans un réseau BT la puissance totale des productions décentralisées ne doit pas dépasser la puissance du transformateur MT/BT. De plus le transit de la puissance doit se faire sans excéder la capacité des éléments du réseau. Enfin le supplément de puissance de court-circuit cumulé à la valeur de la puissance de court-circuit du réseau doit être compatible avec le niveau réel du matériel. En conséquence, le raccordement peut nécessiter des renforcements du réseau et de ce fait, une participation financière du producteur décentralisé dans ces renforcements peut être demandée.

Sur la base de ces critères, le gestionnaire du réseau fixe le mode de raccordement de l'installation de production au réseau de distribution. Chaque cas fait l'objet d'un examen particulier qui tient compte des conditions réelles rencontrées.

I.7.2. Jugement de conformité

Le producteur est tenu de soumettre un rapport de contrôle rédigé à ses frais par un organisme agréé qui démontre la conformité de l'installation au règlement général des installations électriques. En outre, le gestionnaire du réseau contrôle avant le raccordement de l'installation du producteur décentralisé en ce qui concerne les aspects particuliers de l'installation de fourniture d'énergie. Ceci inclut entre autre le schéma de raccordement, le fonctionnement de l'appareil de découplage, le réglage et le fonctionnement de l'ensemble constituant les protections particulières, le dispositif de mise en parallèle, l'éventuelle protection contre l'injection de courant continu.

I.7.3. Accord de raccordement

L'installation de production décentralisée ne peut être raccordée au réseau de distribution qu'après accord écrit du gestionnaire du réseau. Cet accord est également nécessaire au cas où le producteur décentralisé envisage une modification de son installation de production, notamment s'il modifie la puissance concernée.

I.7.4. Dispositif de coupure

Lors de travaux hors tension sur le branchement ou sur le réseau de distribution, l'installation de production décentralisée doit pouvoir être séparée du réseau par un dispositif de coupure de sécurité. La coupure de sécurité doit être visible, verrouillable et accessible en permanence au gestionnaire du réseau. Ces dispositifs sont de type agréé par ce dernier.

I.7.5. Dispositif de protection

Comme pour tout autre raccordement au réseau de distribution, les installations sont munies en tête de leur raccordement au réseau de distribution d'un appareil assurant la coupure des phases en cas de défaut interne occasionnant le dépassement d'un courant fixé pendant un temps donné. Les valeurs du courant et de la temporisation sont données par le gestionnaire du réseau. Les systèmes de protection doivent constituer un minimum de techniques. Dans certaines configurations, des déclenchements intempestifs peuvent se produire. Ces déclenchements qui n'entament pas l'aspect sécurité tel que défini dans le domaine d'application, pourraient gêner les conditions d'exploitation. Il pourrait donc s'avérer utile de faire usage, soit d'une protection par asservissement, soit d'ajouter d'autres fonctionnalités à la chaîne de relais prévu ou d'en modifier certaines. Les variantes sont autorisées dans la mesure où elles remplissent les fonctions des relais qu'elles remplacent.

I.7.6. Couplage

Une mise en parallèle de l'installation de production décentralisée avec le réseau public de distribution est toujours réalisée moyennant d'un relais synchro-check équipé d'un Synchronoscope. Ce dispositif est de type agréé par le gestionnaire du réseau.

Lors de la prise de parallèle, la tension, la fréquence, et l'écart de phase, sont tels qu'ils ne provoquent pas de variations brusques relatives de la tension supérieures à 6 %.

I.7.7. Harmoniques et inter harmoniques

Le niveau des harmoniques et inter harmoniques qui sont générés par l'installation de production décentralisée ne peut pas provoquer de perturbation dans le réseau de distribution. L'impact de l'installation sur le réseau (pour le changement de période tarifaire, pour l'éclairage public...) doit également rester à des niveaux de perturbation acceptables. Dans la plupart des cas, le niveau de perturbation de la production décentralisée s'ajoute aux niveaux de perturbation déjà existant par la présence des utilisateurs et des autres producteurs. C'est pourquoi des mesures doivent être étudiées et appliquées au niveau de la production décentralisée de manière à ce que tout reste compatible avec un niveau de signal acceptable.

I.7.8. Protection contre l'injection de courant continu

Les onduleurs, qui sont équipés d'un transformateur, n'injectent pas de courant continu dans le réseau de distribution, et par conséquent, ils ne nécessitent pas de mesures de sécurité complémentaires. Les onduleurs avec une technologie sans transformateur, sont également acceptés, pour autant qu'ils soient certifiés ne jamais injecter un courant continu

supérieur à 1% du courant nominal ou qu'ils disposent d'un système de protection contre l'injection de courant continu. Ce système débranche l'onduleur en moins de 0,2s au cas où le courant continu dépasse la valeur de seuil établie à 1% du courant nominal.

I.8. Les défauts du réseau

I.8.1. Creux de tension

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise entre 10% et 90% d'une tension de référence, suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

I.8.2. Surtensions

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension.

Il existe différents types de surtension :

- Surtension de manœuvre.
- Surtension de foudre.
- Surtension temporaire.

I.8.3. Variation et fluctuation de la tension

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10% de la tension nominale, et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension, ou des variations cyclique ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension, dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude [6].

I.8.4. Fluctuation de fréquence

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome [6].

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté notre système connecté au réseau pour les installations photovoltaïques, qui permettent de transformer la tension continue produite par les modules PV en une tension ondulée conforme à celle du réseau.

L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de l'énergie électrique, tout en prenant compte des conditions d'interconnexion et des défauts du réseau.

Onduleur monophasé
alimenté par les modules
photovoltaïques

CHAPITRE II : Onduleur monophasé alimenté par les modules photovoltaïques

II.1. Introduction

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue.

Il est utilisé pour fournir une tension ou courant alternatif de fréquence et amplitude variables, ou bien pour fournir une tension alternative de fréquence et d'amplitude fixe.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance.

Ce chapitre contribue à étudier un système photovoltaïque composé d'un onduleur monophasé alimenté par des modules photovoltaïques (ensemble de cellules photovoltaïques).

II.2. La cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

II.3. Le module photovoltaïque

Un module PV est un ensemble de cellules PV interconnectées et complètement protégées contre les facteurs extérieurs (l'humidité, la pluie, la poussière, la neige). Généralement il contient également des protections pour protéger les cellules PV d'un fonctionnement qui peut être destructif. Les connexions peuvent être réalisées en parallèle ou en série [7].

II.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule PV est basé sur un phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. La Figure II.1 illustre la coupe d'une cellule PV.

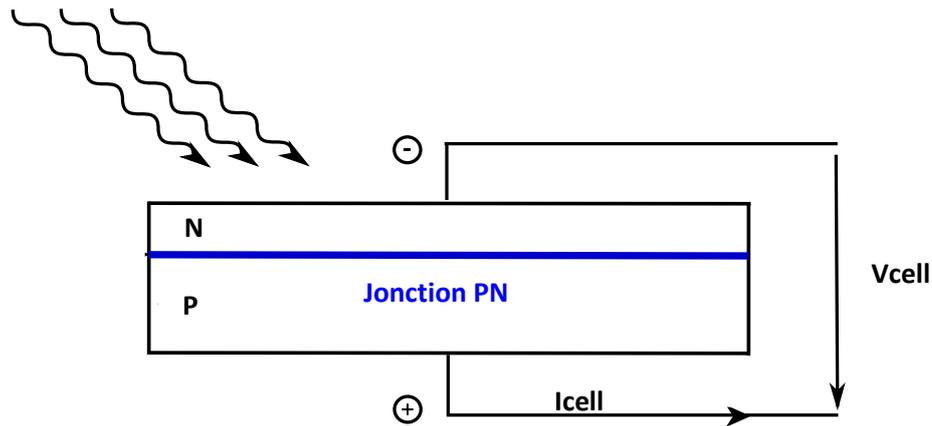


Figure II.1 : Coupe d'une cellule PV.

Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [8] :

- 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 paires d'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 [9].

II.5. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La modélisation d'une cellule photovoltaïque nous permet d'étudier son comportement, ce qui conduira à connaître les caractéristiques du panneau solaire complet. Nous pouvons modéliser le comportement d'une cellule selon le schéma électrique de la figure II.2.

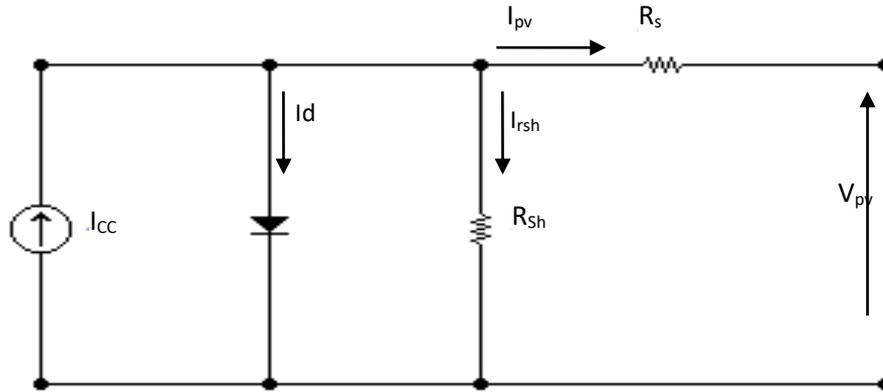


Figure II.2 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Les résistances R_s et R_{sh} représentent les résistances parasites. Elles tiennent compte des pertes de fabrication, des résistances de connexion électrique, de la résistance du semi-conducteur et des grilles collectrices. En fixant les bons paramètres de simulation, nous pouvons alors reproduire le comportement d'un panneau, comportant plusieurs cellules, avec les caractéristiques voulues. Nous pouvons, à partir de cette modélisation, en déduire les équations électriques d'une cellule. Ses grandeurs peuvent se mettre en équation selon l'expression (II.1), ce qui nous donne la caractéristique courant-tension de la cellule [9]:

$$I_{PV} = I_{CC} - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V_{PV} + R_s I_{PV})}{nkT} \right) - 1 \right) - \frac{V_{PV} + (R_s I_{PV})}{R_{sh}} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- V_{pv} , I_{pv} : tension en Volt (V) et courant en Ampère (A) de sortie du panneau photovoltaïque.
- I_0 : courant de saturation de la diode en Ampère (A).
- I_{cc} : photo-courant qui dépend de l'éclairage et de la température en Ampère (A).
- n : facteur de qualité de la diode, entre 1 et 2, sans dimension.
- q : charge électrique d'un électron ($q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$).
- k : constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$).
- T : température de fonctionnement de la cellule en Kelvin (K).
- R_s : résistance représentant les pertes par effet Joule et les résistances de connexion en Ohm (Ω).
- R_{sh} : résistance caractérisant les pertes dues aux défauts structuraux du matériau en Ohm (Ω).

II.6. Influence de l'éclairement et de la température

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température.

II.6.1. L'influence de l'éclairement

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de la diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire I_{cs} proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{co} et donc un décalage du point P_{max} du panneau solaire vers les puissances inférieures [10].

Les figures suivantes représentent le schéma de la simulation sous PSIM et les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ respectivement d'un générateur photovoltaïque SOLAREX MSX-60 (dont la puissance maximale est de 60W) pour une température constante ($T=25^{\circ}C$) et un ensoleillement variable.

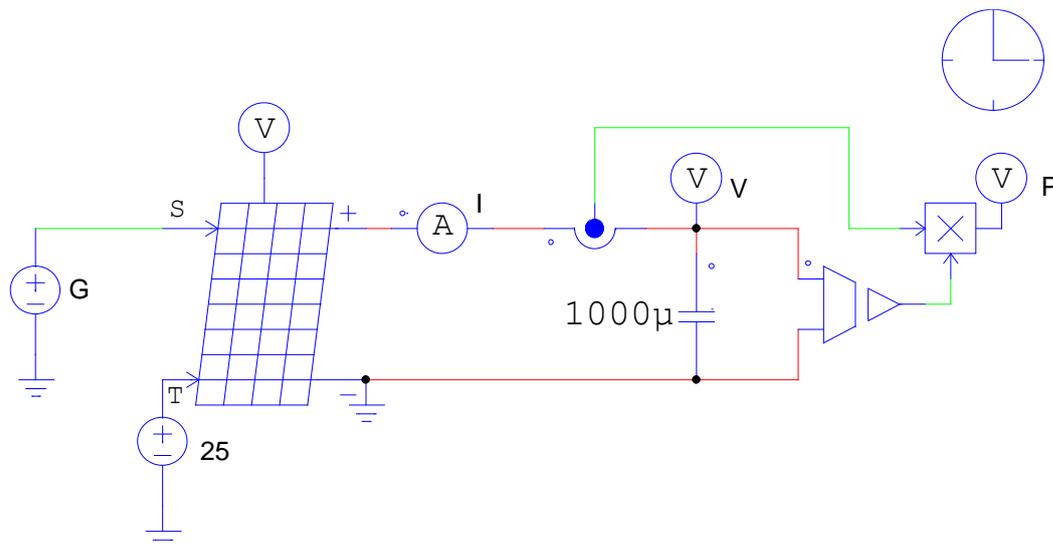


Figure II.3: Schéma de simulation à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}C$.

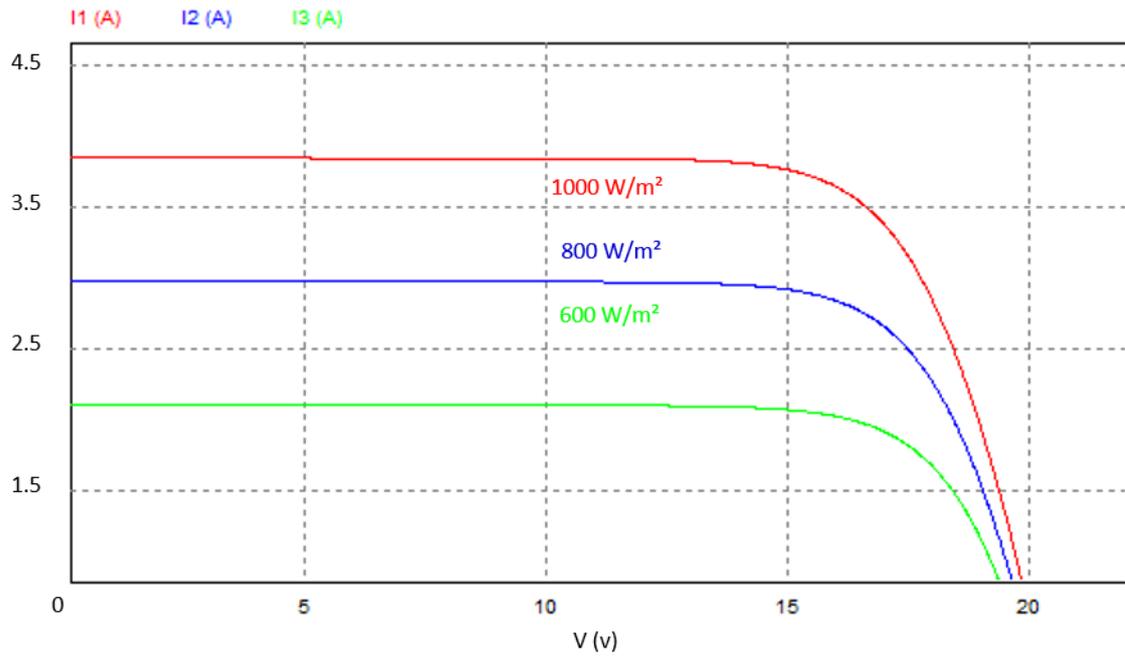


Figure II.4 : La caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$.

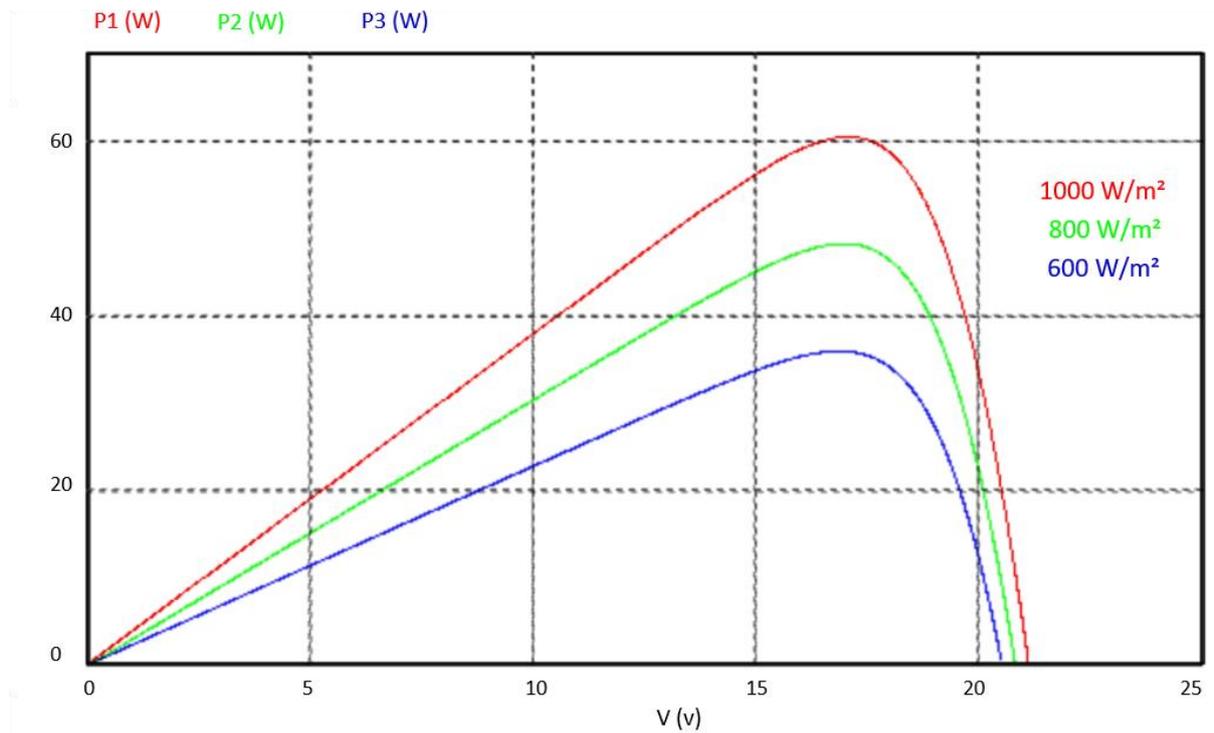


Figure II.5 : La caractéristique $P(V)$ d'un générateur PV à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$.

D'après ces caractéristiques, il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement.

Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

II.6.2. L'influence de la température

La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. Les figures suivantes représentent le schéma de la simulation sous PSIM et les caractéristiques I(V) et P(V) respectivement d'un générateur photovoltaïque SOLAREX MSX-60 pour un ensoleillement constant ($G=1000 \text{ W/m}^2$) et une température variable.

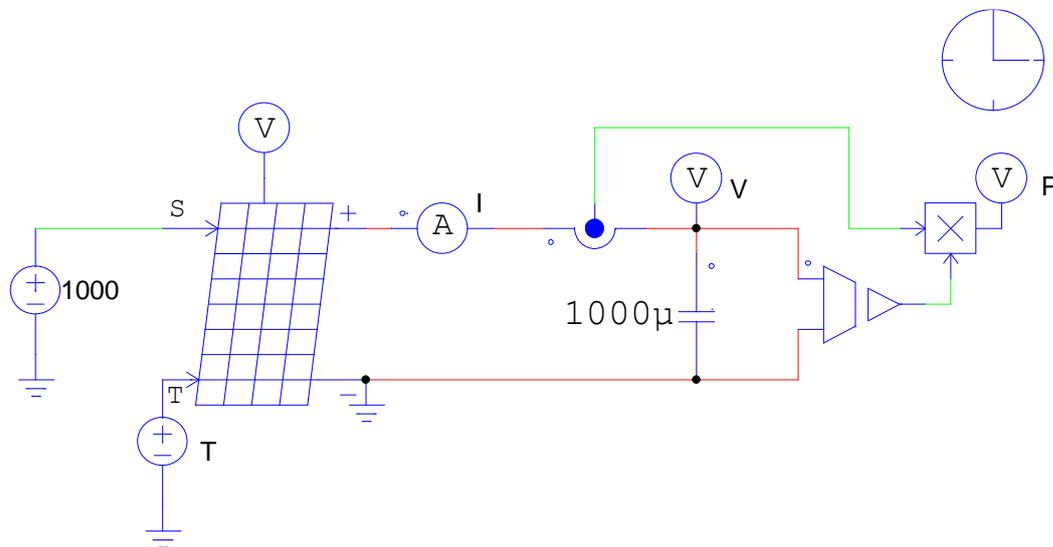


Figure II.6 : Schéma de simulation à diverses températures à $G=1000 \text{ W/m}^2$.

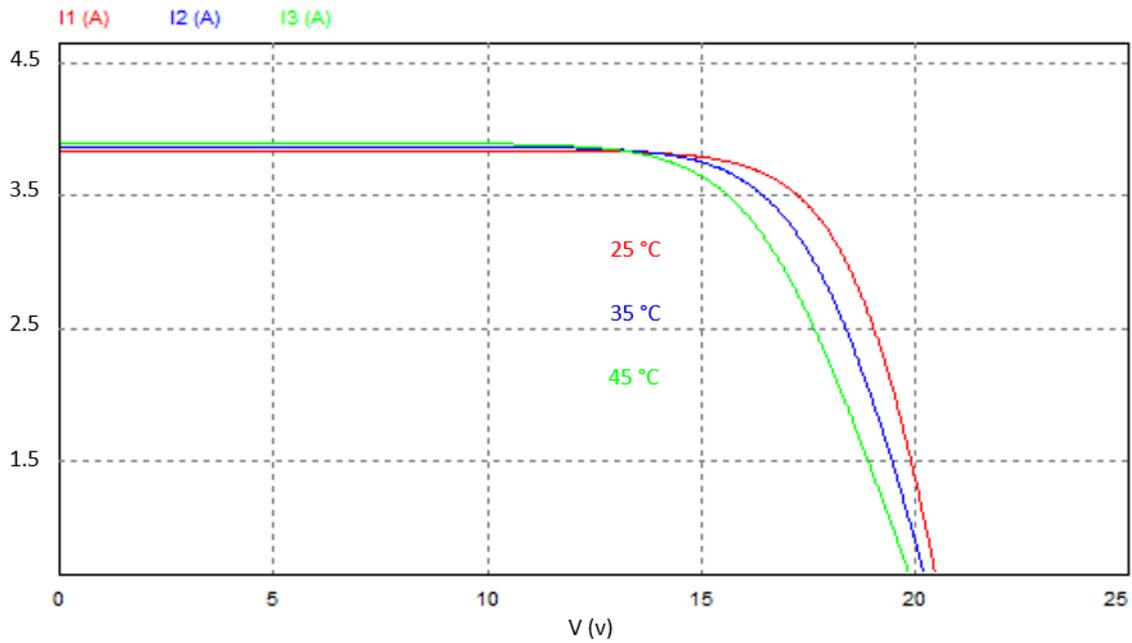


Figure II.7 : La caractéristique I(V) d'un générateur PV à diverses températures à $G=1000 \text{ W/m}^2$.

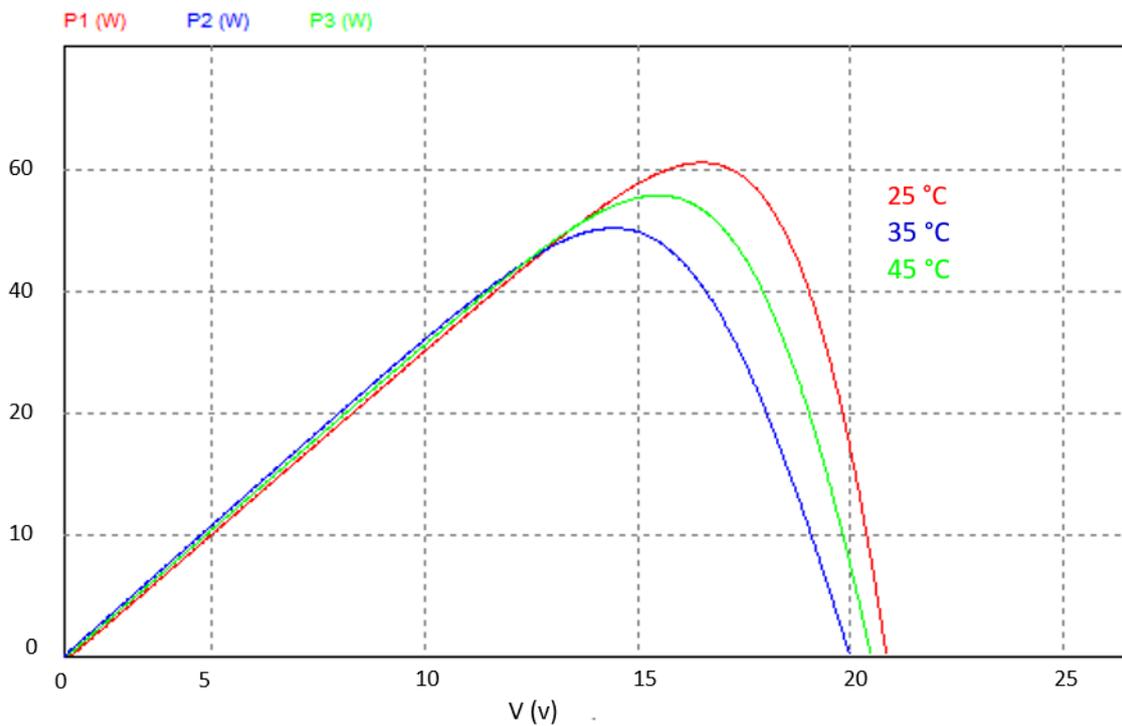


Figure II.8 : La caractéristique P(V) d'un générateur PV à diverses températures à $G=1000 \text{ W/m}^2$.

Interprétations :

On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue.

La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

II.7. Influence de l'association des modules photovoltaïques

II.7.1. Influence de l'association série des modules photovoltaïques

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant, et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

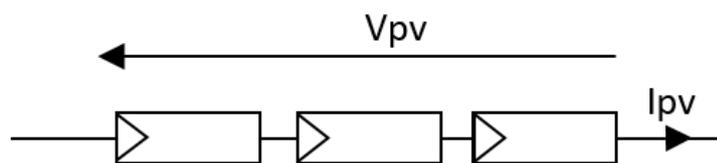


Figure II.9 : Association séries des modules photovoltaïques.

La puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{PV} = (N_s * V_{PV}) * I_{PV} \quad (II.2)$$

Avec :

- N_s : Nombre de cellules en série.

II.7.2. Influence de l'association parallèle des modules photovoltaïques

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

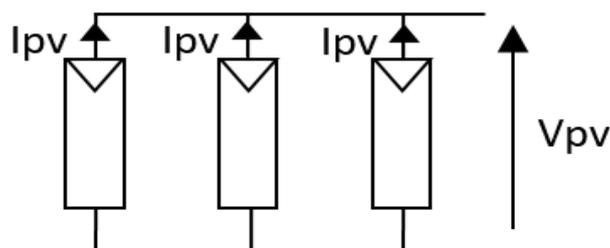


Figure II.10 : Association parallèle des modules photovoltaïques.

La puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{PV} = V_{PV} * (N_P * I_{PV}) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

- N_P : Nombre de cellules en parallèle.

II.7.3. Influence de l'association mixte des modules photovoltaïques (série et parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle.

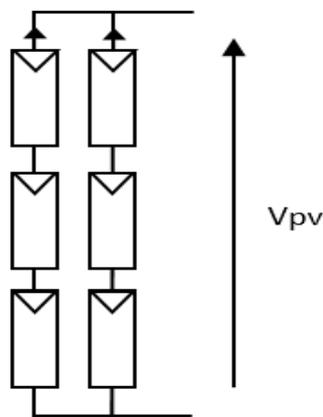


Figure II.11 : Association mixte des modules photovoltaïques.

La puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{PV} = (N_S * V_{PV}) * (N_P * I_{PV}) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- N_P : Nombre de cellules en parallèle.
- N_S : Nombre de cellules en série.

II.8. Concept technique des onduleurs PV

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion est le même. La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système. En effet, le générateur PV a une courbe caractéristique I(V) non linéaire.

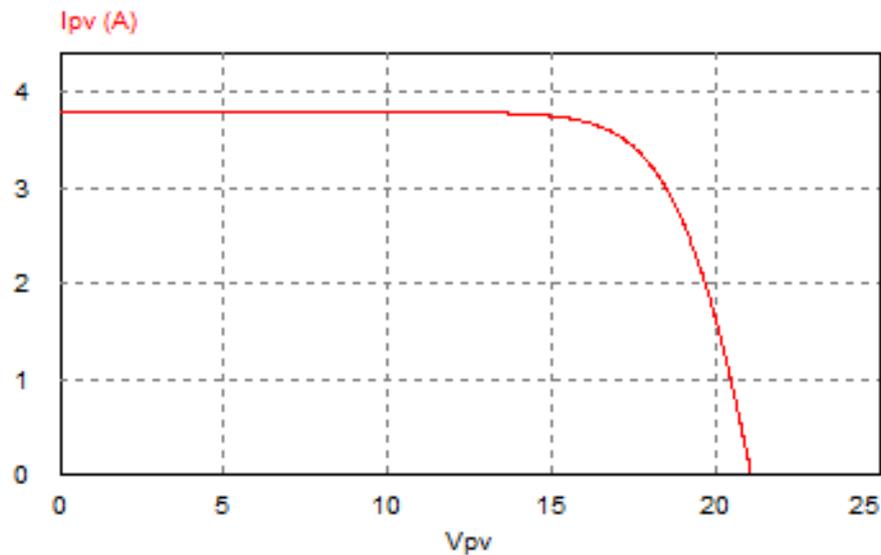


Figure II.12 : Caractéristique I(V) d'un générateur PV.

Le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de la courbe P(V) où la puissance est maximisée. Il se situe au sommet de la caractéristique P(V).

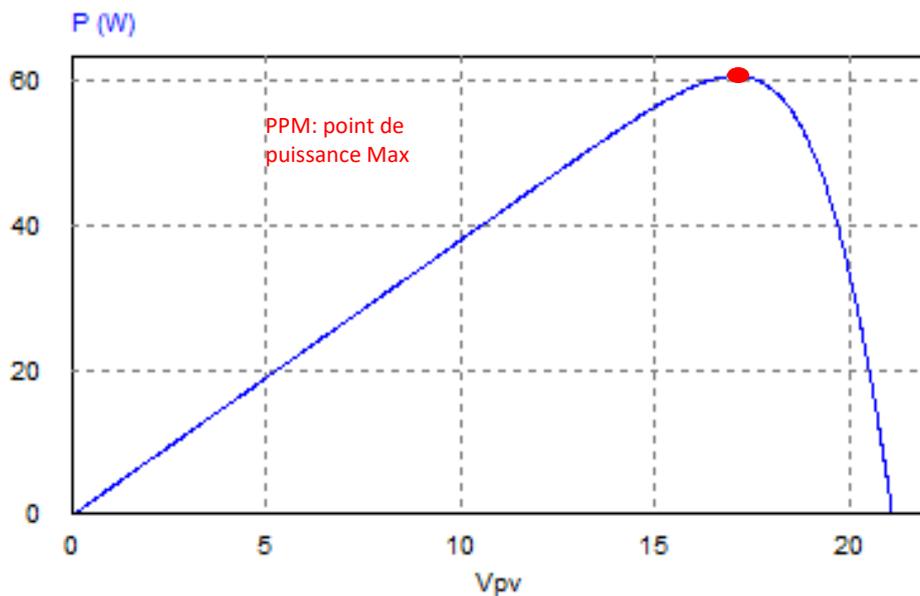


Figure II.13 : Caractéristique P(V) d'un générateur PV.

La fonction principale d'un onduleur est de créer une tension alternative afin de l'injecter au réseau à partir d'une tension continue délivrée par le générateur PV. La pièce centrale d'un onduleur est fréquemment constituée d'un pont à semi-conducteurs permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'un interrupteur électronique.

Ce pont, qui commute selon la cadence de la fréquence du réseau, permet d'alimenter

le réseau en courant alternatif. Cependant, il s'agirait d'un courant rectangulaire qui est incompatible avec celui du réseau qui est sinusoïdal.

On place alors à la sortie de l'onduleur et la phase du réseau une inductance qui joue le rôle de filtre, et permet à l'onduleur de fournir au réseau un courant quasi sinusoïdal.

Pour les onduleurs PV, le condensateur d'entrée est très important. Il a la fonction d'un accumulateur d'énergie et assure un écoulement continu et homogène du courant du générateur vers le réseau. Le générateur PV ne peut être réglé sur un point de travail stable qu'avec un condensateur d'entrée de taille suffisante afin de supporter les courants de retours.

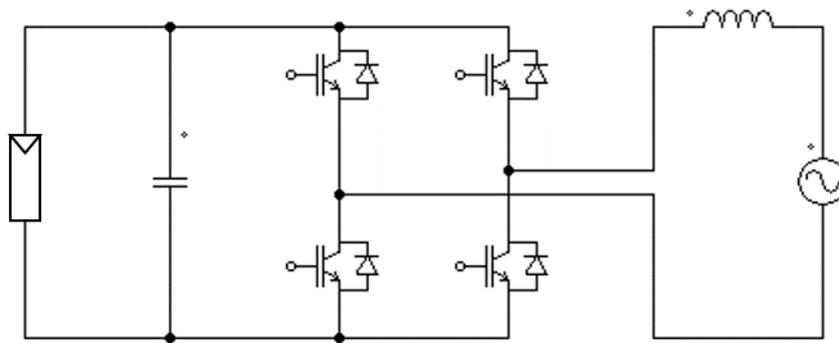


Figure II.14 : Montage de base d'un onduleur PV.

II.9. Principaux types d'onduleurs rencontrés

Les onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT.

Dans le cas standard, par un jeu de commutation commandée de manière appropriée, le plus souvent par MLI, l'énergie électrique continue fournie est modulée afin d'obtenir un signal alternatif à la fréquence du réseau comme le montre la figure II.14.

Pour travailler sur une gamme de tension d'entrée plus large, un convertisseur élévateur peut être rajouté en entrée du pont afin d'élever la tension d'entrée comme le montre la figure II.15.

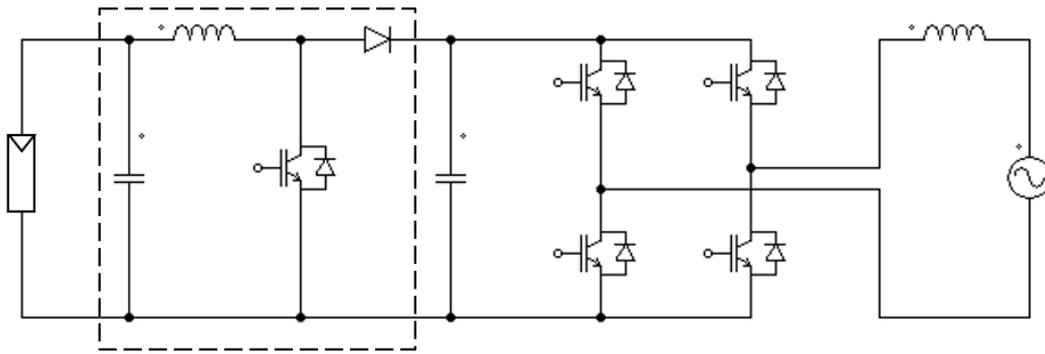


Figure II.15 : Onduleur PV avec convertisseur élévateur.

Le montage de la figure II.16 est composé d'un transformateur haute fréquence qui adapte la tension d'entrée tout en réduisant le poids de l'onduleur. À sa sortie, le signal est alternatif. Un redresseur permet alors de le convertir en continu. Le pont de sortie permet par modulation de largeur d'impulsion de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

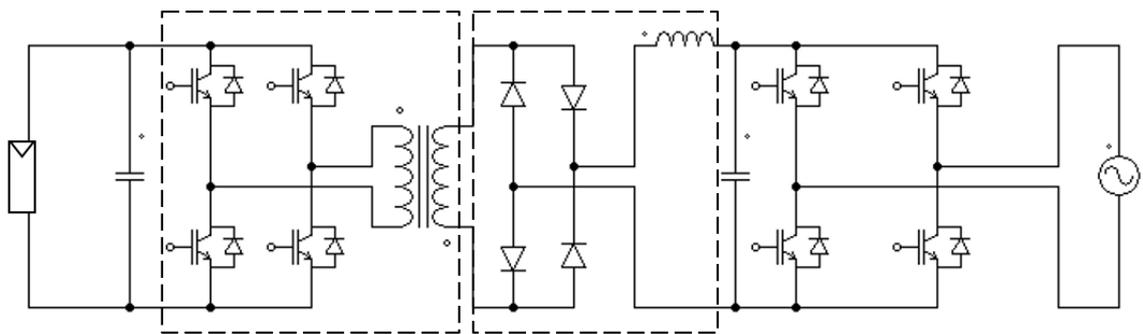


Figure II.16 : Onduleur PV avec transformateur haute fréquence et redresseur.

Le montage de la figure II.17 est composé d'un transformateur basse fréquence 50 Hz servant à augmenter la tension de l'onduleur jusqu'au niveau de celle du réseau 220 V, et assure une isolation galvanique entre le générateur photovoltaïque et le réseau.

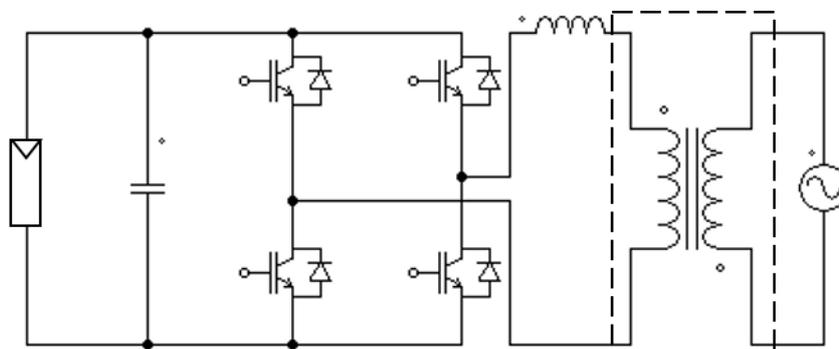


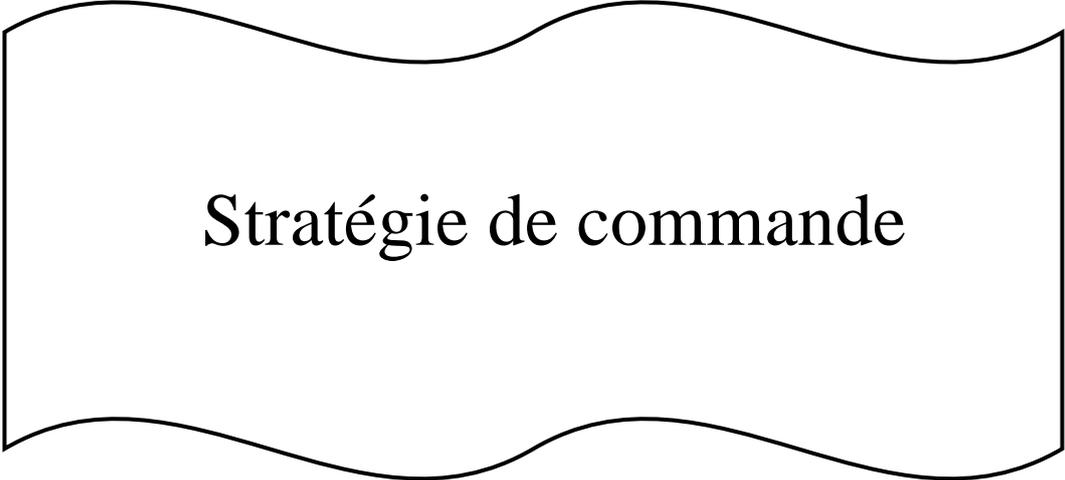
Figure II.17 : Onduleur PV avec transformateur basse fréquence 50 Hz.

II.10. Conclusion

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, le générateur PV, l'influence de la variation de ses paramètres (la température et l'éclairement), et ses différentes topologies d'association. On a ensuite abordé le concept technique des onduleurs PV et les principaux types rencontrés.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude sur la stratégie de commande des onduleurs PV, les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

Chapitre III



Stratégie de commande

CHAPITRE III : Stratégie de commande d'un système photovoltaïque

III.1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques ont besoin de convertisseurs DC-DC et DC-AC. Le raccordement des convertisseurs avec le réseau de distribution est fait à l'aide des filtres passifs afin d'atténuer les harmoniques.

Dans ce chapitre nous allons aborder les différentes structures des convertisseurs DC-DC et leurs multiples commandes. Et la commande MLI pour les convertisseurs DC-AC. Ces deux types de convertisseurs sont essentielles pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque qui se présente dans la figure III.1.

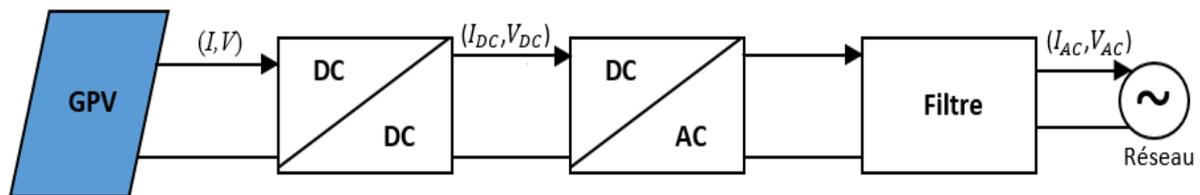


Figure III.1: Schéma synoptique d'un système PV raccordé au réseau.

III.2. Le convertisseur DC-DC

Le convertisseur DC-DC est utilisé pour produire une onde continue sur le bus DC, ainsi que d'élever le niveau de tension du module PV afin d'alimenter l'onduleur et de l'utiliser de manière optimale. Ce dernier peut avoir plusieurs topologies différentes. Les convertisseurs de type Boost ou Buck/Boost sont généralement les plus utilisés pour notre application, car ils présentent un haut rendement aux valeurs de puissances considérées.

III.2.1. Le convertisseur DC-DC survolteur (Boost)

Le circuit électrique du convertisseur survolteur est illustré à la Figure (III.2), nous supposons que les semi-conducteurs sont idéaux. Cela permet que l'état de conduction et de blocage soit activé instantanément.

Dans ce cas, le convertisseur présente le comportement suivant: lorsque l'IGBT TR est à l'état ON, La diode D est inversement polarisée. En conséquence, il n'y a pas de connexion entre la source de tension E et la charge du système R [11].

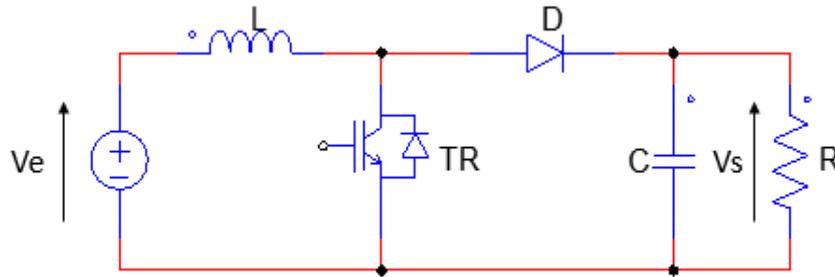


Figure III.2 : Circuit électrique du hacheur survolteur.

III.2.2. Le convertisseur DC-DC dévolteur (Buck)

Le convertisseur dévolteur appelé aussi hacheur série, a le rôle de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure [5]. Le cycle de fonctionnement de période T , comporte deux étapes :

- De 0 à αT , l'IGBT (TR) est passant, la diode (D) est polarisée en inverse donc elle est bloquée, l'inductance (L) se charge.
- De αT à T , l'IGBT (TR) est bloqué, l'inductance (L) se décharge vers la charge (R) et la diode (D) devient passante.

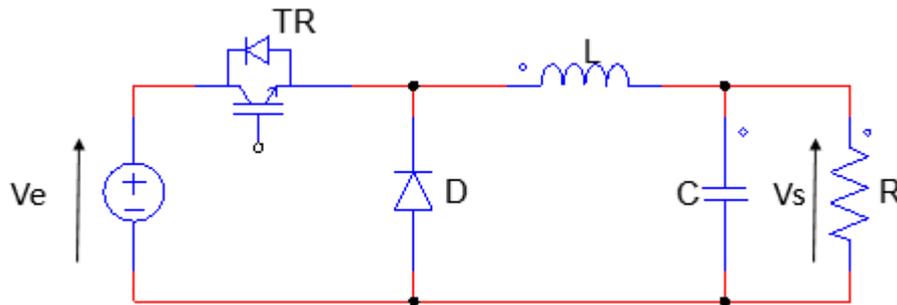


Figure III.3 : Circuit électrique du hacheur dévolteur.

III.2.3. Le convertisseur DC-DC dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

Un autre arrangement possible des commutateurs à semi-conducteurs permet d'ajouter un autre type de convertisseur DC-DC connu sous le nom de convertisseur dévolteur-survolteur.

En fait, ce nouveau convertisseur est obtenu en échangeant la diode D et l'inductance L du convertisseur dévolteur. Le circuit est illustré à la figure (III.4).

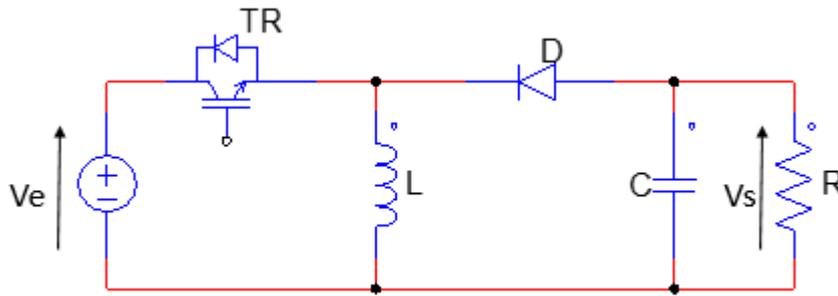


Figure III.4 : Circuit électrique du hacheur dévolteur-survolteur.

Dans ce type de convertisseur, le gain de circuit peut être supérieur ou inférieur à un par rapport au changement de polarité. La différence fondamentale de cette classe de convertisseur avec les convertisseurs dévolteur et survolteur est que la tension de sortie est de signe opposé à celle de la source constante E [11].

III.3. Commande des convertisseurs DC/DC (Méthodes de poursuite du point de puissance maximale) [5] [12]

L'énergie extraite d'un panneau solaire est fortement limitée. Il existe deux manières pour augmenter la puissance délivrée par ce panneau.

La première consiste à ajouter plus de panneaux à l'installation, ce qui implique une augmentation du coût et de surface.

La deuxième consiste à essayer de ramener le rendement de l'installation à son niveau le plus élevé possible, donc à chercher le point de puissance maximale (PPM) d'une rangée solaire. Si la rangée est opérationnelle en ce point de fonctionnement, le rendement sera le maximum possible, comme le présente la figure III.5

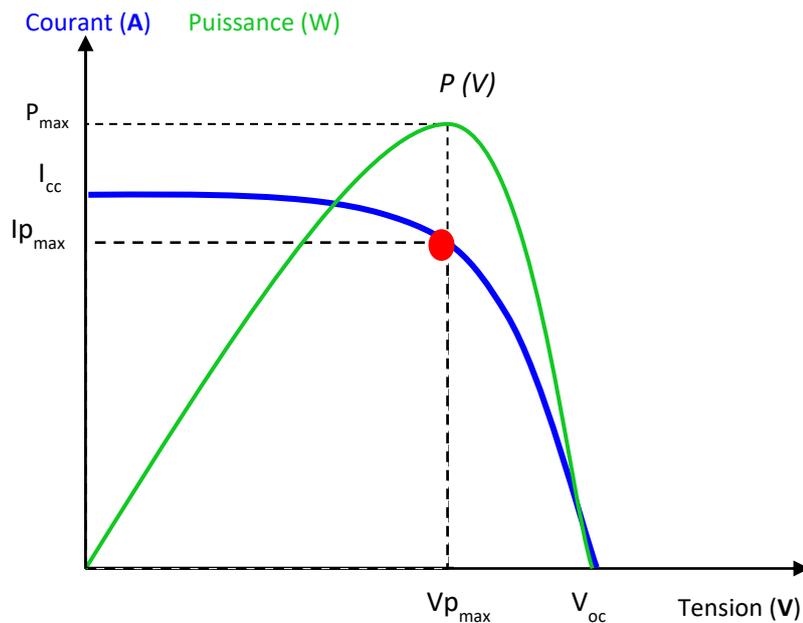


Figure III.5: Caractéristiques type d'un générateur photovoltaïque.

Il existe différentes méthodes pour faire fonctionner un panneau solaire au voisinage de son point de puissance maximale, nous allons les aborder dans ce qui suit.

III.3.1. Méthode avec contre réaction de tension

Cette méthode repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette dernière avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la commande MLI afin d'annuler cette erreur comme le montre la figure III.6.

Les différents types de cette méthode diffèrent selon la nature de la tension de référence qui peut être : fixe ou variable.

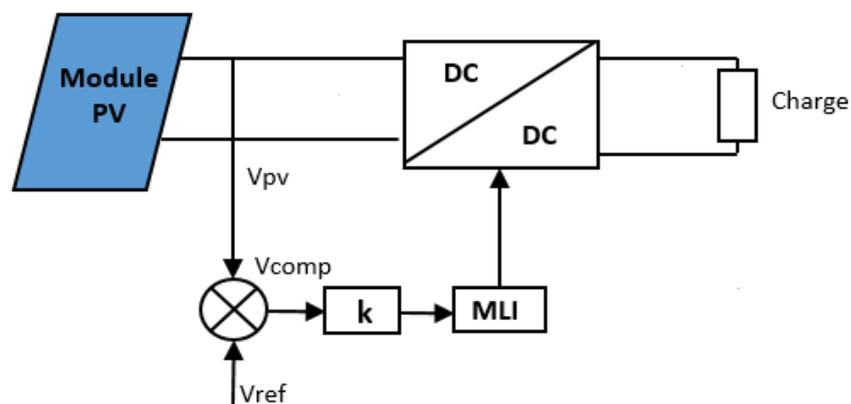


Figure III.6 : Principe de la méthode avec contre réaction de tension.

III.3.2. Méthode avec contre réaction de courant

Concernant les autres méthodes MPPT, une mesure de I_{pv} et V_{pv} a été employée pour obtenir des informations sur la puissance de sortie du panneau. Cette nouvelle méthode MPPT utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système. L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux autres méthodes.

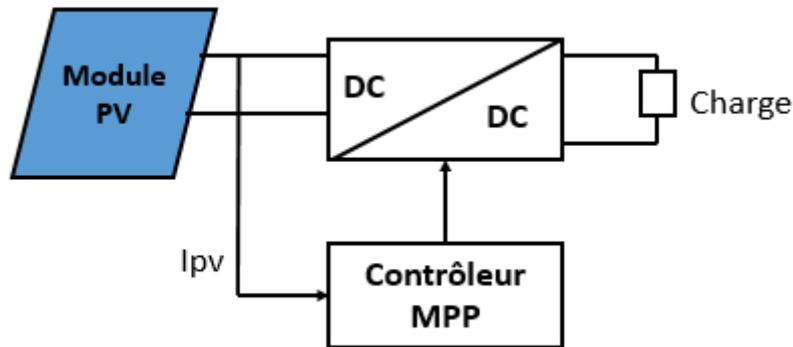


Figure III.7: Principe de la méthode avec contre réaction de courant.

III.3.3. Méthode avec contre réaction de puissance

Le but global est d'augmenter la puissance de sortie dans la rangée solaire afin qu'elle soit maximale, cette méthode se base sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau PV.

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue à MPPT. Elle utilise les valeurs de la tension V_{pv} et du courant I_{pv} du panneau comme ses valeurs d'entrée et la tension désirée V_{ref} en tant que sa valeur de sortie. Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du panneau et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée. La figure III.9 montre l'organigramme de l'algorithme de P&O.

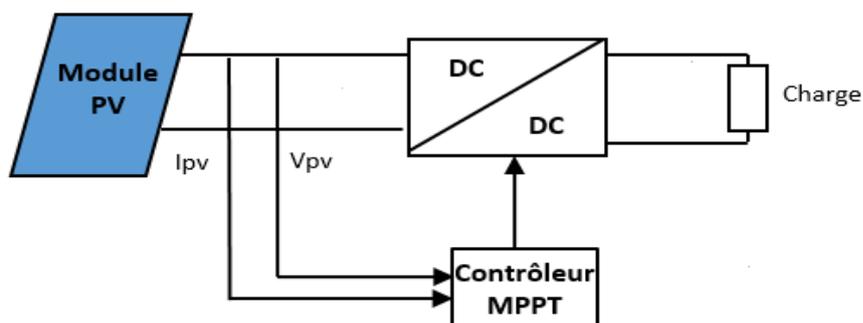


Figure III.8: Principe de la méthode avec contre réaction de puissance.

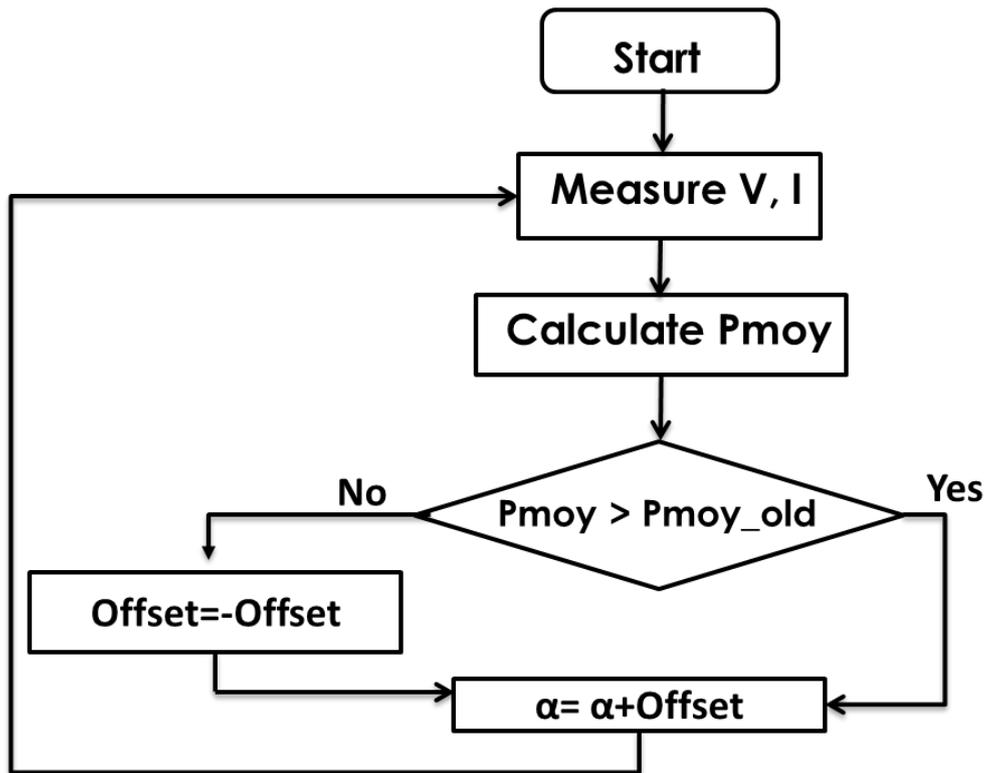


Figure III.9: Algorithme de la méthode avec contre réaction de puissance P&O.

III.4. La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Cette commande est réalisée par la comparaison d'un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice.

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulatrice, et la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

Les avantages de la commande MLI sont:

- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- Réductions de certaines harmoniques.

Le schéma de principe est donné par la figure III.10.

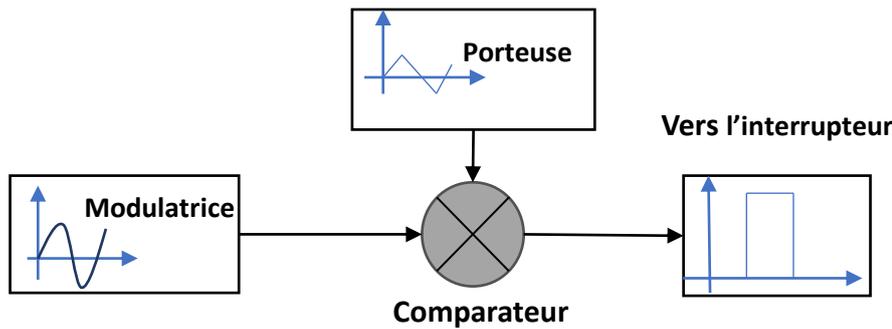


Figure III.10: Schéma synoptique de la MLI.

III.4.1. Caractéristique de la modulation MLI

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs [13] :

- **Le coefficient de réglage** : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion :

$$M_R = \frac{V_m}{V_p}$$

- **L'indice de modulation** : Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante :

$$M_I = \frac{f_p}{f_m}$$

III.4.2. Les différents types de la modulation MLI

III.4.2.1. Modulation d'échantillonnage naturelle bipolaire

Les signaux MLI issus de la modulation sinusoïdale bipolaire sont obtenus par la comparaison entre le signal de la porteuse avec celui de la référence. Il est important de noter que la largeur d'impulsion est proportionnelle à l'amplitude du signal modulé à l'instant où le basculement a lieu, car ce basculement correspond à des intersections des deux ondes (porteuse et modulatrice) instantanées. Ceci a deux conséquences importantes :

- Les centres des impulsions dans le signal MLI résultant ne sont pas équidistants.

- Il n'est pas possible de définir les largeurs d'impulsions en utilisant des expressions analytiques.

Le schéma de principe est donné par la figure III.11 et la figure III.12.

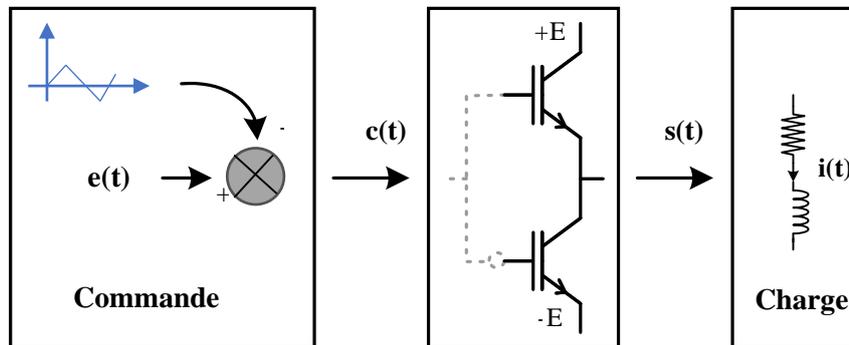


Figure III.11 : Schéma synoptique de la MLI naturelle.

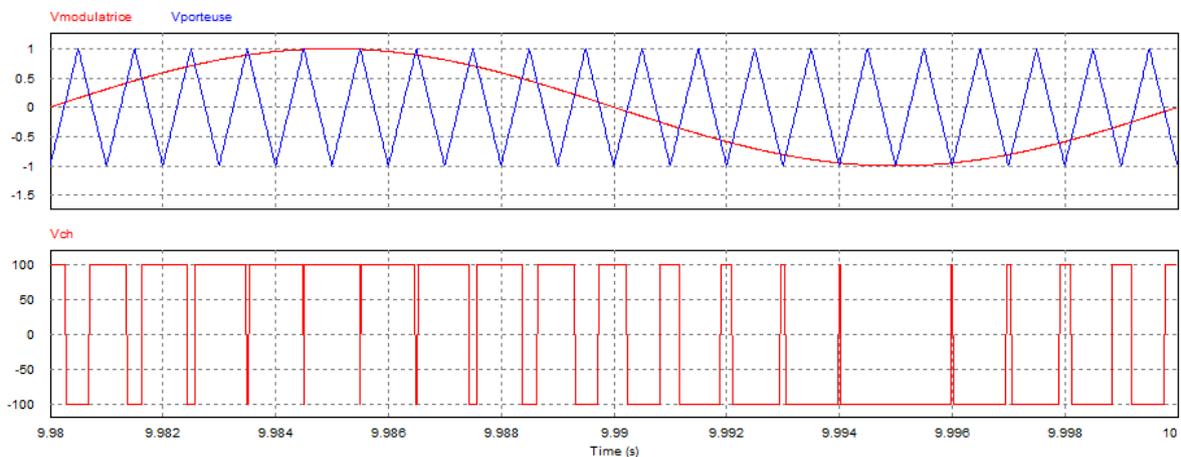


Figure III.12 : Signaux de la modulation d'échantillonnage naturelle bipolaire.

III.4.2.2. Modulation d'échantillonnage naturelle unipolaire.

La modulation unipolaire est issue de l'intersection entre une modulante sinusoïdale et une porteuse triangulaire. Elle se déduit directement de la commande appliquée aux quatre interrupteurs de l'onduleur monophasé en pont complet.

Cette modulation comporte des alternances positive et négative, durant la première alternance, le signal MLI est défini sur deux niveaux, $V_{ch}=0$ lorsque la modulante est inférieure à la porteuse, et $V_{ch} = E$ lorsqu'elle est supérieure. Dans la seconde alternance, $V_{ch} =0$ lorsque la modulante est supérieure à la porteuse, et $V_{ch} = - E$ si elle est inférieure.

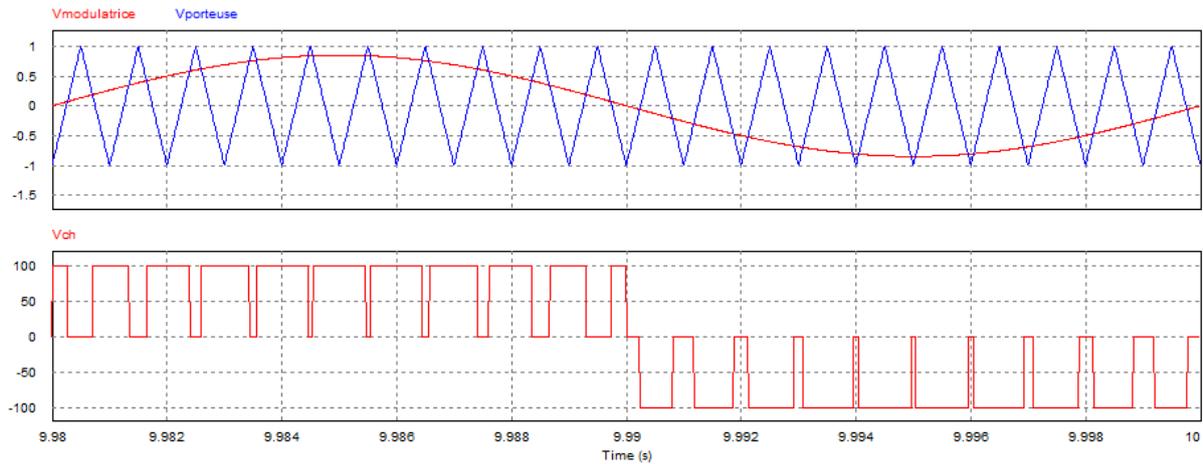


Figure III.13 : Signaux de la modulation d'échantillonnage naturelle unipolaire.

III.4.2.3. MLI optimisé (calculée)

Cette technique de MLI consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs de manière à répondre à certains critères portant sur le spectre fréquentiel de l'onde délivrée par l'onduleur [14] [15].

Les critères usuellement retenus sont :

- Elimination d'harmoniques de rangs spécifiés.
- Elimination d'harmoniques dans une bande spécifiée.
- Minimisation d'un critère harmonique global.

Cette méthode à optimisation des angles de commutation nécessite des algorithmes de calcul performants ainsi que des calculateurs puissants.

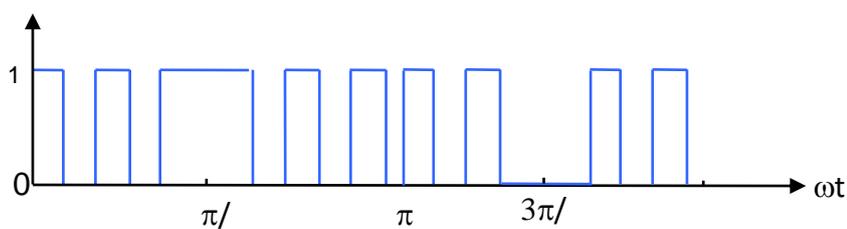
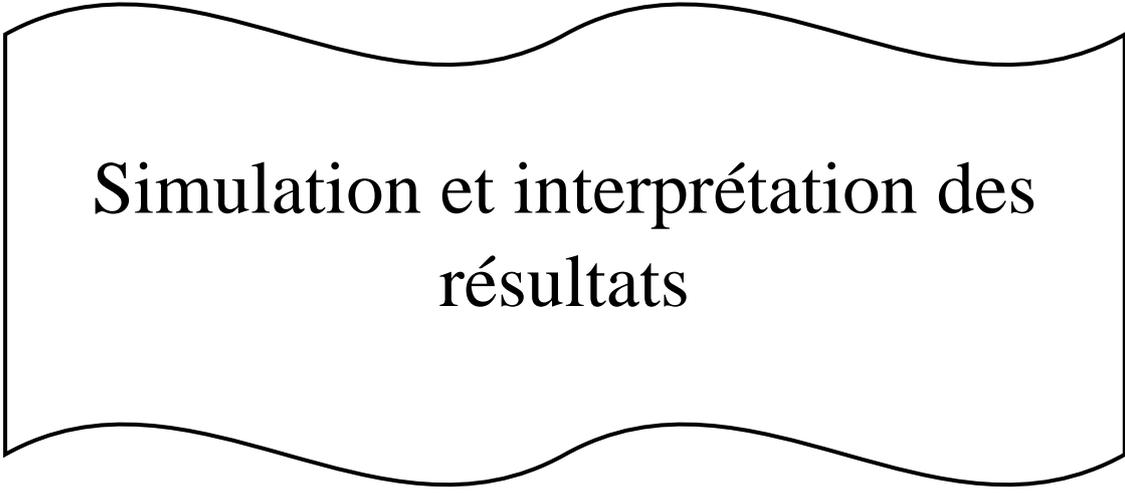


Figure III.14 : Signal MLI optimisé.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé les différentes méthodes de la commande MPPT pour les convertisseurs DC-DC qui sont basées sur la variation automatique du rapport cyclique (α). Et la commande MLI pour les convertisseurs DC-AC, afin d'obtenir une tension d'alimentation stable et réglable.

Dans le chapitre prochain nous utiliserons ces stratégies pour simuler notre système de production d'énergie électrique photovoltaïque.



Simulation et interprétation des
résultats

CHAPITRE IV : Simulation et interprétation des résultats

IV.1. Introduction

Afin de prévoir le comportement d'une installation photovoltaïque connectée au réseau, nous allons simuler son fonctionnement et ses différents éléments dans l'environnement PSIM, et nous allons étudier sa stabilité et l'influence des paramètres du GPV (température et éclairage) sur le système.

IV.2. Présentation du logiciel de simulation PSIM

PSIM est un logiciel de simulation conçu pour une simulation rapide, avec une interface utilisateur agréable.

Le logiciel permet de dessiner le schéma électrique du montage, à partir des éléments de la bibliothèque.

Les appareils de mesure disposés sur le schéma du montage définissent les courbes représentatives des grandeurs électriques et mécaniques que l'on peut obtenir après simulation.

Ce logiciel est constitué de trois programmes :

- SIMCAD (dessin du schéma).
- PSIM (simulation).
- SIMVIEW (tracé des courbes).

La simulation d'un montage se décompose en quatre étapes :

- Dessin du schéma de montage.
- Entrée des valeurs des éléments du montage et des paramètres de simulation.
- Calcul.
- Visualisation des courbes.

IV.3. Caractéristique du module photovoltaïque SOLAREX MSX-60

Pour la simulation de notre système, nous avons choisi le module photovoltaïque SOLAREX MSX-60, qui est présenté dans la librairie PSIM. Sa fiche technique donne les spécifications suivantes :

Caractéristiques	Valeurs
Nombre de cellules	36
Puissance maximale « Pmax »	60W
Tension de puissance maximale « Vmp »	17.1V
Courant de puissance maximale « Imp »	3.5A
Minimum de puissance maximale garantie « Pmax »	58W
Courant de court-circuit « Isc »	3.8A
Tension de circuit ouvert « Voc »	21.1V

Tableau IV.1 : Caractéristiques d'un module photovoltaïque SOLAREX MSX-60.

IV.4. Simulation du module photovoltaïque

À température et éclairement constants, et particulièrement aux condition standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$), on simule ce modèle, et on visualise les caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$ comme le montre les figures ci-dessous.

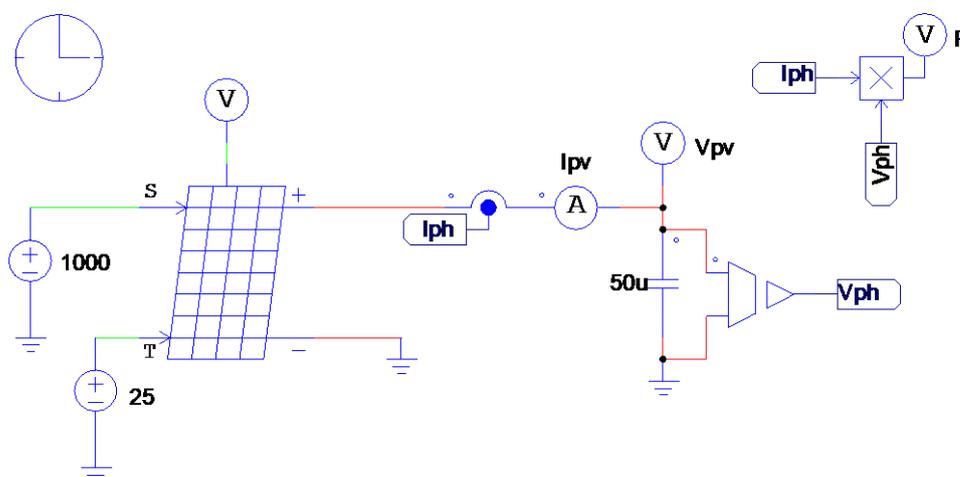


Figure IV.1 : Simulation d'un module photovoltaïque.

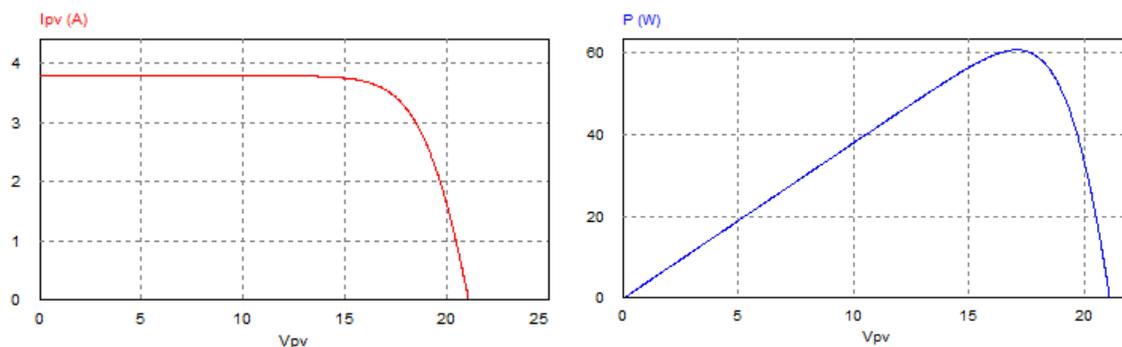


Figure IV.2 : Caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$.

Interprétation :

On remarque que les allures de la figure IV.2 montre les différents paramètres du module photovoltaïque SOLAREX MSX-60.

IV.5. Simulation du hacheur élévateur à contre réaction de puissance

Le convertisseur DC/DC élévateur est inséré entre le GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique α ($0 \leq \alpha \leq 1$).

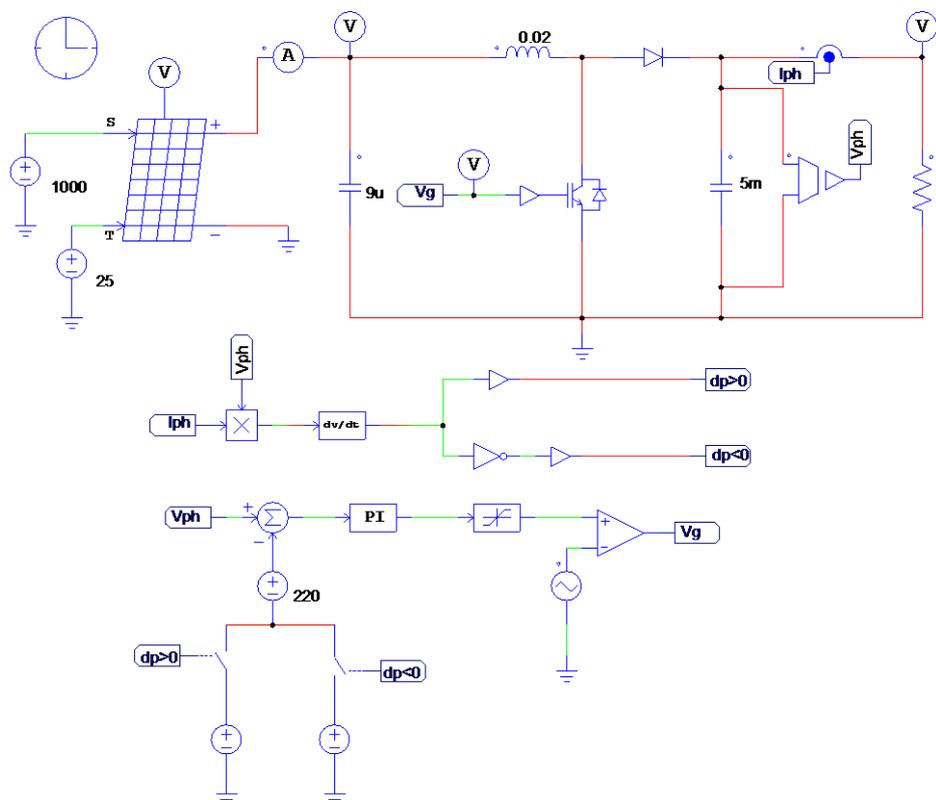


Figure IV.3 : Simulation du hacheur élévateur avec la commande P&O.

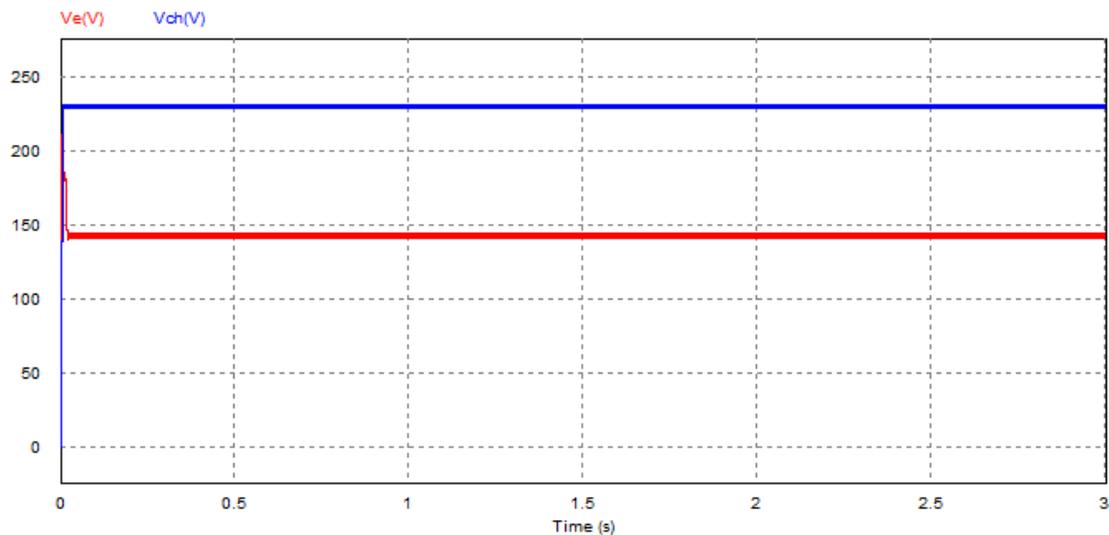


Figure IV.4 : Caractéristiques d'entrée V_e et de sortie V_{ch} du hacheur élévateur.

Interprétation :

Comme le montre la figure IV.4, le hacheur élévateur à contre réaction de puissance avec la commande P&O effectuée correctement son rôle, on voit que la tension de sortie V_{ch} au borne de la charge est supérieure à celle de l'entrée V_e .

IV.6. Simulation d'un onduleur monophasé

IV.6.1. Simulation d'un onduleur monophasé en pont

Un onduleur est essentiellement utilisé pour fournir une tension et un courant alternatif à partir d'une source continue. Le montage de simulation et les allures du courant et de la tension de sortie sont représentés par les figures ci-dessous.

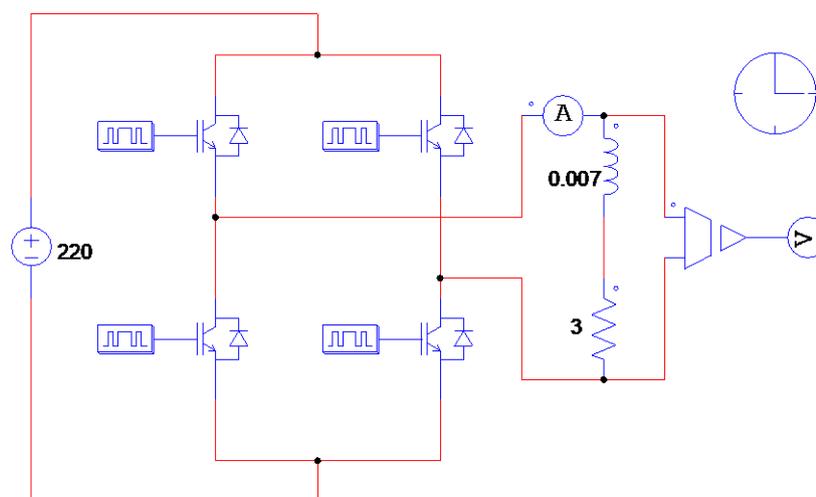


Figure IV.5 : Simulation de l'onduleur monophasé en pont.

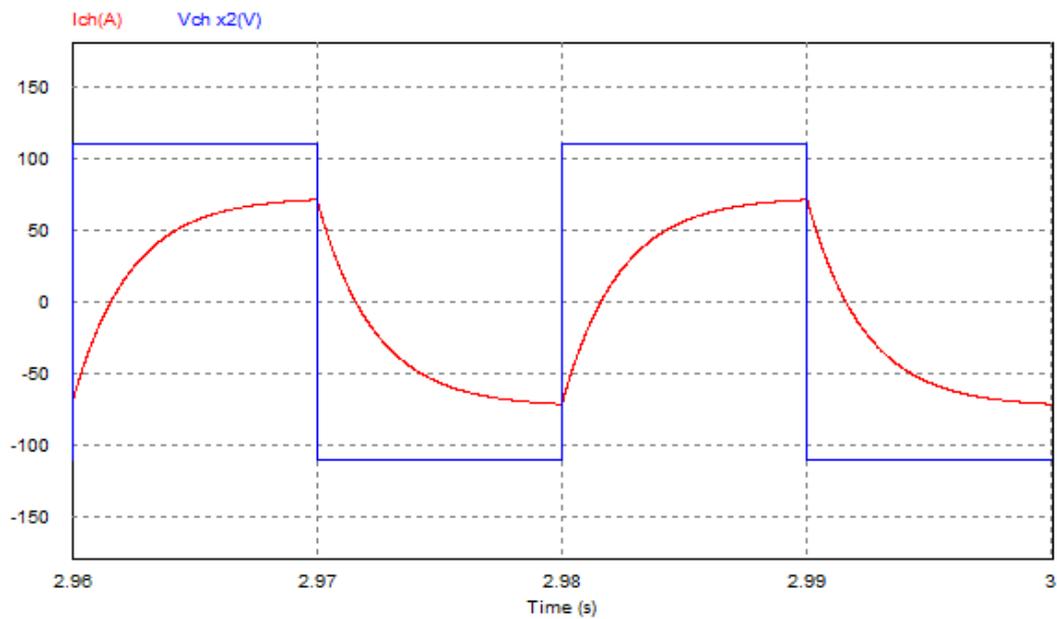


Figure IV.6 : Allures de la tension et du courant au bornes d'une charge RL.

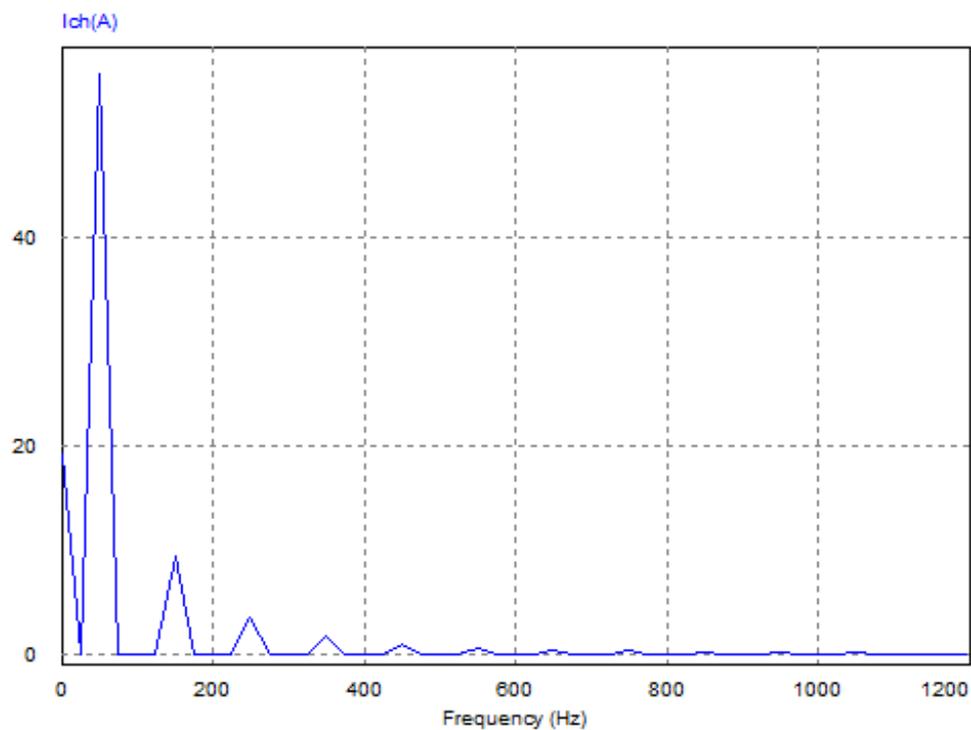


Figure IV.7 : Spectre du courant pour une charge RL.

Interprétation :

Comme le montre les résultats obtenus, le courant n'est pas sinusoïdal, il est riche en harmoniques. Afin d'atténuer ces harmoniques et rendre le courant quasi-sinusoïdal, nous devons avoir recours à la modulation en largeur d'impulsion MLI.

IV.6.2. Simulation d'un onduleur monophasé à commande MLI

Notre but est d'obtenir un signal sinusoïdal identique à celui du réseau. La commande MLI est essentielle pour assurer cette transformation. La simulation et les résultats sont présentés par les figures ci-dessous.

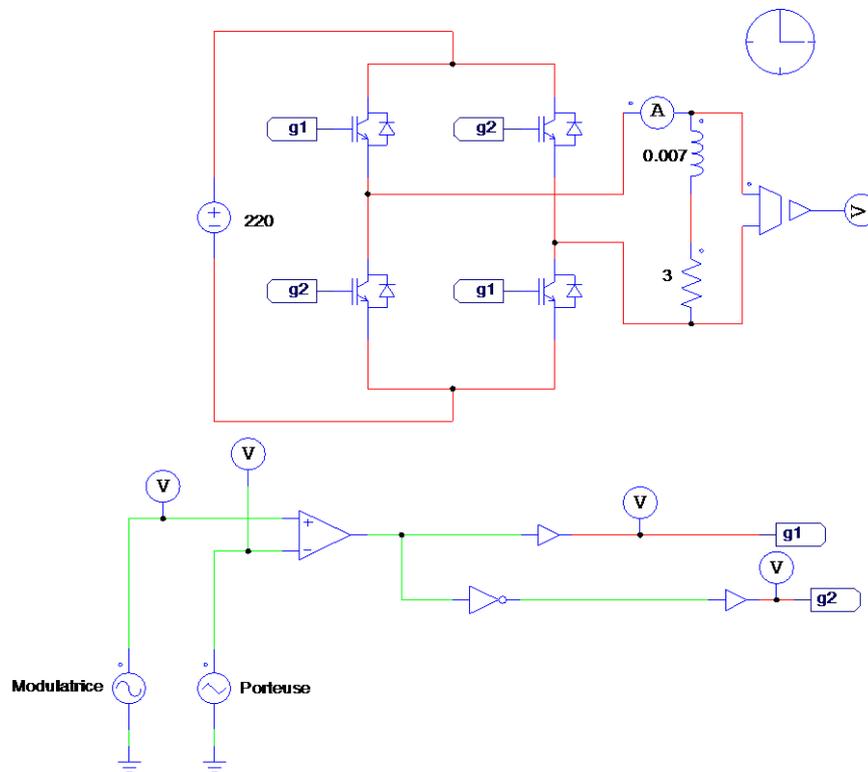


Figure IV.8 : Simulation d'un onduleur monophasé MLI.

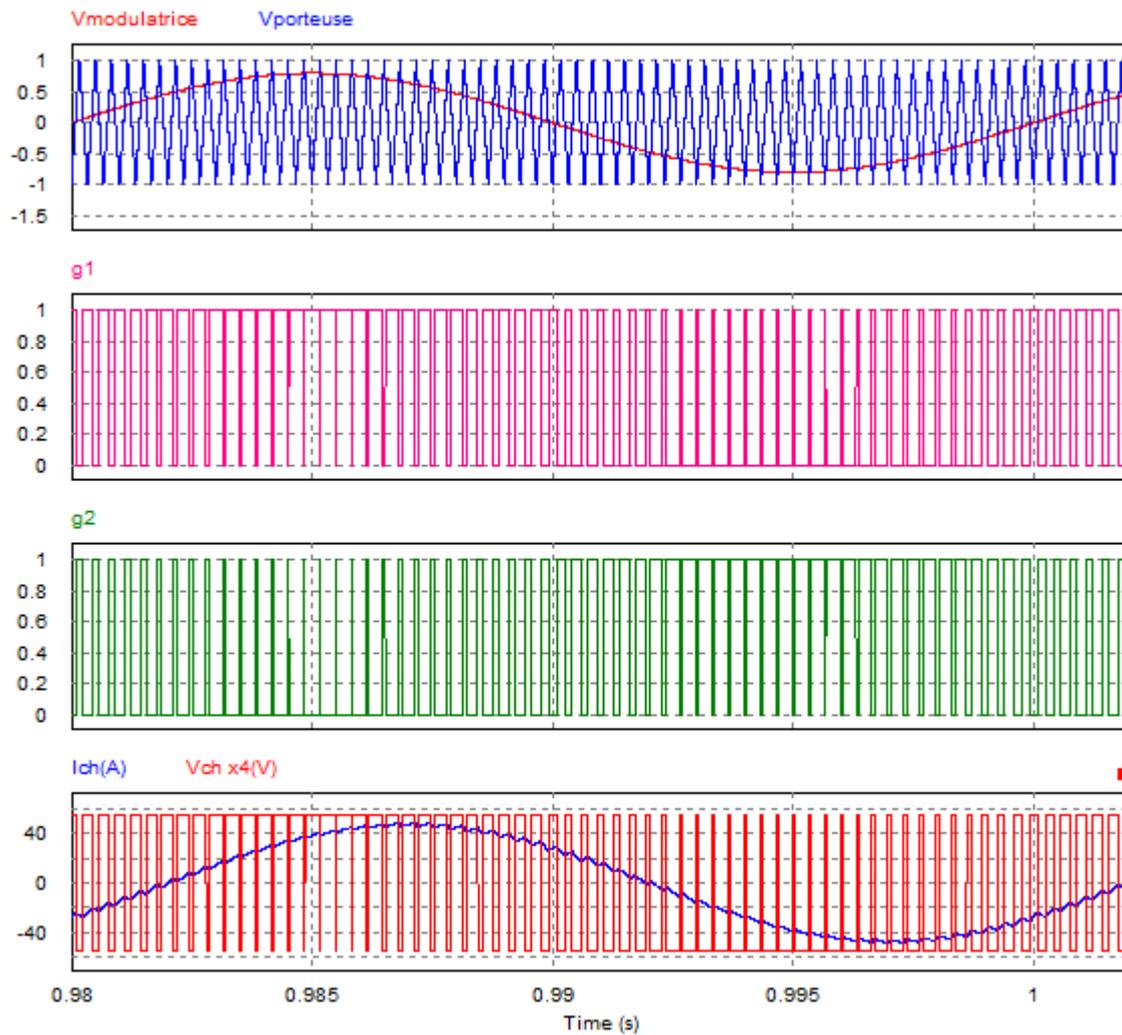


Figure IV.9 : Résultats de la simulation d'un onduleur monophasé MLI.

IV.6.3. Influence de la fréquence de la porteuse de la commande MLI

En utilisant une porteuse de différentes valeurs de fréquence, on obtient les résultats suivants :

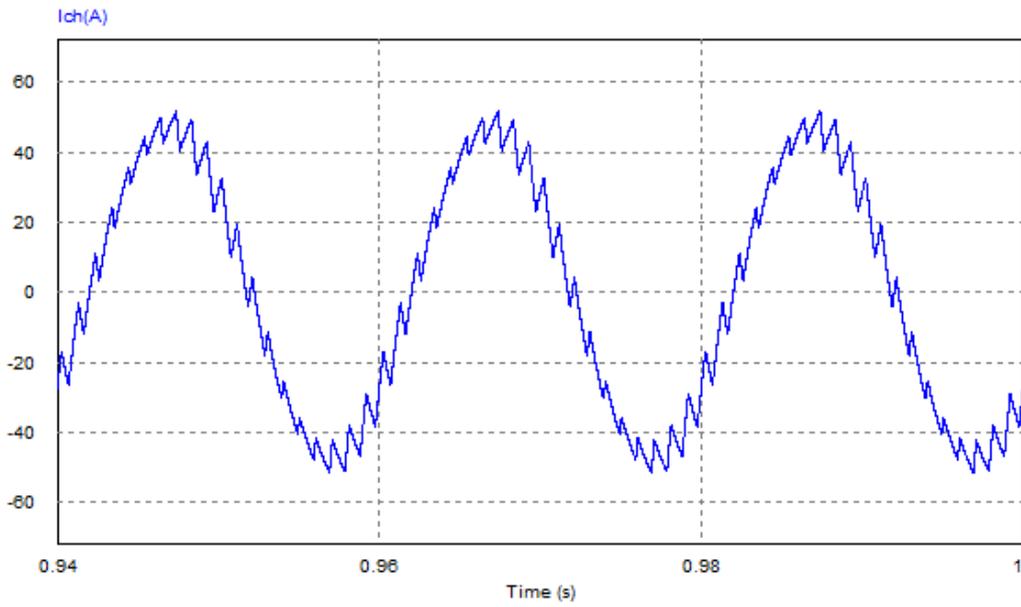


Figure IV.10 : Allure du courant pour une fréquence $f=1000\text{Hz}$.

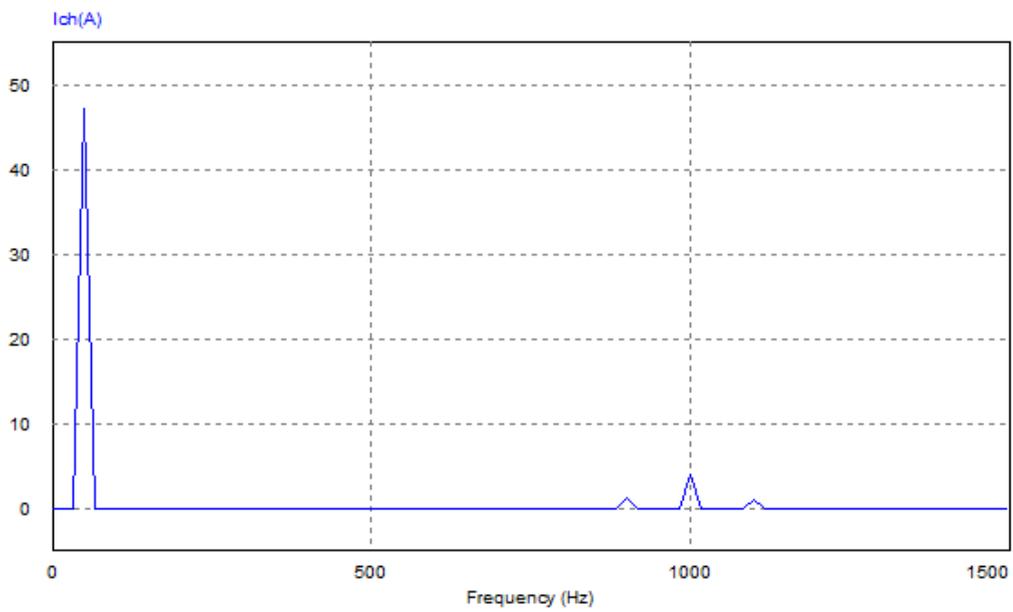


Figure IV.11 : Spectre du courant pour $f=1000\text{Hz}$.

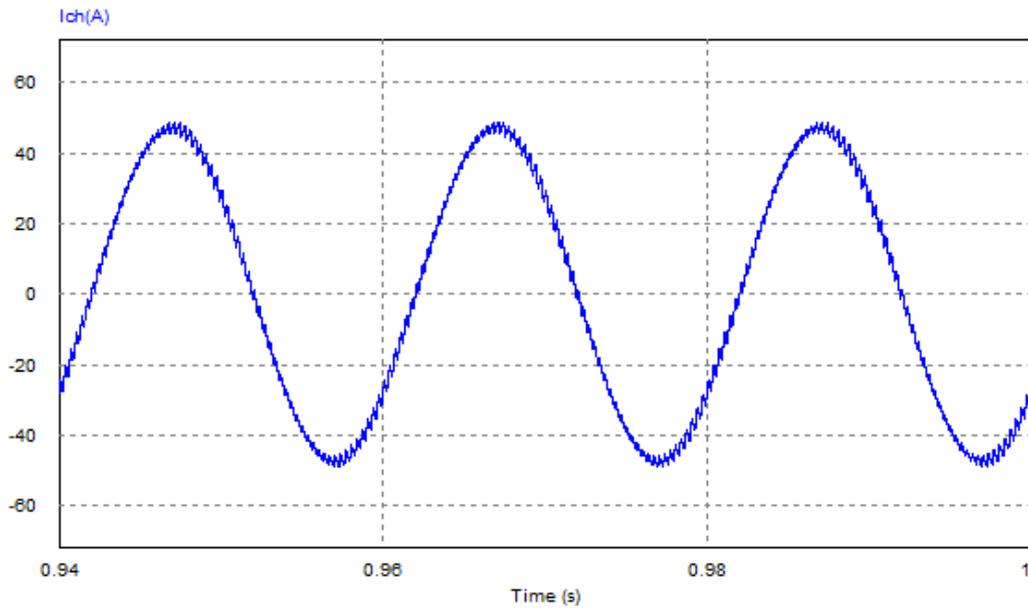


Figure IV.12: Allure du courant pour une fréquence $f=3000\text{Hz}$.

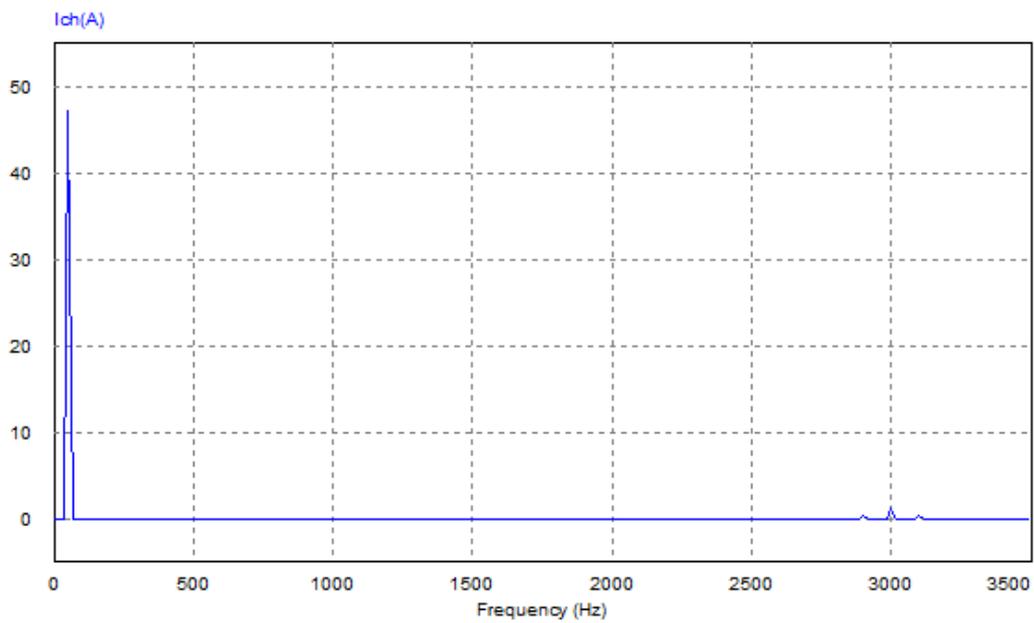


Figure IV.13 : Spectre du courant pour $f=3000\text{Hz}$.

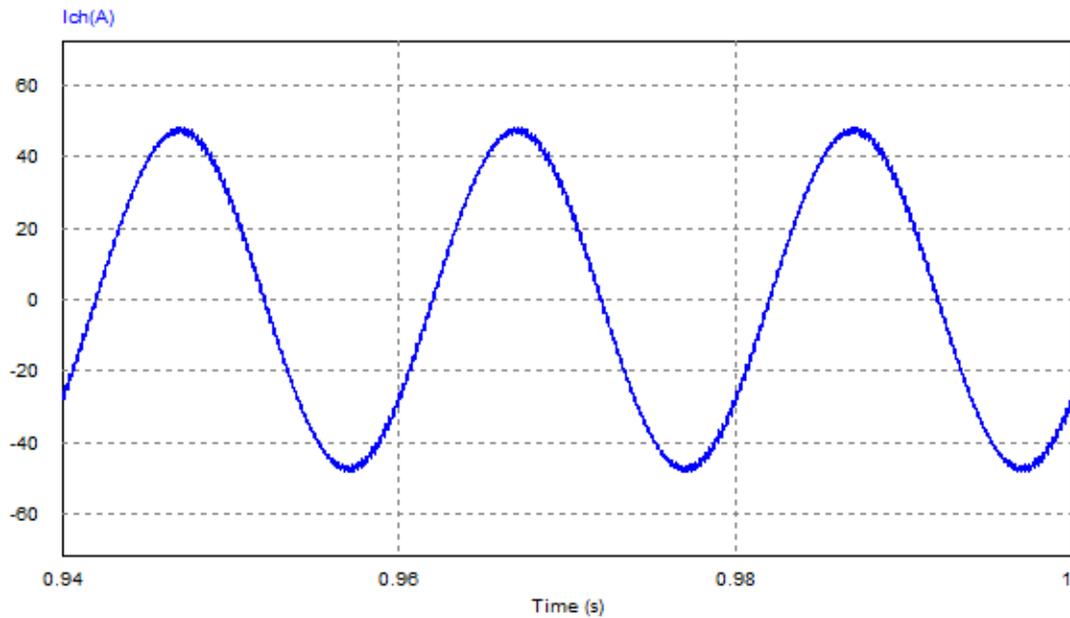


Figure IV.14 : Allure du courant pour une fréquence $f=5000\text{Hz}$.

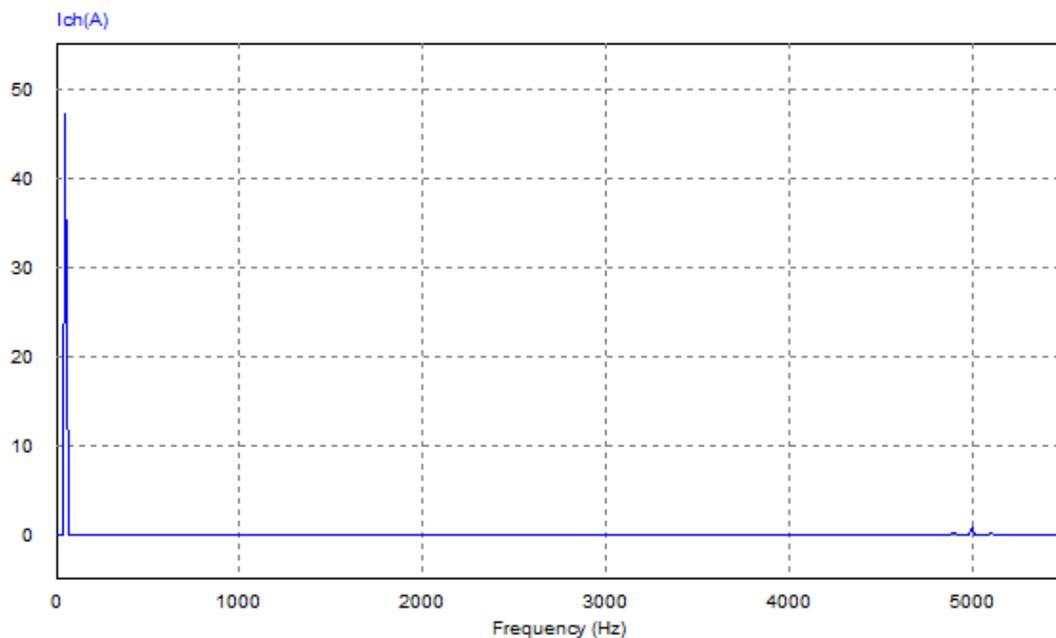


Figure IV.15 : Spectre du courant pour $f=5000\text{Hz}$.

Interprétation :

D'après les résultats obtenus on constate que :

- La commande MLI donne une tension alternative et un courant quasi sinusoïdal aux bornes de la charge RL.
- L'allure du courant à la sortie de l'onduleur dépend de la fréquence de la porteuse. Tel que plus elle est d'une valeur importante, plus la forme du courant se lisse, car comme le montre

les spectres du courant, les harmoniques de sortie s'éloignent de la fondamentale (50Hz) et se situent autour de la valeur de la fréquence donnée à la porteuse.

IV.7. Simulation de notre système photovoltaïque

Pour une satisfaction en terme de tension et de courant, nous avons opté pour une connexion mixte entre les modules PV (20 modules en série, et 50 modules en parallèle). Les caractéristiques du générateur photovoltaïque utilisé sont présentées par la figure IV.16 et le montage de la simulation de notre système est représenté par la figure IV.17.

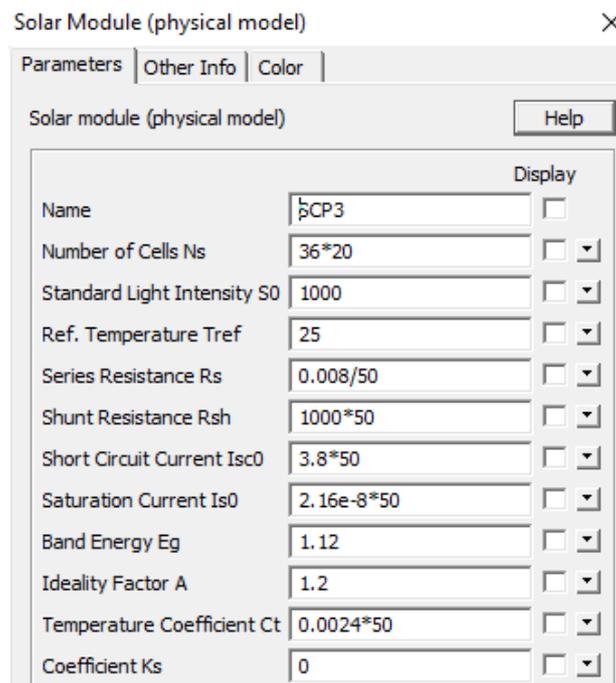


Figure IV.16 : Paramètres du générateur photovoltaïque.

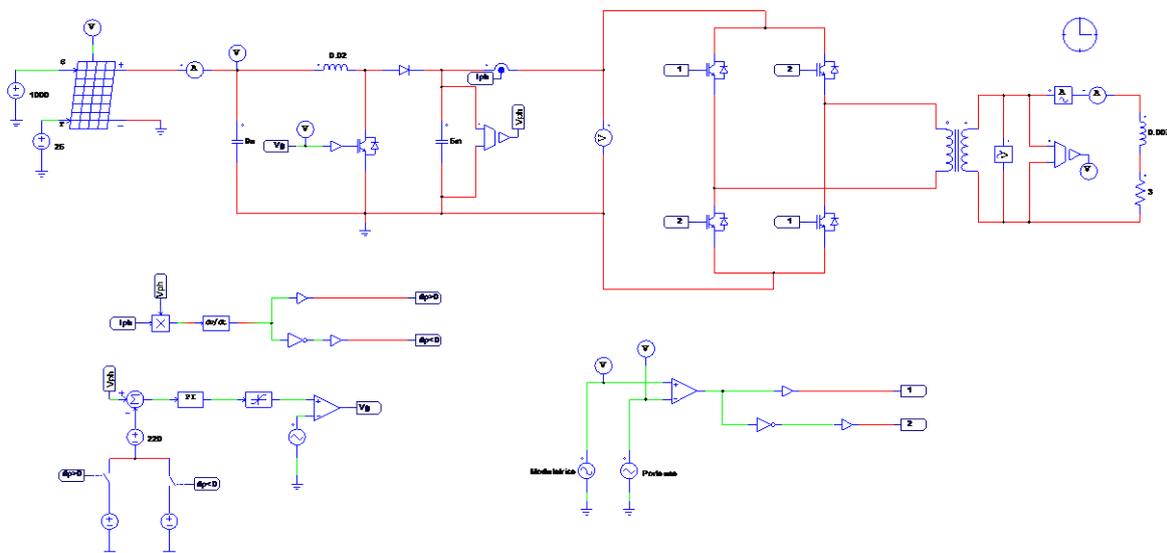


Figure IV.17 : Montage de simulation de notre système photovoltaïque.

IV.8. Simulation de notre système photovoltaïque avec une batterie

L'énergie photovoltaïque varie en fonction des conditions météorologiques, c'est pour cela nous devons avoir recours à un système de stockage d'énergie. Le montage de simulation et allures de la tension et du courant sont représentés dans les figures ci-dessous.

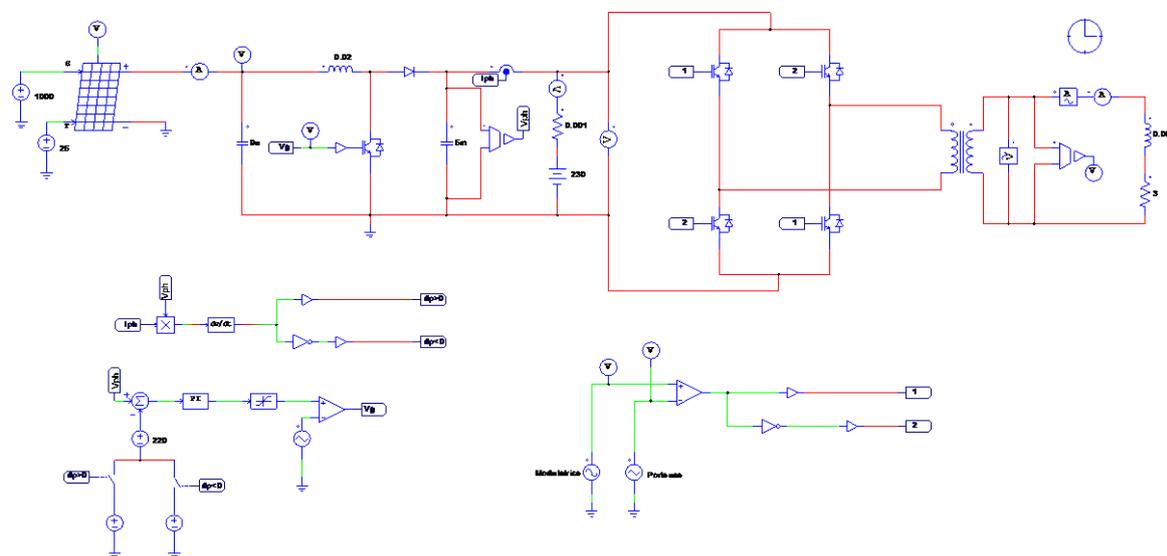


Figure IV.18 : Montage de simulation de notre système photovoltaïque avec une batterie.

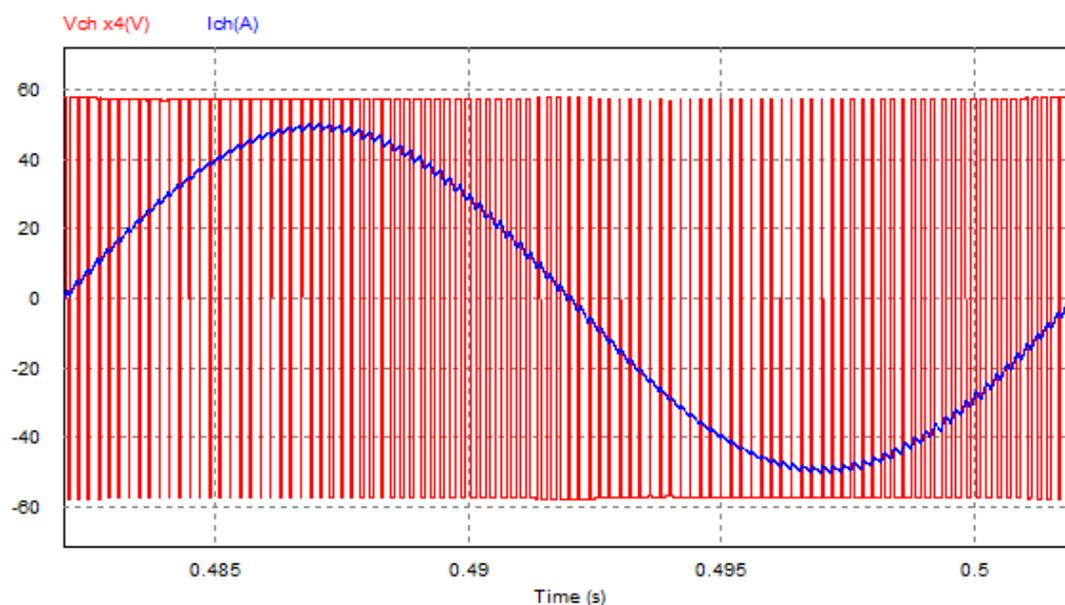


Figure IV.19 : Allures du courant et de la tension au borne de la charge RL (avec batterie).

Interprétation :

En présence de l'éclairement c'est le générateur photovoltaïque qui délivre l'énergie nécessaire à la charge, et en son absence (dans l'obscurité) c'est la batterie qui prend la relève, celle-ci se décharge et délivre de l'énergie à la charge.

IV.9. Influence de la variation de la charge

Le but de notre travail est d'obtenir une tension alternative au tour de 220V avec une fréquence de 50Hz égales à celles du réseau.

On varie la charge RL, et on visualise l'allure de la tension et du courant. Les résultats sont présentés par le tableau et les figures ci-dessous.

Rch (Ω)	Lch (H)	Vch (V)	Ich (A)
3	0.007	230	49.5
5	0.012	230	29.5
7	0.017	230	20.9
10	0.025	230	14.5

Tableau IV.2 : Résultats de la variation de la charge RL.

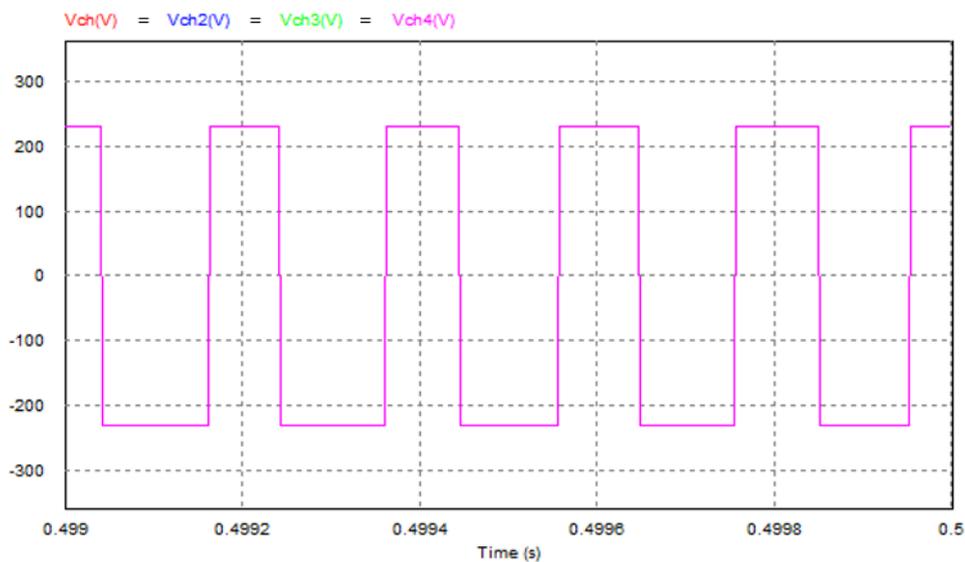


Figure IV.20 : Allures des tensions pour différentes valeurs de la charge.

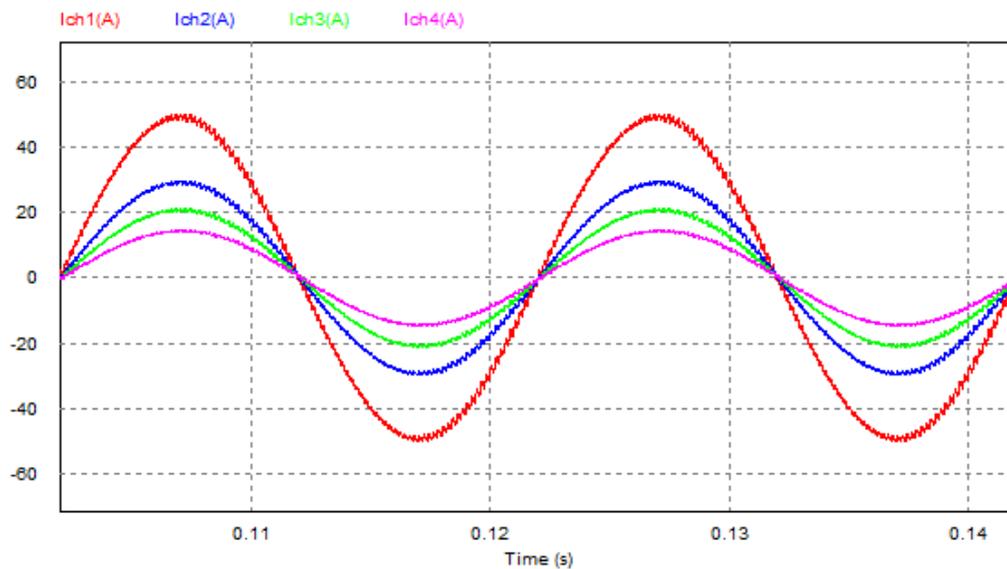


Figure IV.21 : Allures des courants pour différentes charges RL.

Interprétation :

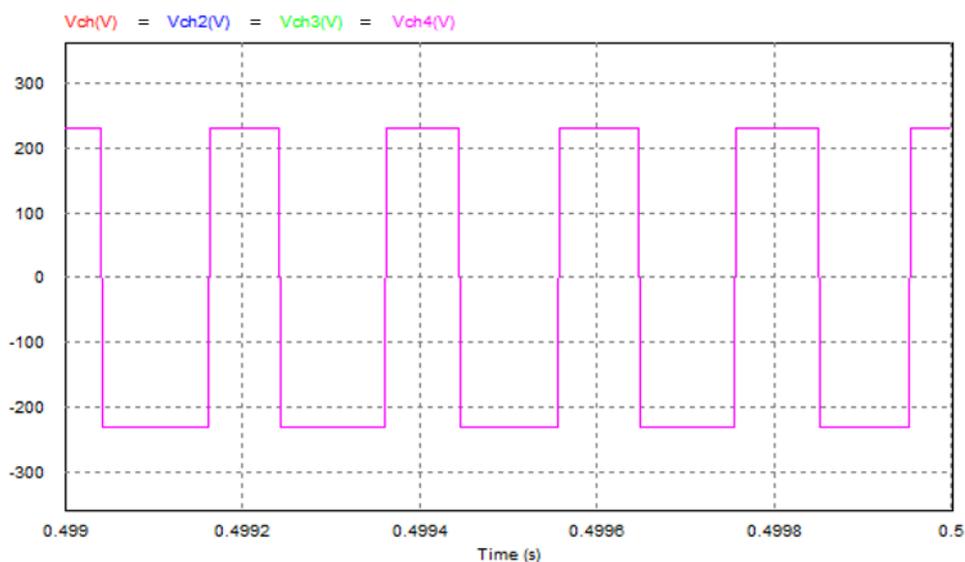
On constate que la tension de sortie est alternée entre ($\pm 230\text{V}$) et équivalente à celle du réseau quel que soit la valeur de la charge.

IV.9.1. Influence de l'éclairement

Dans cette manipulation, on garde la température constante ($T=25^\circ\text{C}$), et on varie l'éclairement G . Les résultats obtenus sont présentés par le tableau et la figure ci-dessous.

G (w/m^2)	V_{ch} (V)
1000	230
800	230
600	230
400	230

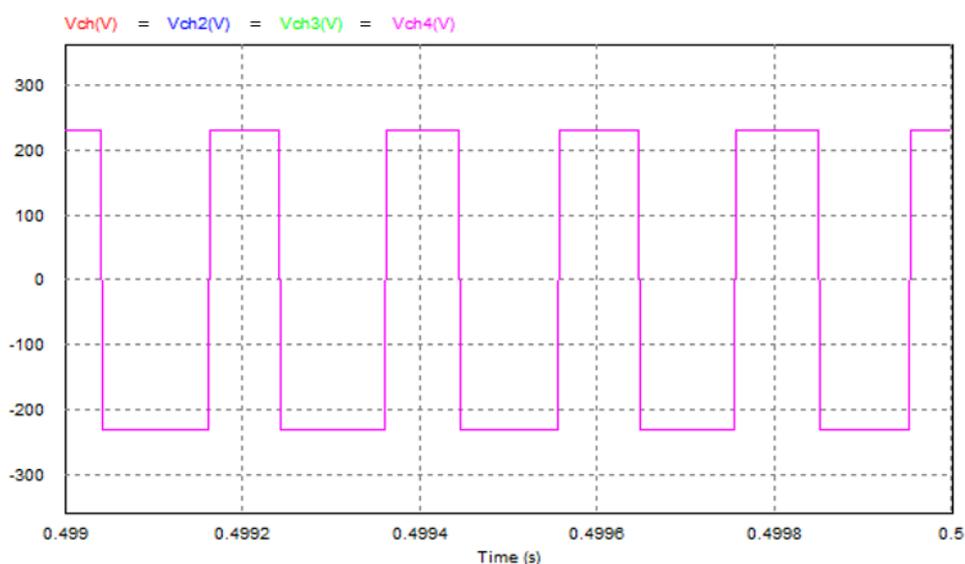
Tableau IV.3 : Résultats de la variation de l'éclairement G .

Figure IV.22 : Allures des tensions pour différentes valeurs de l'éclairement G .

IV.9.2. Influence de la température

Maintenant, on garde l'éclairement constant ($G=1000\text{W/m}^2$), et on varie la température T . Les résultats obtenus sont présentés par le tableau et la figure ci-dessous.

T (°c)	V_{ch} (V)
25	230
30	230
35	230
45	230

Tableau IV.4 : Résultats de la variation de la température T .Figure IV.23 : Allures des tensions pour différentes valeurs de la température T .

IV.9.3. Influence de la variation de la température et de l'éclairement

Cette fois, on varie les deux paramètres (éclairement et température). Les résultats sont présentés par le tableau et la figure ci-dessous.

T (°c)	G (w/m ²)	Vch(V)
25	1000	230
30	800	230
35	600	230
45	400	230

Tableau IV.5 : Résultats de la variation de la température T et de l'éclairement G.

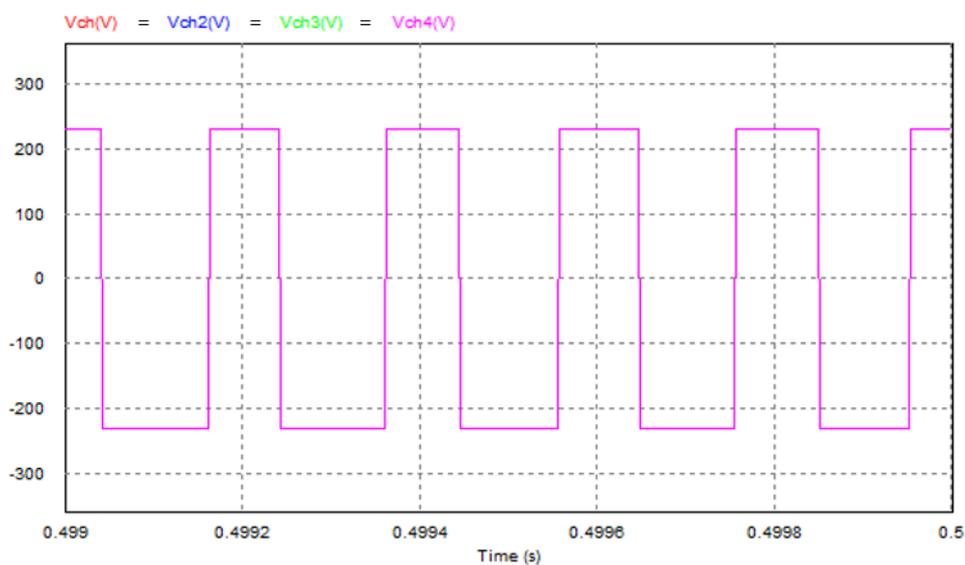


Figure IV.24 : Allures des tensions pour différentes valeurs de la température T et de l'éclairement G.

Remarque :

On constate que la variation de la température T et de l'éclairement G n'a aucun effet sur notre système, ce dernier assure une tension égale à celle du réseau quel que soit la valeur des conditions météorologiques, car le hacheur élévateur force toujours le GPV à fonctionner à son PPM.

IV.10. Protection du système

Comme le montre la figure IV.25, nous avons mis en place un système pour protéger le GPV. Dans le cas où la charge demande un courant supérieur à celui que le GPV peut délivrer, la commande fait en sorte que le système se déconnecte du GPV. Le schéma de simulation et les résultats obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous.

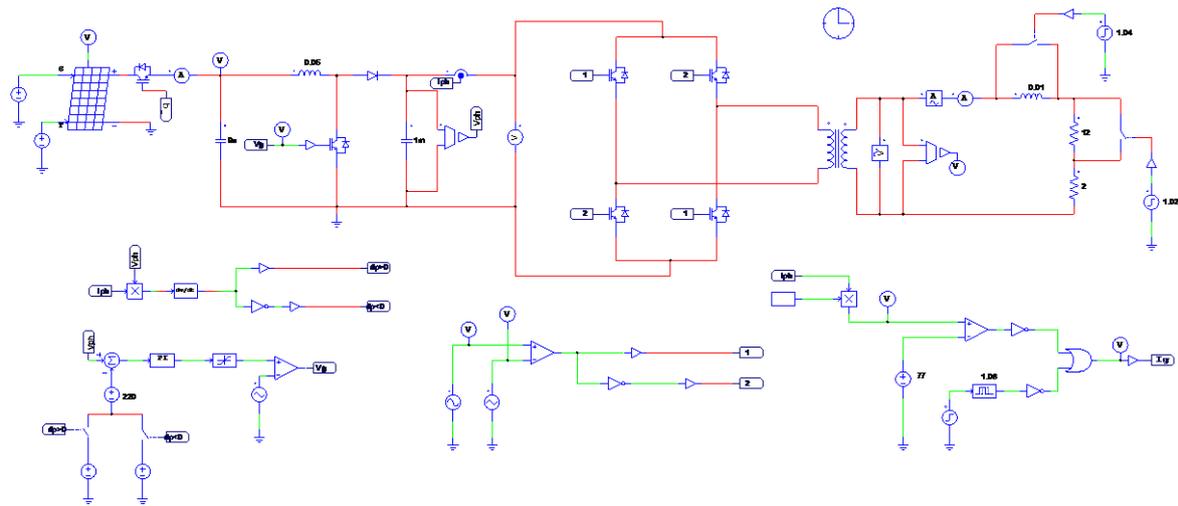


Figure IV.25 : Montage du système avec protection.

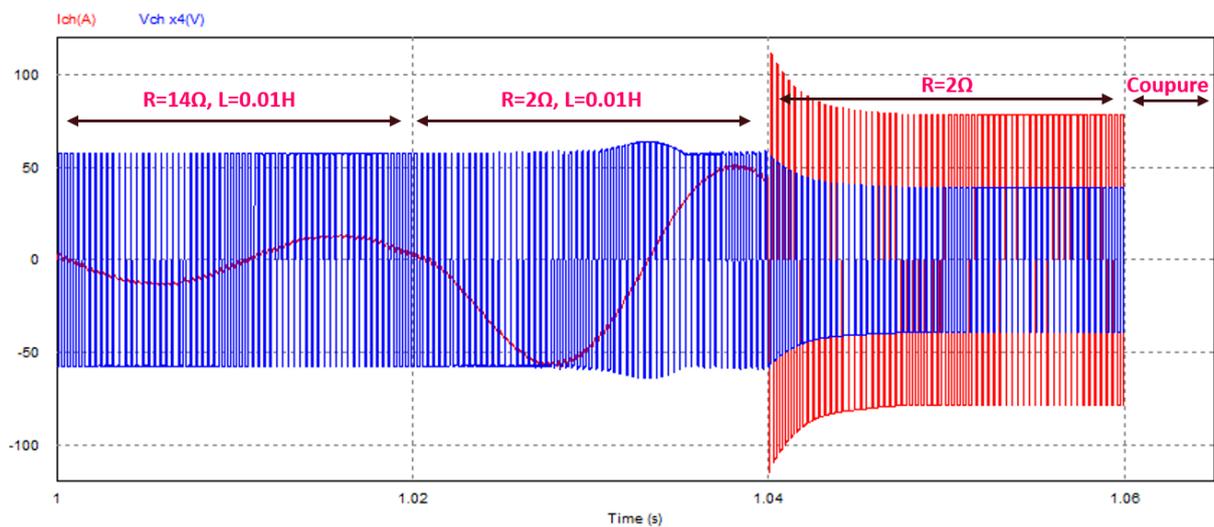


Figure IV.26 : Allures du courant et de la tension pour différentes charges.

Interprétation :

Comme le montre la figure IV.26 :

- A $t < 1.04s$, la charge exige un courant inférieur au courant maximal que le GPV peut délivrer, donc il n’y a pas perturbation du système.
- A partir de $t = 1.04s$, la charge exige un courant très fort supérieur à celui que le GPV peut délivrer, alors la commande détecte ce courant et intervient en déconnectant le GPV du système afin de le protéger.

IV.11. Connexion au réseau

Pour connecter notre système au réseau, il faut tout d'abord obtenir un accord de raccordement de l'entreprise de distribution d'énergie.

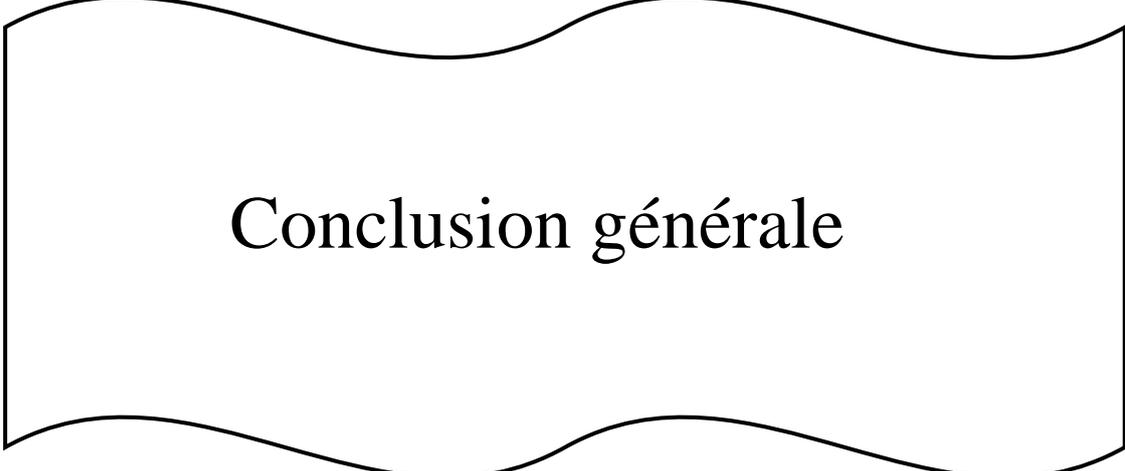
A l'instant de la connexion au réseau, il faut s'assurer que la tension du système est identique à celle du réseau en phase, en amplitude, et en fréquence. Une fois que le système est connecté, c'est le réseau qui imposera sa fréquence au système.

IV.12. Conclusion

Ce chapitre s'est consacré à la simulation d'un système photovoltaïque et de chacun de ses éléments. Les résultats obtenus montrent que :

La meilleure façon d'exploiter l'énergie photovoltaïque est d'utiliser un hacheur élévateur avec une commande MPPT (P&O dans notre cas) pour traquer le point de puissance maximal, afin d'obtenir une tension égale à celle désirée (réseau) quel que soit la variation de la charge et des conditions météorologiques (température et éclairage).

L'onduleur à commande MLI est l'élément essentiel pour convertir l'énergie continue délivrée en alternative, avec une fréquence et une tension d'amplitude compatibles à celles du réseau (50Hz, 220V).



Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique sous le logiciel PSIM. Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur DC-DC élévateur avec une commande MPPT, d'un convertisseur DC-AC avec une commande MLI, et le réseau électrique.

Une étude du convertisseur DC-DC élévateur alimenté par le générateur photovoltaïque a été réalisée, et un algorithme de poursuite du PPM (P&O) a alors été implémenté. Nous l'avons ensuite connecté à un onduleur monophasé en pont, constitué d'interrupteurs électroniques commandés par une MLI afin de transformer la tension continue fournie par le générateur photovoltaïque en une tension alternative de fréquence 50 Hertz dans le but de l'injecter au réseau électrique. Le système a ensuite été testé pour différentes valeurs d'ensoleillement et de température sur le MPPT où la puissance de fonctionnement du système est maximale.

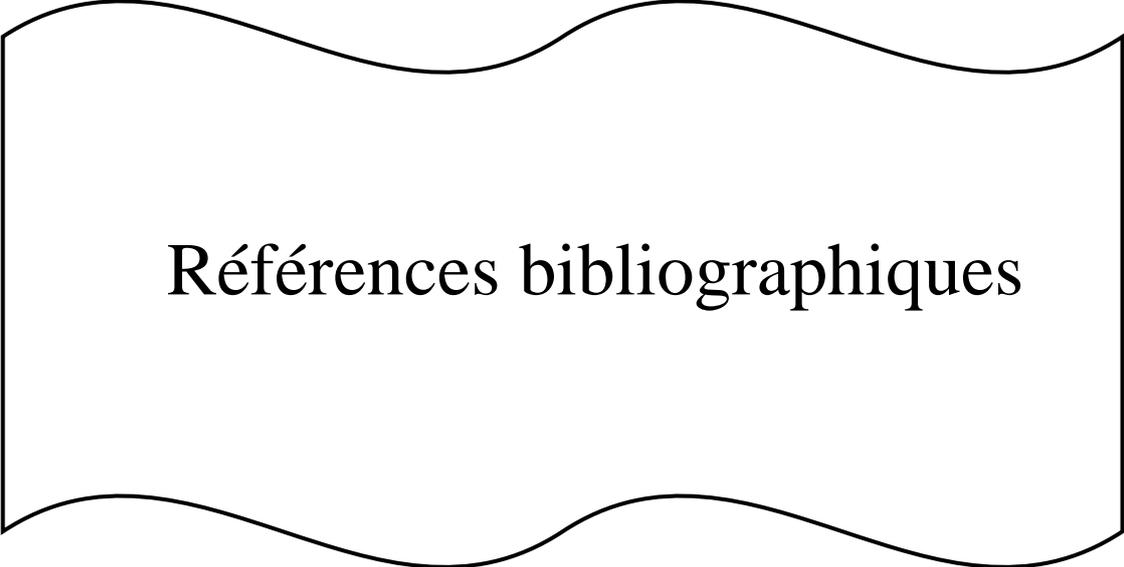
Après simulation et analyse des différents résultats on arrive à plusieurs conclusions:

- La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque n'est pas linéaire, donc sa puissance maximale n'est pas toujours transmise.
- La commande MPPT (P&O) permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque et la charge, elle le force à fonctionner toujours au point de puissance maximale malgré les variations des conditions météorologiques (température et éclairage).
- La commande MLI permet d'atténuer les harmoniques, et donne à la sortie de l'onduleur, une tension alternative de fréquence 50 Hertz compatible au réseau de distribution.

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique.

En perspectives :

- Réalisation pratique de l'installation photovoltaïque raccordée au réseau simulée.
- Application de l'algorithme (P&O) en cas du phénomène d'ombrage (courbe avec plusieurs maximums).
- Implémentation matérielle de la commande MPPT (P&O), sur des systèmes à base de microcontrôleur ou DSP.



Références bibliographiques

Bibliographie

- [1] Muhammad H. Rashid, J. David Irwin, «Power electronics Handbook. University of West Florida Joint Program and Computer Engineering», 2001.
- [2] <http://www.lechodusolaire.fr/hebdo>, les professionnels du photovoltaïque. Consulté le 06/07/2020.
- [3] Synergrid. Prescriptions techniques spécifiques de raccordement d'installations de production décentralisée fonctionnant en parallèle sur le réseau de distribution. Fédération des Gestionnaires de Réseaux électrique et Gaz en Belgique.
- [4] Annexe de l'arrêté du 30 décembre 1999 relatif aux conditions techniques de raccordement au réseau public de transport des installations de production d'énergie électrique de puissance installée inférieure ou égale à 120 MW, d'EDF en France.
- [5] L. Protin, S. Astier, « Convertisseurs photovoltaïques. Technique de l'Ingénieur », Réf. D3360, vol. DAB, 1997.
- [6] C. Fetha, « Analyse des indices de la qualité d'énergie électrique et les phénomènes transitoires dans les réseaux électriques ». Thèse de doctorat de l'université de Batna.
- [7] Cours en ligne GUIDEnR PHOTOVOLTAÏQUE, L'information photovoltaïque http://www.photovoltaique.guidenr.fr/II_1_constitution-module-photovoltaique.php. Consulté le 02/08/2020.
- [8] N. Oleksiy, « Simulation, Fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arriérés interagîtes », Institut national des science appliqués de Lyon, 2005.
- [9] A. Ovono Zué, A. Chandra, «State feedback linearization control of a grid connected photovoltaic interface with MPPT», Montreal, QC, Canada, 2009.
- [10] S. Petibon, « Nouvelles architectes distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009.
- [11] S.Ramirez, H.silva, «Control Design Techniques in power Electronics devices »,Springer, 2006.

[12] C. Wang, «Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems », Montana state university, Bozeman, Montana,2006.

[13] M. Deloizy, « Commande de machines asynchrones par un onduleur à thyristors GTO », Thèse de Doctorat de l'Université de Reims Champagne Ardenne,1990.

[14] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, «Power Converters and Control of Renewable Energy Systems », Zhe Chen Aalborg University, Institute of Energy Technology, Denmark,2011.

[15] Accès au réseau basse-tension pour les installations photovoltaïques, Conditions techniques et contractuelles du raccordement, EDF 2003.

Onduleur monophasé connecté au réseau pour les modules photovoltaïques

Résumé :

Ce travail présente une étude sur les systèmes photovoltaïques raccordée au réseau. Le but de cette manœuvre est d'obtenir une tension de 220V avec une fréquence de 50Hz pour l'injecter au réseau.

On a effectué l'étude du fonctionnement du générateur photovoltaïque à sa puissance maximale en prenant compte des différentes contraintes (conditions météorologiques, stabilité du système). On a utilisé un hacheur survolteur commandé par la technique MPPT P&O dans le but d'améliorer le rendement de puissance du système, puis on l'a connecté à un onduleur monophasé commandé par une MLI afin d'obtenir une tension et une fréquence compatible à celles du réseau.

Plusieurs simulations ont été effectuées et interprétées par la suite qui montrent la validité et la robustesse de ces commandes.

Mots clés :

Photovoltaïque, MPPT, P&O, MLI, convertisseur DC-DC, convertisseur DC-AC, réseau électrique.

Single-phase grid-connected inverter for photovoltaic modules

Abstract :

This work presents a study on grid-connected photovoltaic systems. The aim of this operation is to obtain a voltage of 220V with a frequency of 50Hz to inject it to the grid.

The operation of the photovoltaic generator at its maximum power was studied taking into account the different constraints (meteorological conditions, stability of the system). A P&O MPPT-controlled booster converter was used to improve the power efficiency of the system and then connected to a single-phase PWM-controlled inverter in order to obtain a voltage and frequency compatible with the power grid.

Several simulations were carried out and interpreted subsequently which show the validity and robustness of these commands.

Keywords :

Photovoltaic, MPPT, P&O, PWM, DC-DC converter, DC-AC converter, power grid.