

JE dédie ce travail :

- À mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien inconditionnel, moral et financier, ses encouragements, et pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions.
- À mes frères Imad et Aymen, ma sœur Sabrina et son mari Hamza.
- À toute la famille Merah et Maassoum.
- À tout(es) mes cher(es) ami(es) surtout Amine DELLALI, mon binôme Zakaria, Farouk, Hamid, Mehdi, Hichem, Abdellah, Adel, Yacine, Amine.B, Sid Ahmed, Charef, Anouar, Reda, Riad, Khaled, Amir ...
- À tous mes collègues d'études surtout ceux D'électrotechnique, d'Injaz El Djazair et tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant.

Mohamed Merah
Tlemcen, le 16 juin 2015

JE dédie ce travail :

- À mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien inconditionnel, moral et financier, ses encouragements, et pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions.
- À mes frères Abd El Ilah et choaib soliman, mes sœurs Khadidja, et Fatima et son mari Abd Lah.
- À toute la famille Hagani et Alouane ,Ben Amer et Ben Moussa.
- À tout(es) mes cher(es) ami(es) surtout Amine DELLALI, mon binôme Mohamed, Farouk, Hamid, Mehdi, Hichem, Abdellah, Adel, Yacine, , Khaled ,amin ...

Mohamed Zakaria Kari
Tlemcen, le 16 juin 2015

Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

. Avant tout nous remercions Allah pour nous avoir donné ce bien et de nous avoir permis de vivre ce jour, d'avoir la force et la patience pour terminer ce travail.

Nous tenons à remercier tout particulièrement Mr L. BAGHLI, qui nous a encadré tout au long de ce travail, pour sa disponibilité et ses conseils avisés qui nous ont permis de mener à bien ce projet de fin d'étude.

Nous tenons également à remercier Mr S.M. MELIANI, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

Nos vifs remerciements vont à nos examinateurs; Mr A.BOUMEDIENE et Mr B.BENYAHIA de l'Université d'Abou Beker Belkaid, pour avoir accepté d'être examinateurs de ce travail. Nous tenons également à remercier l'entreprise ALPV de Tlemcen, pour nous avoir prêté le panneau photovoltaïque pour réaliser ce modeste projet.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Mohamed Merah
Mohamed Zakaria Kari
Tlemcen, le 16 juin 2015

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	v
GLOSSAIRE	vi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I ÉTAT DE L'ART SUR LES GTI	3
I.1 INTRODUCTION	5
I.2 ÉTAT DE L'ART SUR LES GTI	5
I.2.1 Définition	5
I.2.2 Historique	6
I.3 LES TECHNOLOGIES DES GTI	7
I.3.1 Onduleurs modulaires (module inverter)	7
I.3.2 Onduleurs centralisés (central inverter)	7
I.3.3 Onduleurs "String" ou de rangée	7
I.3.4 Onduleurs "Multi-String" ou plusieurs rangés	8
I.4 LES DIFFÉRENTS TYPES DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES	10
I.4.1 Structure générale d'un système photovoltaïque	10
I.4.2 Systèmes PV connecté directement au réseau	10
I.4.2-a Structure à convertisseur unique	10
I.4.2-b Structure avec bus à basse tension alternative	11
I.4.3 Système à bus continu intermédiaire	12
I.4.3-a Structure avec convertisseur forward	12
I.4.3-b Structure avec convertisseur de type fly-back	12
I.4.3-c Structure avec hacheur et onduleur	13
I.4.4 Les systèmes PV connectés au réseau sans batterie de stockage	13
I.4.5 Les systèmes PV connectés au réseau avec batterie	14
I.5 TOPOLOGIES DES SYSTÈMES PV	15
I.5.1 Topologie avec onduleur central (Central-plant inverter)	15
I.5.2 Topologie avec onduleur de rangé (string inverter)	16
I.5.3 Topologie avec onduleur Multiple-string	16

I.5.4	Topologie avec onduleur modulaire (Module-integrated inverter)	17
I.6	CARACTÉRISTIQUES DES ONDULEURS COMPATIBLES AVEC LE RÉSEAU	17
I.7	PROBLÈME DE CONNEXION DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES AU RÉSEAU	18
I.8	CONDITIONS TECHNIQUES D'INTERCONNEXIONS	18
I.8.1	Raccordement	18
I.8.2	Jugement de conformité	18
I.8.3	Accord de raccordement	19
I.8.4	Dispositif de coupure	19
I.8.5	Dispositif de protection	19
I.8.6	Couplage	20
I.8.7	Compensation avec Batteries de condensateurs	20
I.8.8	Harmoniques et inter harmoniques	20
I.8.9	Protection contre l'injection de courant continu	21
I.9	CONCLUSION	21
II	CONCEPTION ET MODÉLISATION D'UN GTI	22
II.1	INTRODUCTION	24
II.2	LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE :	24
II.2.1	Le principe de fonctionnement :	25
II.2.2	Les différents types des cellules solaires (cellules photovoltaïque) :	26
II.3	MODULE PHOTOVOLTAÏQUE :	27
II.3.1	Les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque :	28
II.3.1-a	La puissance crête	28
II.4	ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE	31
II.4.1	Électronique de puissance et la conversion électrique :	31
II.4.2	Convertisseurs électriques :	31
II.4.3	Les Interrupteurs :	32
II.4.4	Optocoupleur :	33
II.5	LES HACHEURS :	34
II.5.1	Exigences de l'utilisateur	34
II.5.2	Les types des hacheurs :	35
II.5.2-a	Hacheur Buck	35
II.5.2-b	Hacheur boost	37
II.5.2-c	Hacheur Buck-Boost	41
II.6	LES ONDULEURS	42
II.6.1	Les types des onduleurs :	43
II.6.2	Onduleur Monophasé	44
II.6.2-a	Onduleur de tension monophasé en demi-pont	44
II.6.2-b	Onduleur de tension monophasé en pont	44
II.6.3	Onduleur triphasé :	45
II.7	LA COMMANDE MLI	46
II.8	LE TRANSFORMATEUR	48

II.8.1	Le principe de fonctionnement :	48
II.9	LA SIMULATION DES DIFFÉRENTES PARTIES D'UN GTI :	50
	Remarque	50
II.9.1	La simulation du panneau photovoltaïque :	50
II.9.2	La simulations du système (panneau+hacheur) :	51
II.9.3	La simulation de l'onduleur :	52
II.10	CONCLUSION :	53
III	DESCRIPTION DE LA PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE	54
III.1	INTRODUCTION	55
III.2	PRÉSENTATION DE LA CARTE EXPÉRIMENTALE	55
III.3	LE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE	57
III.3.1	Le condensateur d'entrée	57
III.4	LE HACHEUR BOOST ENTRELACÉ	57
III.4.1	Détermination des paramètres du Hacheur [12]	59
III.4.2	Application numérique	60
III.5	L'ONDULEUR DE TENSION	61
III.5.1	L'inductance	61
III.5.2	Calcul de la puissance active P et la puissance réactive Q	62
III.5.2-a	Imposition de P_o et Q_o	63
III.6	LE MICROCONTRÔLEUR	64
III.7	ACQUISITION DES TENSIONS ET LEURS MESURES	64
III.7.1	La tension du réseau (V_r)	64
	Calcul de V_1 :	65
	Calcul de V_2 :	65
	Calcul de V_+ :	66
	Calcul de V_- :	66
III.7.2	La tension V_c du hacheur	67
III.8	LE TRANSFORMATEUR DE TENSION	68
III.9	CONCLUSION	68
	CONCLUSION GÉNÉRALE	70
	BIBLIOGRAPHIE	74
	ANNEXE A : LE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE ALPV	1
	ANNEXE B : SCHÉMA DE SIMULATION DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE ALPV 230W	2
	ANNEXE C : SCHÉMA DE SIMULATION DU HACHEUR BOOST ENTRELACÉ	3
	ANNEXE D : SCHÉMA DE SIMULATION DE L'ONDULEUR DE TENSION EN PONT	4

ANNEXE E : SCHÉMA ÉLECTRIQUE GLOBAL DE LA CARTE EXPÉ-
RIMENTALE

5

TABLE DES FIGURES

I.1	Un modèle d'un GTI commercialisé en Europe	6
I.2	Classification des onduleurs PV connectés au réseau [9]	8
I.3	Les différentes technologies des GTI	9
I.4	Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur [31]	11
I.5	Bus à basse tension alternative [31]	11
I.6	Convertisseur de type forward alimentant le bus continu [31]	12
I.7	Structure avec convertisseur de type fly-back [31]	13
I.8	Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé [31]	13
I.9	Système PV connecté au réseau sans batterie de stockage [6]	14
I.10	Système PV connecté au réseau avec batterie [6]	15
I.11	Onduleur central (Central-plant inverter) [15]	16
I.12	Hacheur (Multiple-string DC-DC) et l'onduleur [21]	16
I.13	Onduleur Multiple-string [21]	17
I.14	Onduleur modulaire (Module-integrated inverter) [21]	17
II.1	Structure basique d'une cellule solaire.	25
II.2	Module photovoltaïque.	26
II.3	Module photovoltaïque.	27
II.4	Le câblage des cellules dans un module.	28
II.5	Exemple de caractéristique courant-tension d'un module.	28
II.6	La caractéristique $I = f(v)$ en fonction de l'éclairement[15]	29
II.7	La caractéristique $P = f(v)$ en fonction de l'éclairement	29
II.8	La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température [15]	30
II.9	La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température[15]	30
II.10	Diagramme puissance-fréquence des composants	32
II.11	Classification des différents composants	33
II.12	Optocoupleur 4N33	33
II.13	Symbole d'un convertisseur DC-DC	34
II.14	Schéma électrique d'un hacheur buck	36
II.15	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck	37
II.16	Schéma électrique d'un hacheur boost	37
II.17	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost	38
II.18	<i>ondulation du courant d'inductance</i>	39
II.19	Ondulation du courant de condensateur	40
II.20	Schéma du hacheur boost entrelacé	41
II.21	Schéma de courants I_{L1} , I_{L2} et I_{PV}	41
II.22	Schéma électrique d'un hacheur buck- boost	42

II.23 Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur buck-boost.	43
II.24 Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont. . .	44
II.25 Schéma de Principe d'un Onduleur de tension Monophasé En Pont.	45
II.26 Les trois configurations possibles.	45
II.27 Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont	46
II.28 Schéma de principe de la MLI	47
II.29 L'allure de la tension de la sortie d'onduleur	47
II.30 PWM aligné au centre	48
II.31 L'allure de tension de sortie de l'onduleur	48
II.32 Le transformateur monophasé	49
II.33 transformateur monophasé CHNT NDK-250	49
II.34 Caractéristique courant-tension et puissance-tension	50
II.35 Caractéristique courant-tension et puissance-tension	51
II.36 Caractéristique courant-tension et puissance-tension.	51
II.37 L'allure du courant I_c la sortie du hacheur entrelacé.	52
II.38 L'allure de la tension V_c de la sortie du hacheur entrelacé. . . .	52
II.39 l'allure de la tension fondamentale de sortie d'onduleur	52
II.40 l'allure de la tension de la sortie d'onduleur	53
III.1 Représentation schématique du dispositif expérimental	55
III.2 Schéma synoptique du dispositif expérimental	56
III.3 Le hacheur Boost Interleave	58
III.4 MOSFET IRF530	58
III.5 L'optocoupleur HCPL 3120	59
III.6 L'onduleur de tension L298	61
III.7 L'allure de $v_r(t), v_o(t)$ et le déphasage δ	62
III.8 La maille entre $v_r(t)$ et $v_o(t)$	62
III.9 Schéma synoptique du principe d'envoi de la puissance active et la puissance réactive	63
III.10 Diagramme des pins du dsPIC33FJ32MC202	64
III.11 Le montage additionneur avec l'AOP MCP6002	65
III.12 Les allures de V_1 et V_2	67
III.13 L'allure de V_s	67
III.14 Le montage suiveur avec l'AOP MCP6002	68
15 Schéma de simulation du panneau photovoltaïque ALPV 230W	2
16 Schéma de simulation du hacheur boost entrelacé	3
17 Schéma de simulation de l'onduleur de tension en pont	4
18 Schéma électrique global de la carte expérimentale	5

Glossaire

Acronyme	Signification
PV	Panneau photovoltaïque
GTI	Grid-Tie Inverter
MPPT	Maximum Power Point Tracking
BOS	Balace of System
DC	Direct Current (Courant Continu)
AC	Alternatif Current (Courant Alternatif)
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PWM	Pulse Width Modulation
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolaire à grille isolée)
DSP	Digital Signal Processor
AOP	Amplificateur opérationnel
PCB	Printed Circuit Board
CPCR	Centrale Photovoltaïque Connectée au Réseau
MT	Moyenne Tension
BT	Basse Tension
MOSFET	Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor
F.E.M	Force Électro-Magnétique

Introduction générale

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de dix années, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an [13].

Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution d'électricité, se traduit évidemment par d'importantes innovations technologiques et une baisse de coût des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des systèmes photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système.

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, l'un des objectifs que doit réaliser l'onduleur connecté au réseau, est le contrôle du courant issu du champ de modules photovoltaïques et de la puissance injectée au réseau suivant les normes en vigueur. De ce fait, les spécifications standards servant à la conception d'un onduleur connecté concerneront la puissance nominale, la tension nominale du réseau, la tension maximale du DC-bus, le contrôle de l'onduleur etc. [16].

Certains aspects peuvent apporter des améliorations significatives dans la conception et la réalisation pratique des onduleurs connectés au réseau, à savoir le contrôle de la puissance, le contrôle du facteur de puissance, la réduction du taux de la distorsion harmonique, l'élimination de la composante continue du courant injecté au réseau et surtout l'utilisation du contrôle digital.

La plupart des systèmes de contrôle sont basés sur l'emploi et l'utilisation des dispositifs de type microprocesseur, principalement DSP «Digital Signal Processing» ou l'utilisation d'un hardware spécifique FPGA «Field Programmable Gate Array» en exploitant les caractéristiques liées au hardware spécifique, spécialement la

concurrence, la flexibilité, la reconfiguration et la vitesse de traitement. De ce fait, le contrôle implémenté à base du hardware spécifique propose d'exploiter la simplicité, en recherchant les opérations les plus élémentaires, à une fréquence élevée [27].

Les onduleurs connectés doivent répondre aux exigences suivantes :

1. Assurer une connexion optimale à partir des modules photovoltaïques, tout en prenant soin du fonctionnement de l'onduleur.
2. Améliorer le rendement du contrôle de l'onduleur connecté par rapport aux techniques obtenues actuellement dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.
3. Améliorer la qualité de la puissance électrique générée et injectée.

SOMMAIRE

I.1	INTRODUCTION	5
I.2	ÉTAT DE L'ART SUR LES GTI	5
I.2.1	Définition	5
I.2.2	Historique	6
I.3	LES TECHNOLOGIES DES GTI	7
I.3.1	Onduleurs modulaires (module inverter)	7
I.3.2	Onduleurs centralisés (central inverter)	7
I.3.3	Onduleurs "String" ou de rangée	7
I.3.4	Onduleurs "Multi-String" ou plusieurs rangés	8
I.4	LES DIFFÉRENTS TYPES DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES	10
I.4.1	Structure générale d'un système photovoltaïque	10
I.4.2	Systèmes PV connecté directement au réseau	10
I.4.3	Système à bus continu intermédiaire	12
I.4.4	Les systèmes PV connectés au réseau sans batterie de stockage	13
I.4.5	Les systèmes PV connectés au réseau avec batterie	14
I.5	TOPOLOGIES DES SYSTÈMES PV	15
I.5.1	Topologie avec onduleur central (Central-plant inverter)	15
I.5.2	Topologie avec onduleur de rangé (string inverter)	16
I.5.3	Topologie avec onduleur Multiple-string	16
I.5.4	Topologie avec onduleur modulaire (Module-integrated inverter)	17
I.6	CARACTÉRISTIQUES DES ONDULEURS COMPATIBLES AVEC LE RÉ- SEAU	17
I.7	PROBLÈME DE CONNEXION DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES AU RÉSEAU	18
I.8	CONDITIONS TECHNIQUES D'INTERCONNEXIONS	18
I.8.1	Raccordement	18
I.8.2	Jugement de conformité	18
I.8.3	Accord de raccordement	19
I.8.4	Dispositif de coupure	19
I.8.5	Dispositif de protection	19
I.8.6	Couplage	20
I.8.7	Compensation avec Batteries de condensateurs	20
I.8.8	Harmoniques et inter harmoniques	20
I.8.9	Protection contre l'injection de courant continu	21
I.9	CONCLUSION	21

Dans ce premier chapitre, nous faisons un état de l'art sur les GTI (onduleur photovoltaïques reliés au réseau électrique) ainsi une étude descriptive générale des systèmes GTI est présentée. Cette étude comprend : la conception des systèmes photovoltaïques, leurs types, les problèmes produits, les techniques et les conditions des normes d'interconnexions.

I.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 [9].

I.2 État de l’art sur les GTI

I.2.1 Définition

Comme pour un onduleur dans une installation photovoltaïque autonome, un GTI (ou onduleur photovoltaïque connecté au réseau) a pour principe de transformer une tension continue en une tension alternative, mais dans ce cas avec une fréquence et une valeur équivalentes à celle du réseau. Les différences essentielles sont que l’onde sera obligatoirement sinusoïdale et que cette tension alternative qui va « charger » le réseau, devra se mettre en phase avec ce dernier et répondre à un ensemble de prescriptions et d’impératifs de sécurité plus contraignants (Figure I.1).

Les onduleurs couplés au réseau utilisent deux techniques de génération du signal alternatif :

- Soit la sinusoïde est produite par l’onduleur qui utilise le passage par zéro du réseau pour se synchroniser.
- Soit le réseau est utilisé comme source du signal et de synchronisation.

Certains onduleurs utilisent un transformateur pour isoler les panneaux photovoltaïques du réseau. D’autres, possède un système de test en continu du courant délivré par les panneaux. En cas de fuite, l’onduleur s’arrête pour éviter tout court-circuit entre les panneaux et le réseau.

Comme pour les onduleurs les plus sophistiqués dans une installation autonome, les Grid-Tie Inverter sont de type MPPT (Maximum Power Point Tracking) et leur microprocesseur peut faire varier le point de puissance maximale du générateur en direction de la tension ouverte et ainsi limiter la puissance à l’entrée. Un onduleur n’a pas un rendement constant. Il est plus efficace aux trois-quarts de sa puissance maximale, et moins efficace à faible puissance.

Chaque onduleur utilise pour son fonctionnement interne, une certaine quan-

tité d'énergie fournie, soit par les panneaux photovoltaïques, soit par le réseau ce qui contribue à influencer les pertes de rendement annuelles.

Pour la sécurité du système, les compagnies d'électricité exigent en général une surveillance de la tension et de la fréquence produites et une coupure très rapide en cas d'absence de réseau. La limitation d'une puissance donnée implique une limitation du courant produit.



FIGURE I.1 – Un modèle d'un GTI commercialisé en Europe

I.2.2 Historique

Grâce à l'espace, les panneaux solaires ont prouvé leur fiabilité. Le coût de production des cellules solaires a également diminué. L'énergie solaire a eu un élan au cours de la crise de l'énergie dans les années 1970. Quand le prix du pétrole a augmenté de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques ont commencé à être utilisés pour la première fois dans les maisons. Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement. Pendant longtemps, ils ont été considérés comme des sources d'énergies alternatives.

La fin des années 70 provoqua une impulsion, mais les panneaux solaires viables pour les consommateurs n'arrivèrent que 10 ans plus tard, au début des années 1990. Le premier obstacle était de trouver une méthode efficace pour stocker et transférer l'électricité. Un panneau solaire produit du courant continu, et nos maisons fonctionnent avec du courant alternatif. Un onduleur pouvait assurer la conversion, mais l'électricité reste cependant plus facilement stockée sous forme de courant continu. Les batteries au lithium-ion fournirent une méthode de stockage viable, en plaçant les batteries avant l'onduleur dans le système, elles stock le courant continu qui ne sera convertit qu'une seule fois par la suite. C'est important car chaque conversion du courant continu au courant alternatif ou à l'inverse, provoque une perte de puissance de 10%. Cette perte a été réduite dans les années qui ont suivi, c'est un autre élément important de la viabilité des panneaux solaires. Ainsi, la batterie de stockage était opérationnel, et le système de conversion également.

Il ne restait plus qu'à diminuer le coût de fabrication car, jusque là, les panneaux solaires n'étaient pas encore rentable pour le particulier.

I.3 Les technologies des GTI

L'onduleur couplé au réseau ou le (Grid-Tie Inverter) 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 [30].

I.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 [9].

I.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 [9].

I.3.3 Onduleurs "String" ou de rangée

L'onduleur PV connecté en série 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. Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String (par ex ABB PVS 300 [9]).

I.3.4 Onduleurs "Multi-String" ou plusieurs rangés

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.

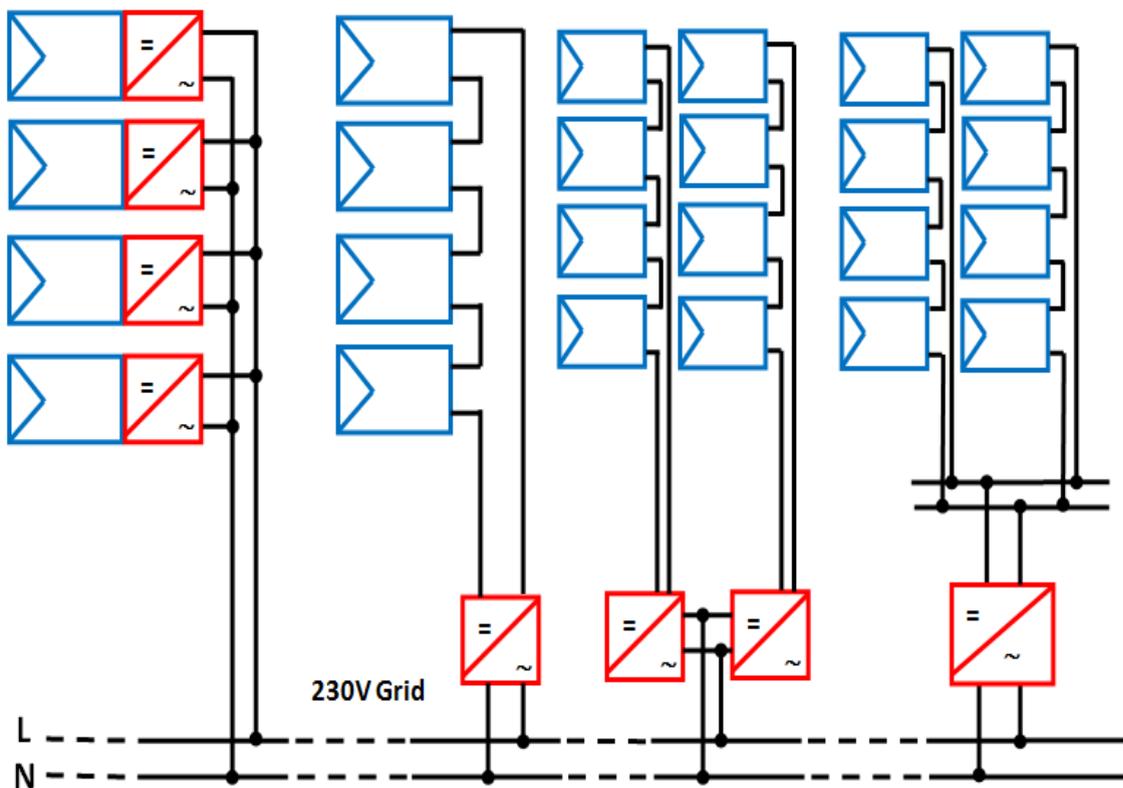


FIGURE I.2 – Classification des onduleurs PV connectés au réseau [9]

Ci-dessous un tableau de synthèse résumant le type d'onduleur à privilégier suivant ces paramètres.

Type	Description	Paramètres	Avantages
Onduleur centralisé	<ul style="list-style-type: none"> • un onduleur pour la totalité du générateur • utilisation d'un boîtier de raccordement entre le générateur et l'onduleur 	<ul style="list-style-type: none"> • pour les montages combinant branchement en série et en parallèle • flux lumineux identique pour tous les modules 	<ul style="list-style-type: none"> • faibles tolérances de puissance entre les modules • possibilité de grimper à une puissance de plusieurs MW • installation possible de parafoudres dans le BRG
Onduleurs « String »	<ul style="list-style-type: none"> • modules branchés en série dans un string (rangée) • un onduleur pour chaque string 	<ul style="list-style-type: none"> • flux lumineux différents entre les rangées • rangées branchées au réseau via son onduleur 	<ul style="list-style-type: none"> • MPP tracking personnalisé pour chaque rangée • adaptés pour les rangées à degrés d'inclinaison différents • pas besoin de BRG • tolérance aux intensités différentes de luminosité entre les rangées • adaptés aux installations de grande puissance
Onduleurs « Multi string »	<ul style="list-style-type: none"> • association d'onduleurs centralisés et « string » • onduleur centralisé du côté du côté du branchement au réseau • onduleur string du côté des générateurs 	<ul style="list-style-type: none"> • types de modules différents • orientations de modules variées • ombres partielles sur l'installation • nombre de modules différents par rangée 	<ul style="list-style-type: none"> • meilleur rendement que pour un onduleur centralisé grâce à la possibilité d'un MPP tracking pour chaque rangée • modularité de l'installation
Onduleur modulaire	<ul style="list-style-type: none"> • branchement direct des modules sur le réseau • un onduleur pour chaque module • ou l'onduleur est directement installé sur le module en usine 	<ul style="list-style-type: none"> • pour les installations de petite puissance 	<ul style="list-style-type: none"> • pas de câblage de courant continu • un module ombragé n'influe pas sur le reste de l'installation

FIGURE I.3 – Les différentes technologies des GTI

I.4 Les différents types des systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants. Cet ensemble, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, les câblages, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif [31].

I.4.1 Structure générale d'un système photovoltaïque

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque [31] :

- 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.

I.4.2 Systèmes PV connecté directement au réseau

I.4.2-a Structure à convertisseur unique

Le dispositif présenté par la (figure I.4) est le plus simple, car il comporte le moins de composants possibles.

On associe plusieurs modules photovoltaïques en sérié pour obtenir une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur de tension. La tension continue obtenue alimente directement un onduleur central, qui fournit la tension sinusoïdale désirée (230 V).

Il pourrait être avantageux d'insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque du réseau.

L'inconvénient majeur de ce dispositif est l'arrêt total et immédiat de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur. De plus, le contrôle du point de puissance maximum de la puissance est voisin, car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences de structure interne et d'ensoleillement [31].

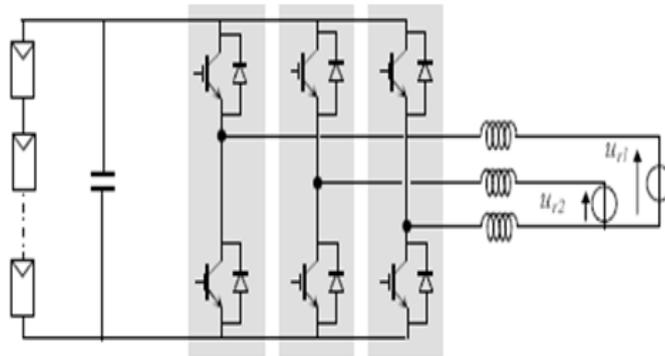


FIGURE I.4 – Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur [31]

I.4.2-b Structure avec bus à basse tension alternative

La (figure I.5) montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connecté au module photovoltaïque. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (220 V 50 Hz, exemple du schéma) vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré.

Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puisqu'il assure la sécurité des personnels. Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes joules. Il y a un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternatif. D'une part, il faut que sa valeur crête soit inférieure à celle délivrée par les modules (même avec un faible ensoleillement). D'autre part, une tension faible dans ce bus diminue le rendement [31].

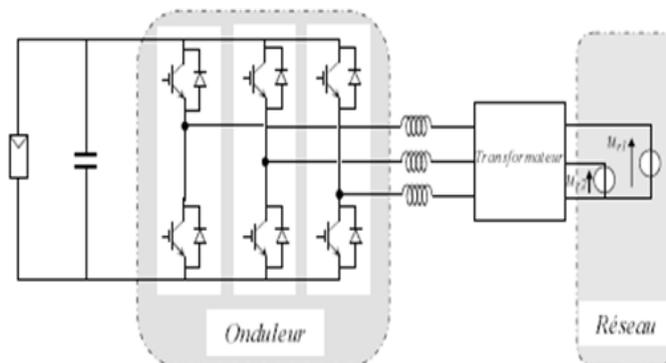


FIGURE I.5 – Bus à basse tension alternative [31]

I.4.3 Système à bus continu intermédiaire

I.4.3-a Structure avec convertisseur forward

La (figure I.6) présente un convertisseur forward qui est capable d'augmenter la tension en série du module photovoltaïque jusqu'à 350 V (tension désirée). L'utilisation d'un transformateur pour la connexion au réseau n'est donc pas nécessaire, la conversion continu-alternative se fait de façon relativement simple, grâce à un onduleur centralisé.

Les inconvénients majeurs de ce montage sont [31] : la capacité doit être relativement importante, à cause des ondulations du courant en sortie du module. Le bus continu supportera un signal en créneau qui induira une grande émission d'ondes électromagnétiques et éventuellement des pertes de fuite ; l'induction du transformateur compris dans le convertisseur générera des pertes de fuite. La tension élevée qui traverse le bus continu réduit la sécurité du personnel d'entretien.

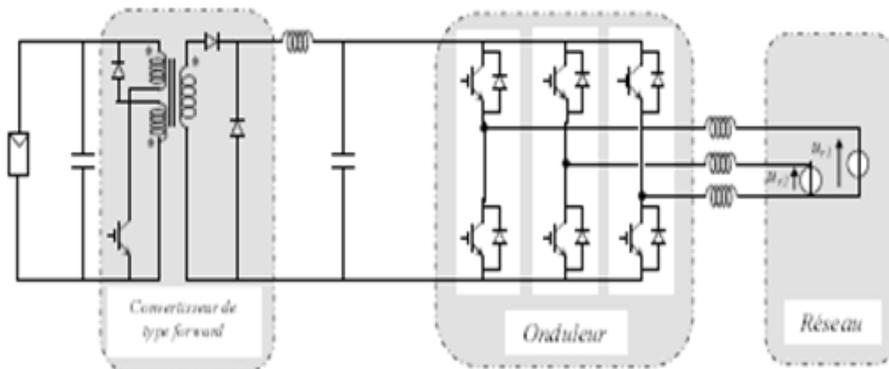


FIGURE I.6 – Convertisseur de type forward alimentant le bus continu [31]

I.4.3-b Structure avec convertisseur de type fly-back

La (figure I.7) montre une structure à base d'un convertisseur de type fly-back qui élève la tension sortie du module photovoltaïque au niveau de tension désirée. La caractéristique principale du fly-back se situe au niveau du transformateur qui agit comme l'inducteur principal et qui assure l'isolation galvanique. Le hacheur est contrôlé pour obtenir un maximum d'énergie du module photovoltaïque et l'onduleur assure une tension constante et le transfert de puissance vers le réseau. L'inconvénient du transformateur est qu'il génère des pertes et qui augmente le coût de l'installation [31].

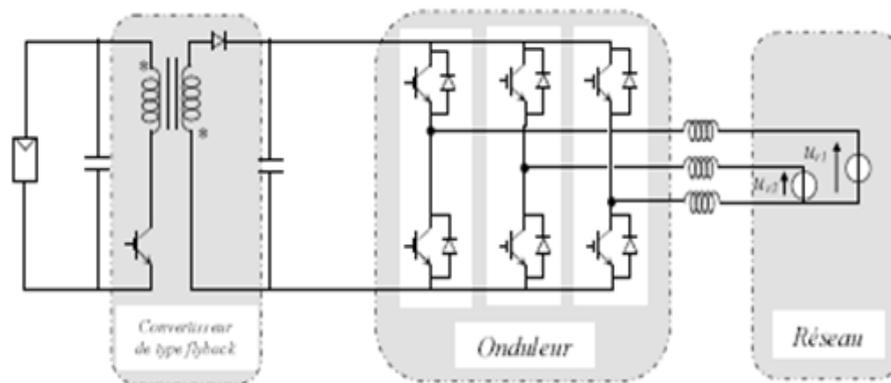


FIGURE I.7 – Structure avec convertisseur de type fly-back [31]

I.4.3-c Structure avec hacheur et onduleur

La (figure I.8) représente un hacheur qui élève la tension en sortie du module photovoltaïque en une tension de (100 V) délivrée sur le bus continu. Avec le hacheur, il est difficile d'élever la tension en sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale, puis un transformateur pour élever cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie " production " et la partie " utilisation ". L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome. Le courant d'entrée est relativement lisse, c'est pour cela que la capacité peut être faible [31].

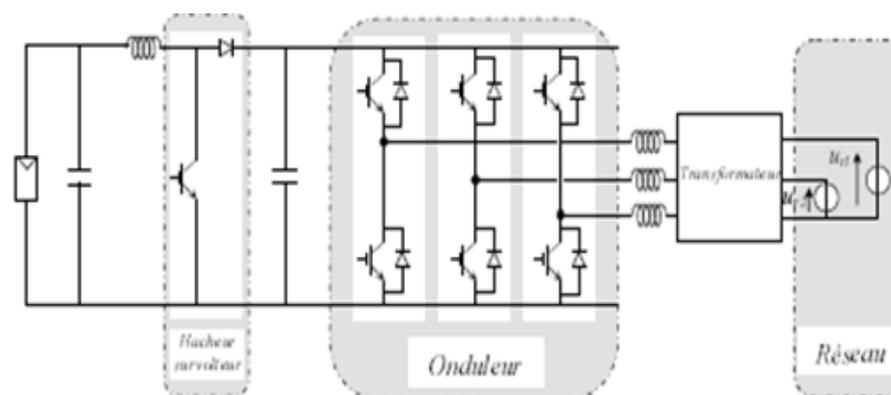


FIGURE I.8 – Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé [31]

I.4.4 Les systèmes PV connectés au réseau sans batterie de stockage

Ces systèmes sont ainsi conçus pour fonctionner en parallèle et en interconnexion avec le réseau public d'électricité (figure I.9).

Le principal composant de ce type de système est l'onduleur. Il convertit la puissance continue (DC) obtenue à partir des modules PV en puissance alternative en respectant les conditions de qualité de la tension et de la puissance exigées par le réseau, avec une possibilité d'arrêt automatique quand le réseau n'est pas en fonctionnement.

Une interface bidirectionnelle est placée entre la sortie alternative du système PV et le réseau constitué par un panneau de distribution. Cela permet de produire une puissance alternative à partir du système PV soit en alimentant directement toutes les charges électriques, soit en injectant le surplus d'électricité (PV) dans le réseau lorsque les besoins sont plus importants. La nuit ou par faible ensoleillement durant les périodes où les besoins des consommateurs sont supérieurs à la production (PV), le réseau fournit l'appoint nécessaire, l'équilibre énergétique peut être ainsi obtenue.

Lorsque le réseau est à l'arrêt, le système (PV) est automatiquement coupé et déconnecté du réseau à partir du panneau de distribution. Ce facteur de sécurité supplémentaire est exigé pour s'assurer que la centrale (PV) est coupée du réseau lorsque celui-ci est hors service pour raison de maintenance ou autre (cette fonction est appelée îlotage ou islanding) [6].

La maintenance des (CPCR) fonctionnant sans batterie, est particulièrement facile : elle se résume à la vérification de l'état de propreté des modules (PV).

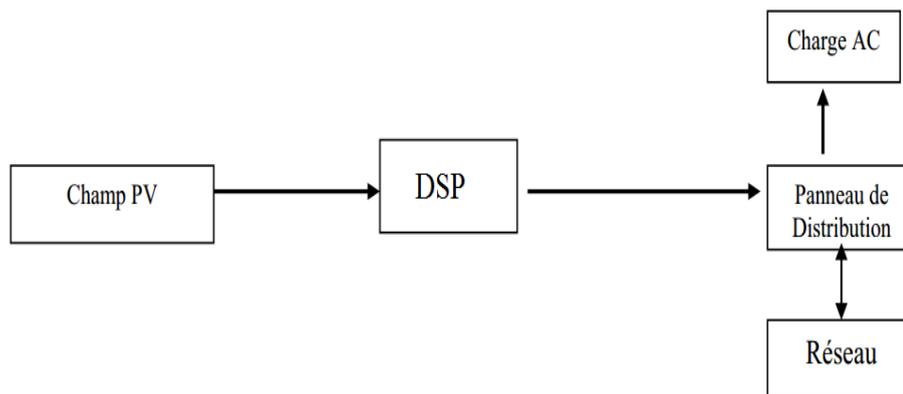


FIGURE I.9 – Système PV connecté au réseau sans batterie de stockage [6]

I.4.5 Les systèmes PV connectés au réseau avec batterie

Ce type de système est utilisé généralement lorsqu'une puissance supplémentaire est nécessaire pour alimenter des charges critiques telles que la réfrigération, les pompes à eau, l'éclairage ou autres (figure I.10) [6].

Dans des circonstances normales, le système fonctionne en mode relié au réseau

en alimentant toutes les charges ou en renvoyant la puissance en surplus sur le réseau tout en maintenant la batterie en pleine charge.

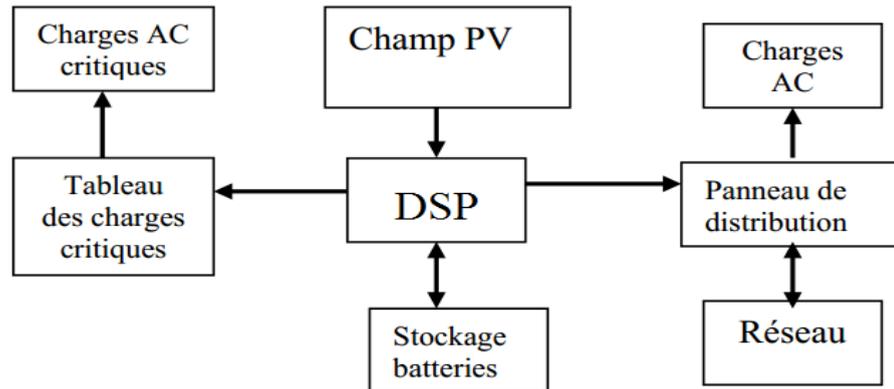


FIGURE I.10 – Système PV connecté au réseau avec batterie [6]

I.5 Topologies des Systèmes PV

Les convertisseurs utilisés doivent être utiles et compatibles pour le traitement de puissance et la synchronisation avec la puissance de service.

En général, quatre topologies de système PV connecté au réseau sans batterie de stockage sont identifiées, leurs configurations ont été conçues comme suit [21] :

- Topologie avec onduleur central (Central-plant inverter)
- Topologie avec onduleur de rangé (string inverter)
- Topologie avec onduleur Multiple-string
- Topologie avec onduleur modulaire (Module-integrated inverter)

I.5.1 Topologie avec onduleur central (Central-plant inverter)

Dans les onduleurs centraux, habituellement on utilise un grand onduleur pour convertir la puissance du côté (DC-DC) des modules (PV) à une puissance (AC) sur le côté alternatif. Dans ce système, les modules de (PV) sont en série pour former un panneau, et plusieurs de ces panneaux sont reliés en parallèle au hacheur [21]. Le schéma bloc d'un tel arrangement est donné par la (figure I.11) :

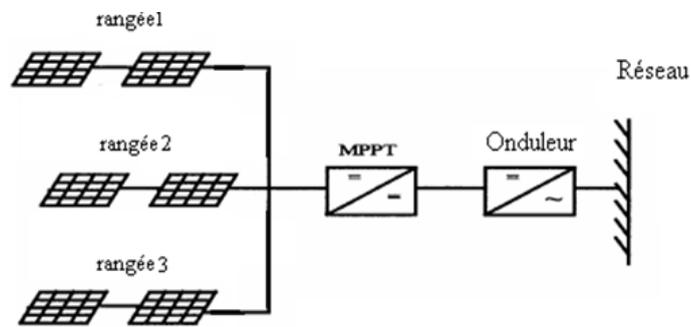


FIGURE I.11 – Onduleur central (Central-plant inverter) [15]

I.5.2 Topologie avec onduleur de rangé (string inverter)

Le schéma du montage est donné par la (figure I.12) , Dans le multiple-string du convertisseur (DC-DC), chaque hacheur boost possède un transformateur qui assure l'isolation galvanique et un lien de conversion commun (DC-DC) [21].

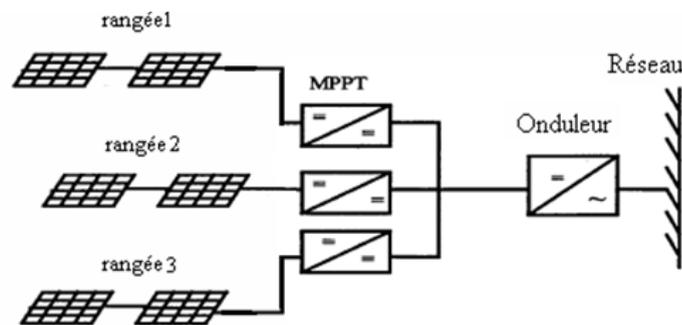


FIGURE I.12 – Hacheur (Multiple-string DC-DC) et l'onduleur [21]

I.5.3 Topologie avec onduleur Multiple-string

La (figure I.13) montre le schéma fonctionnel d'un système de conversion de multiple convertisseur (multiple-string). Il se comporte d'un ensemble de modules reliés en série du côté (DC), et la conversion individuelle de la puissance de (DC) en (AC) est assurée par un petit onduleur.

Beaucoup de tels onduleurs sont reliés en parallèle du côté (AC). Cet arrangement n'est pas affecté en ombrageant des panneaux. Il n'est pas aussi sérieusement affecté par l'échec de l'onduleur [21].

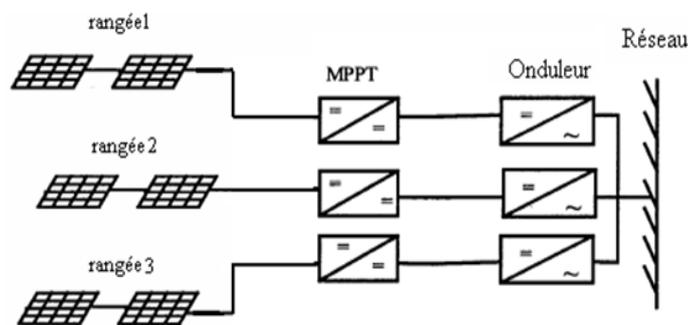


FIGURE I.13 – Onduleur Multiple-string [21]

I.5.4 Topologie avec onduleur modulaire (Module-integrated inverter)

Dans les systèmes d'onduleur modulaire de la (figure I.14), chaque module photovoltaïque aura un petit onduleur (typiquement 50W à 300W) et aucun câblage n'est requis. On prévoit de petits onduleurs pour réduire le coût [21].

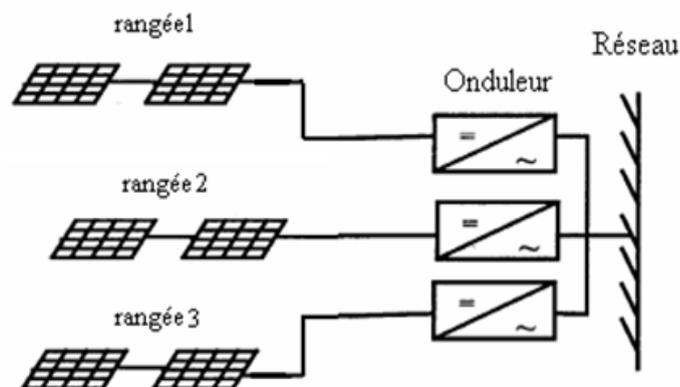


FIGURE I.14 – Onduleur modulaire (Module-integrated inverter) [21]

I.6 Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau

Les critères de compatibilité de l'onduleur avec le réseau sont [21] :

- Le temps de réponse
- Le facteur de puissance
- La commande de fréquence.
- Le rendement harmonique.
- La synchronisation.
- La contribution de courant de défaut.
- L'injection de courant continu.
- La protection.

I.7 Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau

- Le débrogage 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.

I.8 Conditions techniques d'interconnexions

Les conditions techniques d'interconnexion au réseau électrique sont [34], [8] :

I.8.1 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 basse tension, la puissance totale des productions décentralisées ne doit pas dépasser la puissance du transformateur moyenne tension / basse tension (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.8.2 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.8.3 Accord de raccordement

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

I.8.4 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.

Lorsque la puissance de l'installation de production décentralisée est < 10 kW, la coupure de sécurité peut éventuellement être réalisée pour chaque unité de production, par un système automatique de sectionnement. Les installations photovoltaïques < 5 kW doivent être pourvues de ce système automatique.

I.8.5 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 technicité. 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.8.6 Couplage

Une mise en parallèle de l'installation de production décentralisée avec le réseau public de distribution est toujours réalisée au moyen d'un relais synchro-check équipé d'un synchronoscope pour des installations avec une puissance supérieure à 10 kW.

Lors de la connexion en 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%. Si la connexion en parallèle se répète plusieurs fois par jour, les variations brusques de tension dues à la connexion parallèle seront limitées aux mêmes valeurs que celles requises pour le fonctionnement et définies dans le paragraphe suivant. Pendant le fonctionnement, les variations brusques de la tension seront limitées en valeur relative à 3% au maximum et en fonction de leur fréquence d'apparition à des valeurs inférieures de façon à ne pas perturber les autres utilisateurs raccordés au réseau. Ces considérations impliquent que la production décentralisée qui fonctionne en îlotage ne peut être reconnectée au réseau qu'après vérification de la tension, de la fréquence et de l'écart de phase et qu'il ne peut pas être possible d'effectuer une prise en parallèle à un endroit non prévu, des verrouillages sont installés pour empêcher ces éventualités.

Après un déclenchement commandé par la protection de découplage, lorsque les conditions sont redevenues normales, la reconnexion au réseau peut se faire automatiquement à condition de disposer d'un système de synchronisation automatique. Ces automatismes font partie des aspects particuliers de la production décentralisée.

I.8.7 Compensation avec Batteries de condensateurs

S'il est fait usage de batteries de condensateurs, l'installation de production décentralisée sera pourvue, si nécessaire, de filtres destinés à éviter l'amortissement des signaux.

D'autre part, les condensateurs doivent être débranchés en même temps que l'engin de production. Si les conditions techniques le justifient, le gestionnaire du réseau peut imposer au producteur décentralisé le placement de condensateurs.

I.8.8 Harmoniques et inter harmoniques

Le niveau des harmoniques et inter harmoniques qui sont générés par l'installation de production décentralisée ne doit pas provoquer des perturbations 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.8.9 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 ne nécessitent par conséquent 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. Celui-ci débranche l'onduleur en moins de 0,2 s au cas où le courant continu dépasse la valeur de seuil établie à 1% du courant nominal.

I.9 Conclusion

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque et le récepteur à leur rendement optimal, nécessitent l'insertion des convertisseurs statiques entre le générateur et le récepteur.

Dans la littérature, plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ce premier chapitre a été consacré à l'introduction de quelques notions et définitions relatives aux systèmes photovoltaïques. Des informations au sujet de ces systèmes ont été décrites en donnant leur structure générale et en abordant les problèmes comportant l'interconnexion et les conditions standards d'interconnexion ou de raccordement.

Chapitre II

Conception et modélisation d'un GTI

SOMMAIRE

II.1 INTRODUCTION	24
II.2 LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE :	24
II.2.1 Le principe de fonctionnement :	25
II.2.2 Les différents types des cellules solaires (cellules photovoltaïque) :	26
II.3 MODULE PHOTOVOLTAÏQUE :	27
II.3.1 Les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque :	28
II.4 ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE	31
II.4.1 Électronique de puissance et la conversion électrique :	31
II.4.2 Convertisseurs électriques :	31
II.4.3 Les Interrupteurs :	32
II.4.4 Optocoupleur :	33
II.5 LES HACHEURS :	34
II.5.1 Exigences de l'utilisateur	34
II.5.2 Les types des hacheurs :	35
II.6 LES ONDULEURS	42
II.6.1 Les types des onduleurs :	43
II.6.2 Onduleur Monophasé	44
II.6.3 Onduleur triphasé :	45
II.7 LA COMMANDE MLI	46
II.8 LE TRANSFORMATEUR	48
II.8.1 Le principe de fonctionnement :	48
II.9 LA SIMULATION DES DIFFÉRENTES PARTIES D'UN GTI :	50
II.9.1 La simulation du panneau photovoltaïque :	50
II.9.2 La simulations du système (panneau+hacheur) :	51
II.9.3 La simulation de l'onduleur :	52
II.10 CONCLUSION :	53

Résumé

Dans ce chapitre on va étudier les cellules photovoltaïques et leurs types. Ainsi que quelques types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques : comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur entrelacé qui peut augmenter la tension de sortie du panneau en réduisant les ondulations du courant et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur) avec démonstration du rapport entre la tension d'entrée et de sortie de chaque convertisseur.

Les convertisseurs DC-AC tel que l'onduleur triphasé et l'onduleur en pont et en demi-pont vont être mentionnés dans ce chapitre avec la commande MLI.

La simulation des différentes parties tel que le panneau photovoltaïque, le hacheur survolteur entrelacé et l'onduleur en pont vont être conçues, réalisées et commentées.

II.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque. L'énergie électrique produite par le panneau photovoltaïque a besoin des convertisseurs afin de l'injecter dans un réseau électrique grâce à GTI.

Ces convertisseurs statiques ont un rôle très important dans un GTI. Il est préférable d'utiliser la puissance produite par le panneau photovoltaïque au maximum et la tension augmentée par un hacheur boost entrelacé doit être convertie par un onduleur de tension pour permettre l'injecter au réseau électrique.

La commande du hacheur et du l'onduleur est nécessaire pour contrôler les courants et les tensions à chaque sortie d'un convertisseur.

II.2 La Cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile 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. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

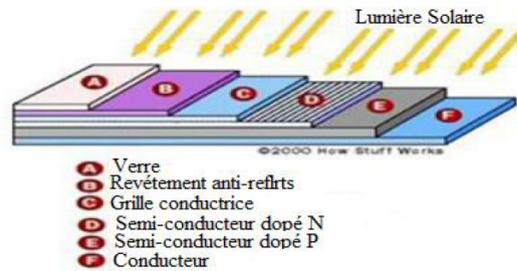


FIGURE II.1 – Structure basique d'une cellule solaire.

La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [25].

II.2.1 Le principe de fonctionnement :

Il existe des différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (S_i) le germanium (G_e), le sélénium (S_e) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (**GaAs**), le tellurure de cadmium (**CdTe**). Les cellules solaires de type **GaAs** sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales.

La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme composés de (**silicates, silice**), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit : Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph} = h\nu$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires électron-trou.

Les électrons (**charges N**) et les trous (**charges P**), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à

une différence de potentiel et un courant électrique circule (Figure II.2) [20] .

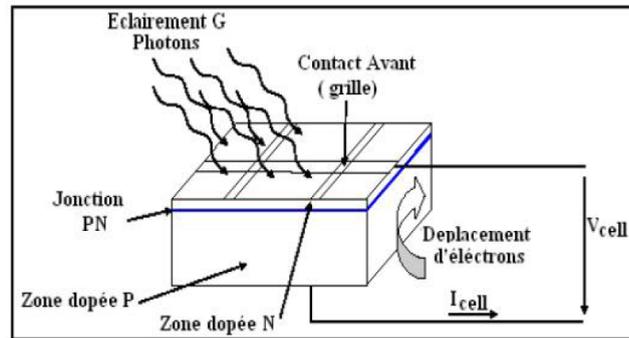


FIGURE II.2 – Module photovoltaïque.

Les cellules les plus répandus actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0.6V)[20] .

II.2.2 Les différents types des cellules solaires (cellules photovoltaïque) :

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres.

Cependant, quelque soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23% de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [28] :

- **Les cellules monocristallines :**
Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24% en laboratoire) Cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.
- **Les cellules polycristallines :**
Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à 19.8% en laboratoire).
- **Les cellules amorphes :**
Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'à 13% en laboratoire) , mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé .
Elles sont utilisées couramment dans des petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

II.3 Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles.

Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN).

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque.

En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble des cellules mises en séries, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité.

Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairage, de température et des spectres solaires.

La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux des cellules en silicium cristallins connectés en série [14].



FIGURE II.3 – Module photovoltaïque.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

1. Protection des cellules contre les agents atmosphériques.
2. Protection mécanique et support.
3. Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur[14] .

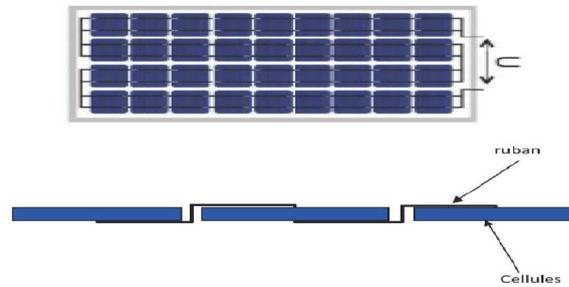


FIGURE II.4 – Le câblage des cellules dans un module.

II.3.1 Les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque :

II.3.1-a La puissance crête

La puissance électrique produite par un module varie en fonction de l'ensoleillement. La puissance crête d'un module est la puissance délivrée sous un éclairement de $1000W/M^2$ et pour une température de jonction de la cellule de $25^{\circ}C$.

La puissance crête correspond donc à une puissance maximum que le module peut fournir .

1. **Rendement** : Le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (intensité, tension) des cellules. Il passe par un maximum à ce que l'on appelle le point de puissance maximale.
2. **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_o et la puissance maximale P_m que peut avoir la cellule : V_{co} , I_{cc} .
3. **Caractéristique courant-tension d'un module** : Le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant/tension. Il dépend de l'éclairement solaire et de la température des cellules [10].

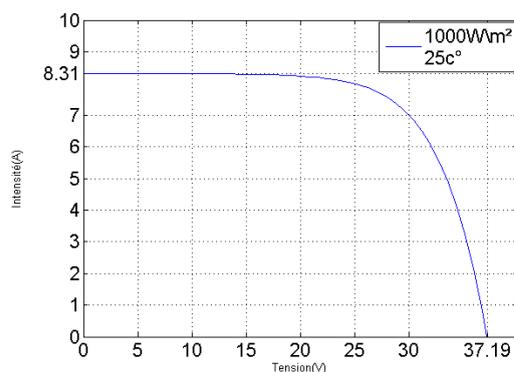


FIGURE II.5 – Exemple de caractéristique courant-tension d'un module.

4. **Influence de l'éclairement** : La (Figure II.6) et la (Figure II.7) présentent un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement. Nous avons fixé la température pour différents éclairements.

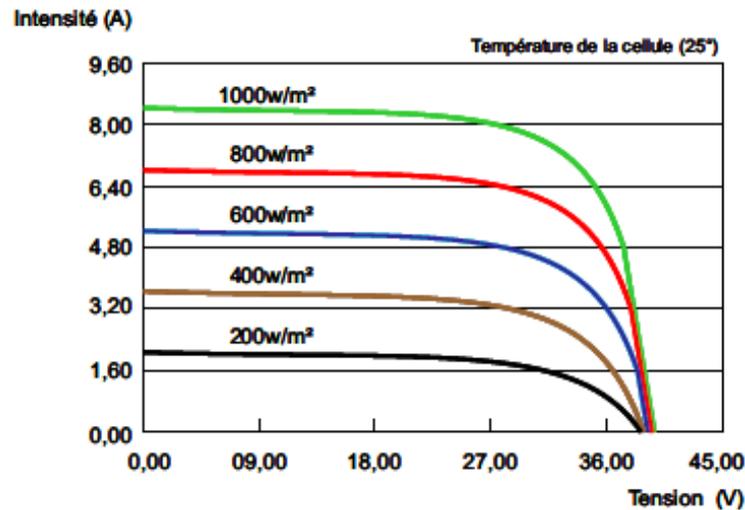


FIGURE II.6 – La caractéristique $I = f(v)$ en fonction de l'éclairement[15]

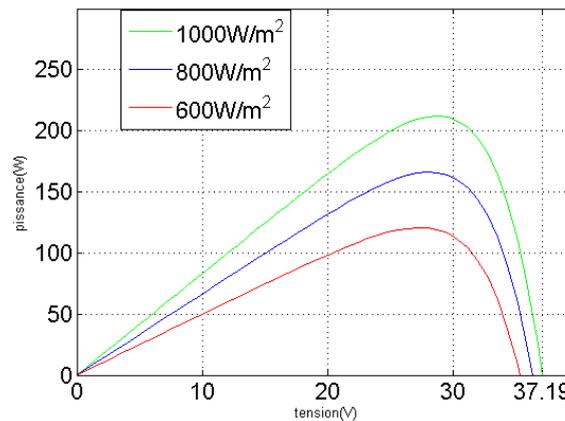


FIGURE II.7 – La caractéristique $P = f(v)$ en fonction de l'éclairement

Pour la (Figure II.6) on remarque que pour l'éclairement $G = 600 \text{ W}/M^2$ le courant $I_{sc} = 4.8 \text{ A}$ et pour $G = 400 \text{ W}/M^2$ le courant $I_{sc} = 3.84 \text{ A}$ on peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit augmente, mais par contre la tension varie légèrement.

5. **Influence de la Température** : Nous présentons ci-dessous les caractéristiques ($I - V$) et ($P - V$)(Figure II.8) et(Figure II.9) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures :

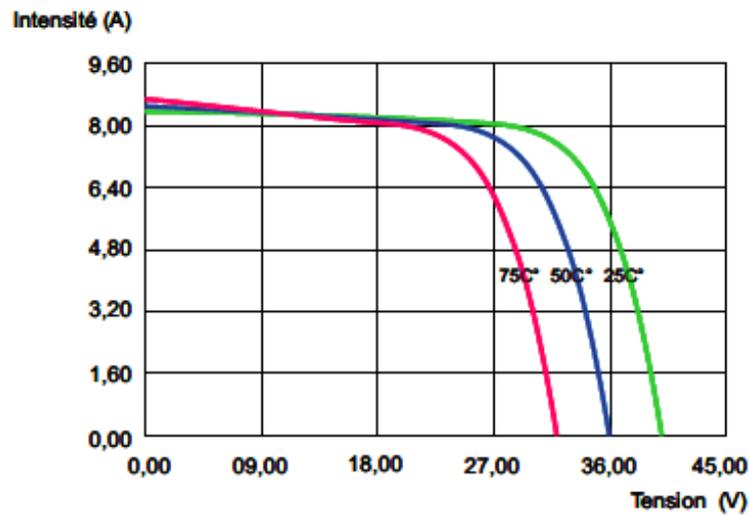


FIGURE II.8 – La caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température [15] .

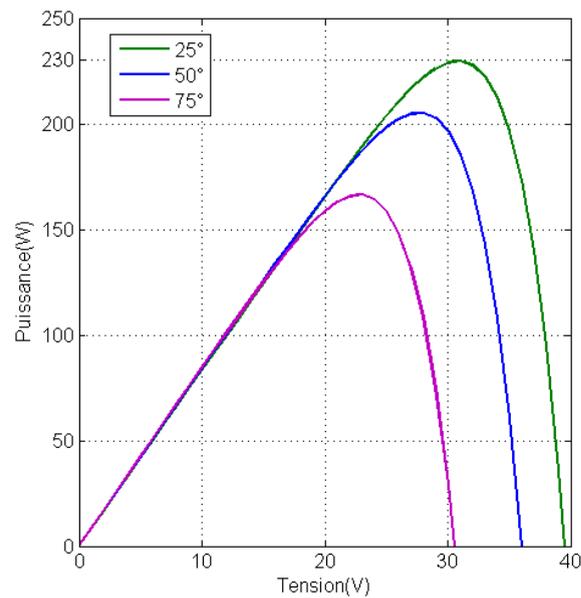


FIGURE II.9 – La caractéristique de $P= f(V)$ en fonction de température[15]

Pour la (Figure II.8) Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le Courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, on constate que la Température influe négativement sur la tension de circuit ouvert.

Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue.

Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente (Figure II.9).

II.4 Électronique de puissance

L'électronique de puissance est la branche de l'électrotechnique qui a pour objet de l'étude de la conversion statique d'énergie électrique (notamment les structure les composants, les commandes et les interactions avec l'environnement).

L'électronique de puissance traite l'énergie électrique par voie statique.

Elle permet :

- Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique.
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.
- Une discrétion par réduction des masses et des volumes ainsi par un fonctionnement ultrasonore des dispositifs .

La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseur statique qu'ils sont des dispositifs qui transforme l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge [5].

II.4.1 Électronique de puissance et la conversion électrique :

L'énergie électrique est surtout distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales ou continues. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins. L'électronique de puissance utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques.

La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseur statique qu'ils sont des dispositifs qui transforme l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge [22].

II.4.2 Convertisseurs électriques :

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension électrique pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types des sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible.) [15].

La tension fournie par les panneaux photovoltaïques est une tension de type continu pour l'adapter à nous besoin il y a deux sorte de convertisseur (les hacheurs **DC-DC**, les onduleurs **DC-AC**).

II.4.3 Les Interrupteurs :

Ces interrupteurs sont réalisés par un ou plusieurs composants électroniques a semi- conducteur.

On a vu qu'en électronique de puissance, on met en uvre des convertisseurs utilisant des interrupteurs électroniques fonctionnant soit à l'état passant (fermé), soit à l'état bloqué (ouvert).

Le passage d'un état à l'autre, appelé commutation, s'effectue périodiquement. On note T cette période [32] .

Selon le composant utilisé, la fréquence de découpage f à laquelle est soumis le composant change. En général, on cherche à utiliser la fréquence la plus élevée possible.

Cependant, plus la puissance nominale d'un convertisseur est élevée, plus cette fréquence est faible [32].

La (Figure II.10) présente un diagramme a échelle logarithmique des domaines d'utilisation de chaque composant.

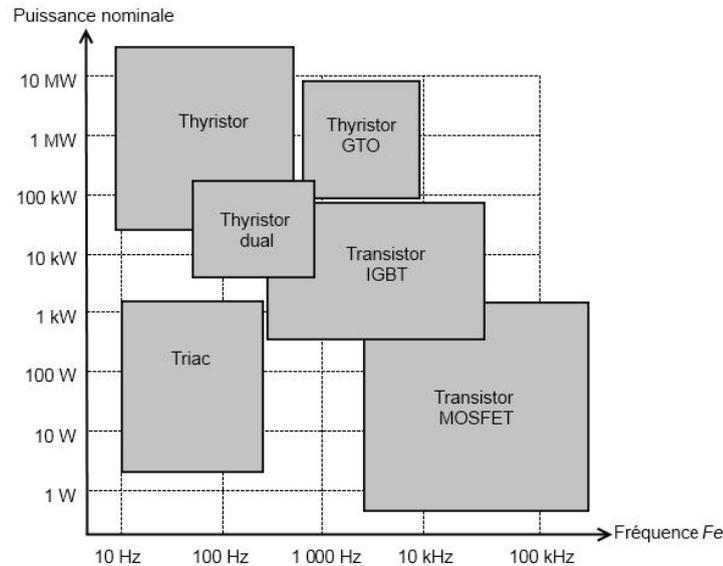


FIGURE II.10 – Diagramme puissance-fréquence des composants

Puissance de Fonctionnement <i>Sens décroissant</i>	Pertes <i>Sens croissant</i>	Fréquence de fonctionnement <i>Sens décroissant</i>	Circuit de Commande	
			Puissance <i>Sens croissant</i>	Facilité
GTO	IGBT	IGBT	IGBT	IGBT
Thyristor	Mosfet	Mosfet	Mosfet	Mosfet
BJT	Thyristor	BJT	GTO	BJT
IGBT	GTO	GTO	Thyristor	GTO
Mosfet	BJT	Thyristor	BJT	Thyristor

FIGURE II.11 – Classification des différents composants

II.4.4 Optocoupleur :

Un optocoupleur est un composant ou un ensemble de composants qui permet le transfert d'informations entre deux parties électroniques isolées l'une de l'autre d'un point de vue électrique.

La première partie est un émetteur, et la seconde partie est un récepteur. On peut l'assimiler à un composant qui a une entrée (émetteur) et une sortie (récepteur).

Quand on parle d'émission, c'est en général parce que l'on émet quelque chose. Ici, il s'agit d'une émission de lumière. D'où le préfixe Opto de Optocoupleur. L'émetteur produit donc de la lumière (qui peut être visible ou invisible), et le récepteur, qui est sensible à la lumière émise par l'émetteur (sensibilité maximale à la longueur d'onde utilisée pour la partie émission), réagit plus ou moins en fonction de la quantité de lumière reçue.

Le couplage entre l'émetteur et le récepteur s'effectue donc intégralement par de la lumière. L'intégration dans un même boîtier d'une source lumineuse et d'un récepteur photosensible peut être assimilé à un relais, à un amplificateur, et même à un transformateur. Il existe une quantité assez impressionnante d'optocoupleurs (Figure II.12) [32].

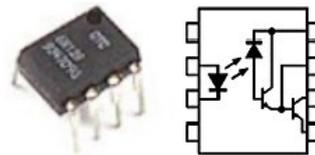


FIGURE II.12 – Optocoupleur 4N33

II.5 Les Hacheurs :

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant).

Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [7]. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs.

Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [23].

Les hacheurs sont des convertisseurs continu qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [24].

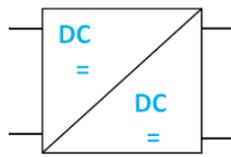


FIGURE II.13 – Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.5.1 Exigences de l'utilisateur

La fonction essentielle d'un convertisseur de puissance est double :

D'une part adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension en une tension continue et/ou en modifiant le niveau de la tension) et d'autre part stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source.

Dans le principe, assurer ces deux fonctions n'est pas excessivement complexe : fabriquer une alimentation élémentaire demande un nombre de composants relativement réduit.

Mais l'utilisateur privé ou professionnel a beaucoup d'autres exigences. Idéalement, un convertisseur doit en effet [29] :

1. Délivrer une ou souvent plusieurs tensions parfaitement continues, éventuellement ajustables et stables quel que soit le courant demandé ;
2. posséder un rendement élevé ;
3. Présenter un niveau de sécurité élevé, notamment en répondant aux normes d'isolation entre l'utilisateur et le réseau ;

4. Posséder une fiabilité élevée relativement à la durée de vie de l'application, en ce compris la résistance aux contraintes de l'environnement (vibrations, température, humidité, etc) ;
5. Ne pas être une source de perturbations pour le réseau électrique amont ou les équipements environnants ni être trop sensible aux perturbations émanant de ceux-ci (compatibilité électromagnétique) ;
6. Être la plus petite et la plus légère possible ;
7. Et bien entendu être de préférence peu coûteuse ...

II.5.2 Les types des hacheurs :

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens.

Cela revient également à considérer [2] :

- des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- hacheur abaisseur (ou buck),
- hacheur élévateur (ou boost),
- hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost),

II.5.2-a Hacheur Buck

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant.

L'interrupteur K (Figure II.14) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage)[35] .

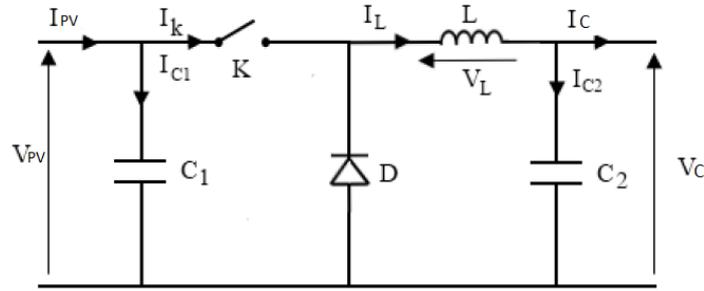


FIGURE II.14 – Schéma électrique d'un hacheur buck

Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , la tension V_{PV} appliquée aux bornes de la diode et l'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = 1/T$.

La source V_{PV} fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\alpha T, T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D.

La tension à ses bornes est donc nulle [4].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la (Figure II.15) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro.

Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [4].

$$\begin{aligned}
 V_c &= \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_c dt \\
 &= \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_{PV} dt \\
 &= \alpha \cdot V_{PV}
 \end{aligned}$$

A pertes minimales on a :

$$P_{PV} = P_c \iff V_c \cdot I_c = V_{PV} \cdot I_c \iff I_{PV} = \frac{V_c}{V_{PV}} \cdot I_c \iff I_{PV} = \alpha I_c \text{ Donc :}$$

$$\alpha = \frac{V_c}{V_{PV}} = \frac{I_{PV}}{I_c} \quad (\text{II.1})$$

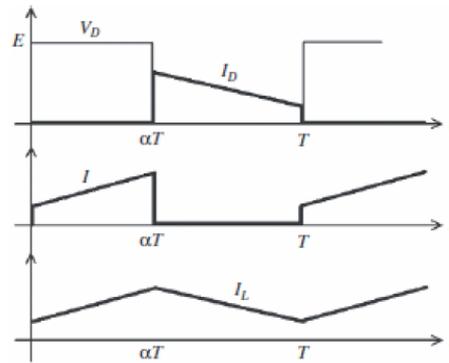


FIGURE II.15 – Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

II.5.2-b Hacheur boost

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

L'interrupteur K (Figure II.16) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [35].

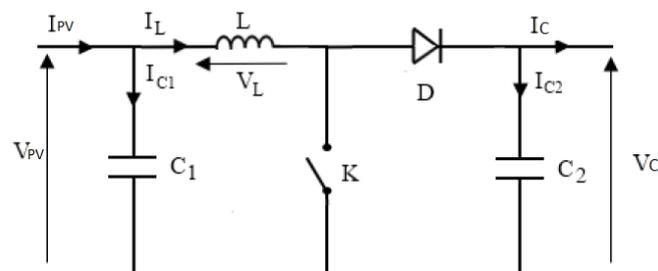


FIGURE II.16 – Schéma électrique d'un hacheur boost

Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant dans l'inductance croît linéairement.

La tension aux bornes de K est nulle.

Pendant le temps $t \in [\alpha T, T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D.

On a alors $V_k = V_c$.

En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [4] :

$$\begin{aligned}
 V_{PV} &= \frac{1}{T} \int^T V_{PV} dt \\
 &= \frac{1}{T} \int^T V_c dt
 \end{aligned}$$

$$V_{PV} = V_c(1 - \alpha)$$

A pertes minimales on a :

$$P_c = P_{PV} \iff V_c \cdot I_c = V_{PV} \cdot I_{PV} \iff I_c = \frac{V_{PV}}{V_c} \cdot I_{PV} \iff I_c = (1 - \alpha) I_{PV}$$

Donc :

$$(1 - \alpha) = \frac{V_{PV}}{V_c} = \frac{I_c}{I_{PV}} \quad (\text{II.2})$$

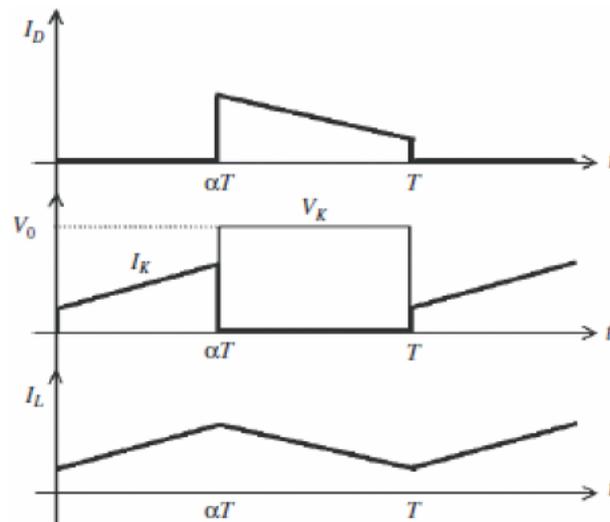


FIGURE II.17 – Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

L'ondulation de courant dans l'inductance [17] :

On peut voir sur la figure (Figure II.18) que la taille de l'ondulation peut être calculée comme :

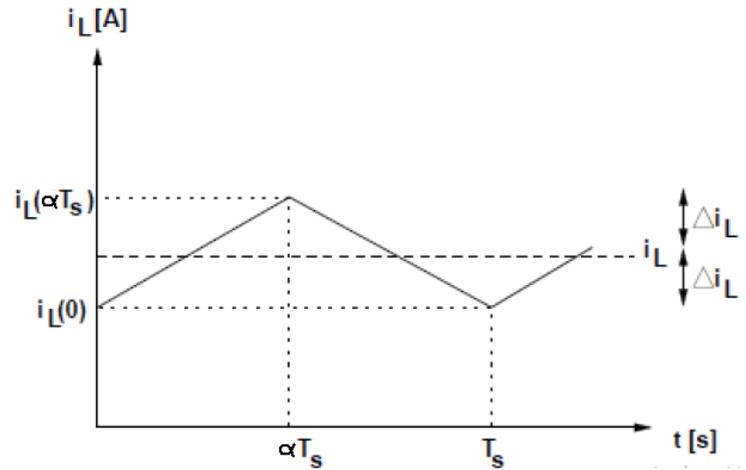


FIGURE II.18 – ondulation du courant d'inductance

$$\Delta i_L = \frac{1}{2}(i_L(\alpha T_s) - i_L(0)) \quad (\text{II.3})$$

De la définition de la tension d'inductance de la pente dans le premier sous-intervalle peut être calculée :

$$V_L = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \quad (\text{II.4})$$

$$\frac{V_{pv}}{L} = \frac{di_L(t)}{dt} \quad (\text{II.5})$$

$$i_L(\alpha T_s) = i_L(0) + \frac{V_{pv}}{L} \cdot (\alpha T_s) \quad (\text{II.6})$$

Si cela est insérée dans la formule (II.3) le courant d'entraînement est :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} \frac{V_{pv}}{L} \cdot (\alpha T_s) \quad (\text{II.7})$$

$$L = \frac{V_{pv}}{2 \cdot \Delta i_L} \cdot (\alpha T_s) \quad (\text{II.8})$$

L'ondulation de tension du condensateur ΔV_{CB} :

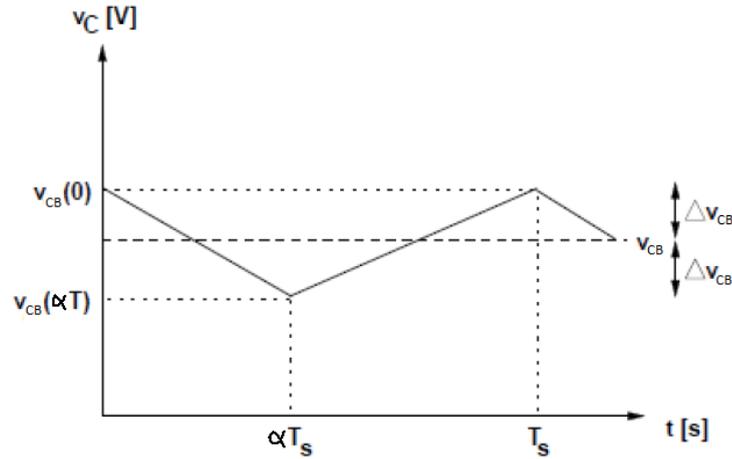


FIGURE II.19 – Ondulation du courant de condensateur

Suivant l'ondulation de la tension du condensateur la figure (II.19) :

$$I_C = C \cdot \frac{dV_{CB}(t)}{dt} \Leftrightarrow$$

$$\int_{\Delta V_{CB}}^{-\Delta V_{CB}} = \frac{1}{CB} \int_0^{\alpha T_s} Idt \Leftrightarrow$$

$$\Delta V_{CB} = \frac{V_C}{2 \cdot CB \cdot R} \cdot \alpha \cdot T_s$$

Hacheur boost entrelacé :

Un convertisseur élévateur entrelacé à deux phases est principalement utilisé dans la conversion à haute tension d'entrée et de sortie. Aussi le convertisseur élévateur entrelacé est utilisé pour réduire l'ondulation du courant dans l'entrée et la sortie.

Les avantages de convertisseurs élévateurs entrelacés réduisent les ondulations de courant d'entrée, augmenter l'efficacité, amélioration de la fiabilité, etc.

Le nombre de dispositifs de commutation, le nombre d'inductances et de diodes sont les mêmes que le nombre de phases utilisés dans le circuit. Le schéma proposé de convertisseur élévateur entrelacé à deux phases est montré dans (Figure II.20). Les impulsions de déclenchement de la puissance interrupteurs électroniques sont décalés par : [32]

Où "n" est le nombre de phases. Tel que :

$$360/2 = 180^\circ$$

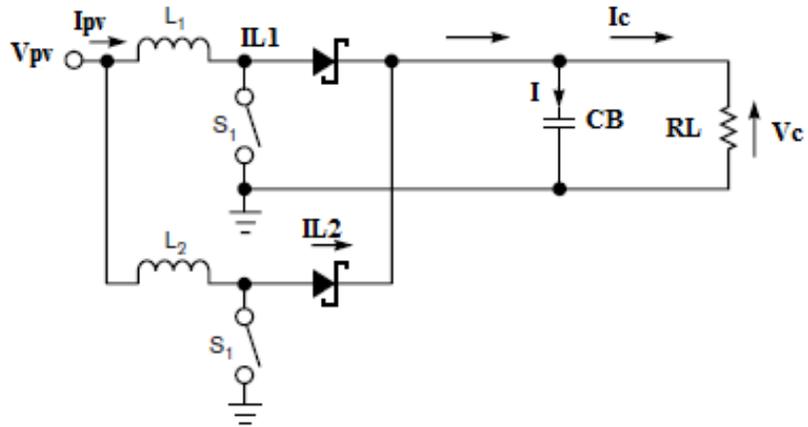


FIGURE II.20 – Schéma du hacheur boost entrelacé

L'ondulation de courant dans l'inductance [3] :

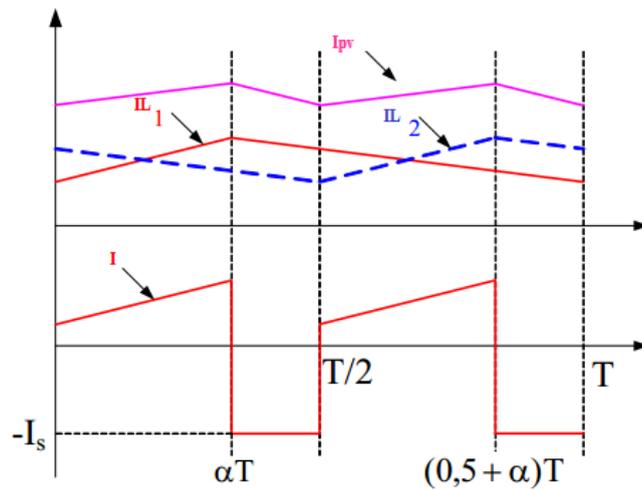


FIGURE II.21 – Schéma de courants I_{L1} , I_{L2} et I_{PV}

A partir de la figure (II.21) on déduit :

$$I_L = \Delta I_{L1} = \Delta I_{L2} = \frac{\alpha \cdot V_{PV}}{L \cdot F_s}$$

II.5.2-c Hacheur Buck-Boost

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif.

La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

L'interrupteur K (Figure II.22) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage)[35].

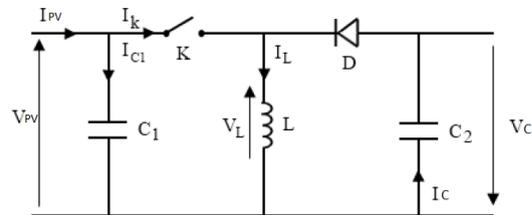


FIGURE II.22 – Schéma électrique d'un hacheur buck- boost

Fonctionnement :

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive.

Le schéma de principe est présenté sur (Figure II.23). Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_{PV} . À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_L est égale à V_C . Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, Il en résulte que [4] :

- Quand le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost et si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.

$$V_{PV} \cdot \alpha \cdot T = V_C \cdot (1 - \alpha) T \quad (\text{II.9})$$

II.6 Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur continu-alternatif qui, à partir d'une source continue, permet d'alimenter une charge en alternatif. Les onduleurs sont généralement des convertisseurs directs (tension \rightarrow courant ou courant \rightarrow courant tension).

Ils peuvent néanmoins constituer le premier étage d'un convertisseur indirect tel qu'un convertisseur DC-DC .

Les onduleurs étudiés ici sont autonomes : la fréquence et la forme du signal fourni à la charge sont imposées par la commande, contrairement à un redresseur tout thyristor qui fonctionne en onduleur assisté lorsqu'il est en réversibilité (la charge continue alimente alors le réseau alternatif 50 Hz qui est imposé) .

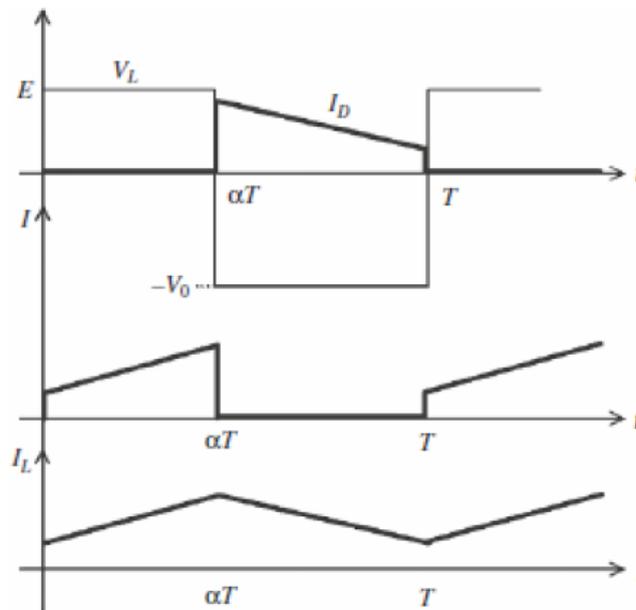


FIGURE II.23 – Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur buck-boost.

Les onduleurs peuvent être monophasés ou triphasés suivant l'application désirée. Pour chacun d'eux, on distingue deux types de commande :

La commande en ondes pleines :

Le signal de sortie est à la fréquence de découpage et est généralement proche d'un signal carré.

Ce type d'onduleur est employé lorsque la forme du signal alternatif n'est pas primordiale (alimentation d'un système de chauffage par induction, alimentation de machines tournantes de fortes puissances, ...).

La commande en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) :

Ce type de commande permet de générer une onde qui, après filtrage du découpage, est sinusoïdale d'amplitude et de fréquence variables.

Ce type d'onduleur est employé pour générer un signal alternatif proche d'une sinusoïde (alimentation sans coupure, entraînement des machines synchrones ou asynchrones à vitesse variable, ...) [11].

II.6.1 Les types des onduleurs :

Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [15]

1. Onduleur Monophasé.
2. Onduleur Triphasé.

II.6.2 Onduleur Monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie.

Onduleur monophasé en demi-pont.

Onduleur monophasé en pont (Pont H) [15].

II.6.2-a Onduleur de tension monophasé en demi-pont

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la (Figure II.24).

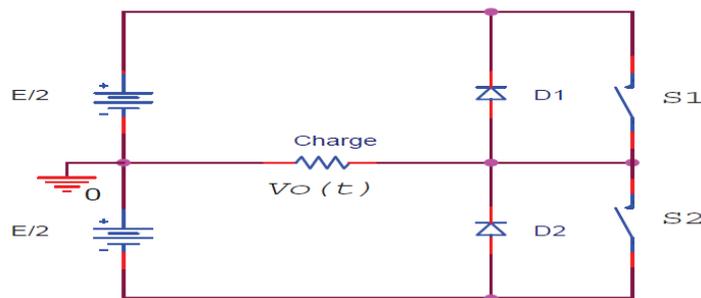


FIGURE II.24 – Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont.

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés S_1 et S_2 à commande complémentaire. La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi cycle 180° correspondant à la fréquence du signal de sortie requis. Lors de la fermeture de l'interrupteur S_1 , la tension aux bornes de la charge serait donc de $+E/2$, et prend la valeur $-E/2$ quand le second interrupteur, S_2 est fermé. La conduction simultanée des deux interrupteurs est évitée par l'élaboration d'une commande adéquate qui tient compte des différentes caractéristiques des imperfections de ces interrupteurs de puissance. Les diodes D_1 , D_2 , dites de récupération, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge [15].

II.6.2-b Onduleur de tension monophasé en pont

Considérons un onduleur de tension monophasé direct qui, à partir d'une source de tension continue, alimente une charge alternativement dans un sens et dans l'autre de façon à imposer une tension alternative en créneaux.

Le montage de la figure (Figure II.25) à quatre interrupteurs permet ceci et est appelé pont complet ou pont en H[1].

À l'aide de cette structure en pont, trois configurations sont possibles (Figure II.26) :

S_1 S_3 fermés, S_2 S_4 ouverts : $v = +E$

S_1 S_3 ouverts, S_2 S_4 fermés : $v = -E$

S_2 S_3 fermés, S_1 S_4 ouverts ou S_1 S_4 fermés, S_2 S_3 ouverts : $v = 0$

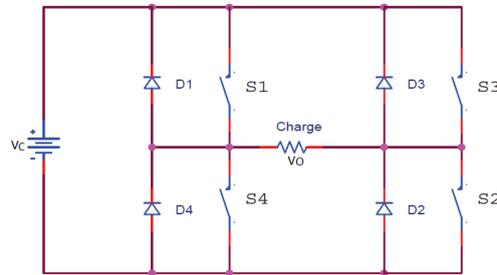


FIGURE II.25 – Schéma de Principe d'un Onduleur de tension Monophasé En Pont.

Notons que, comme pour un hacheur, les interrupteurs de chaque bras de l'onduleur (S1-S2 et S3- S4) doivent avoir un fonctionnement complémentaire pour ne pas court-circuiter la source de tension ou bien ouvrir la charge qui est de nature inductive [1].

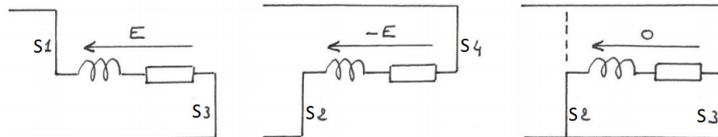


FIGURE II.26 – Les trois configurations possibles.

Calcul des valeurs de V_c et I_c :

En fonction des caractéristiques (tension - courant) de la charge, on calcule les caractéristiques de la source.

Pour simplifier le calcul, on supposera le convertisseur à pertes minimales donc :

$$P_c = P_o$$

Calcul de la valeur moyenne de I_s :

$$\begin{aligned} I_{cmoy} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \hat{I}_o \sin(\omega t - \alpha) d\omega t \\ &= \frac{2}{\pi} \hat{I}_o \cos \alpha \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_o \cos \alpha \end{aligned}$$

A pertes minimales :

$$P_c = P_o \Leftrightarrow V_c I_{cmoy} = V_o I_o \cos \alpha \Leftrightarrow V_c = \frac{V_o I_o \cos \alpha}{I_{cmoy}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} V_o \quad (\text{II.10})$$

II.6.3 Onduleur triphasé :

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance.

La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre [15].

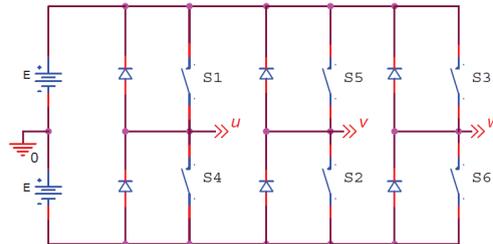


FIGURE II.27 – Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont

La (Figure II.27) illustre la topologie d'un onduleur triphasé à six interrupteurs de puissance. .

II.7 La commande MLI

Les onduleurs MLI utilisent le même schéma de base étudié précédemment. Seule la commande diffère : l'onde de sortie rectangulaire est maintenant modulée en largeur suivant un rapport cyclique qui évolue à une fréquence « basse », très inférieure à celle du découpage (Figure II.29).

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information.

Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (issue d'un découpage à fréquence) par une onde modulante sinusoïdale (fréquence) à fréquence beaucoup plus basse[1].

Si on appelle α le rapport cyclique de la tension de sortie sur une période $HF(T_s)$, la valeur moyenne de cette tension sur cette période HF peut donc avoir une allure alternative, sinusoïdale si désiré (représentée en pointillé), et c'est cette onde qui sera récupérée après filtrage du découpage. [1].

Cette méthode de commande par MLI (PWM) est récente. Elle est basée sur une conception analogique mais aujourd'hui avec le numérique. Un signal PWM est une sortie du microcontrôleur qui permet, par exemple, de commander un hacheur. En général, la fréquence est fixée et on fait varier le rapport cyclique du signal.

Réaliser un signal PWM avec un circuit numérique nécessite un compteur qui fonctionne en continu. Un tour de compteur correspond à une période du signal PWM.

La fréquence peut donc être réglée par le choix de l'horloge du compteur et par la valeur maximale du compteur. Un registre associé à un comparateur permet de fixer le rapport cyclique (PDC1).

A chaque fin de comptage, la sortie PWM est mise à 1 et elle est mise à 0 quand le compteur atteint la valeur fixée par le registre de rapport cyclique.

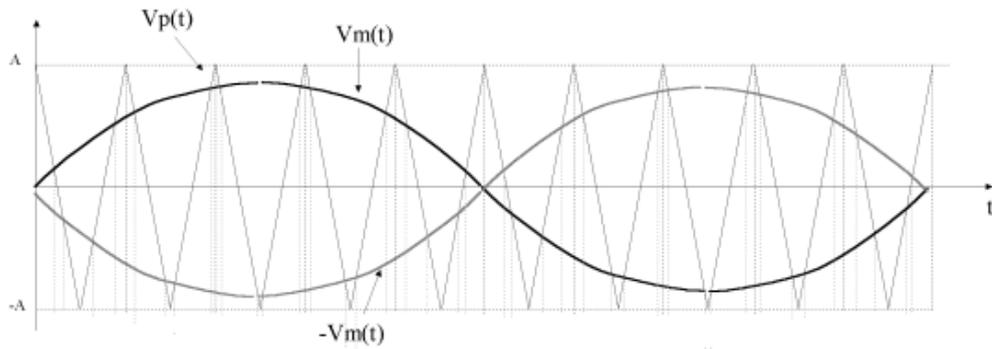


FIGURE II.28 – Schéma de principe de la MLI

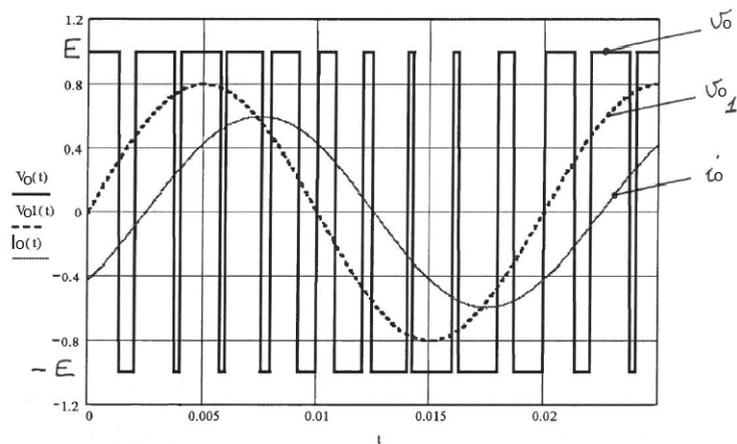


FIGURE II.29 – L'allure de la tension de la sortie d'onduleur

$$\begin{aligned}
 \langle U \rangle &= \frac{1}{T_{MLI}} \int_0^{T_{MLI}} U(t) dt \\
 &= \frac{2}{T_{MLI}} \int_0^{\tau} E dt - \frac{2}{T_{MLI}} \int_{\tau}^{\frac{T_{MLI}}{2}} E dt \\
 &= 2E[t]_0^{\tau} - 2E[t]_{\tau}^{\frac{T_{MLI}}{2}} \\
 &= \frac{2E\tau}{T_{MLI}} - \frac{2E}{T_{MLI}} \cdot \left[\frac{T_{MLI}}{2} - \tau \right] \\
 &= \frac{4E\tau}{T_{MLI}} - E \\
 &= E \left[\frac{4\tau}{T_{MLI}} - 1 \right] \\
 &= \frac{2E}{T_{MLI}} \cdot \left[2\tau - \frac{T_{MLI}}{2} \right]
 \end{aligned}$$

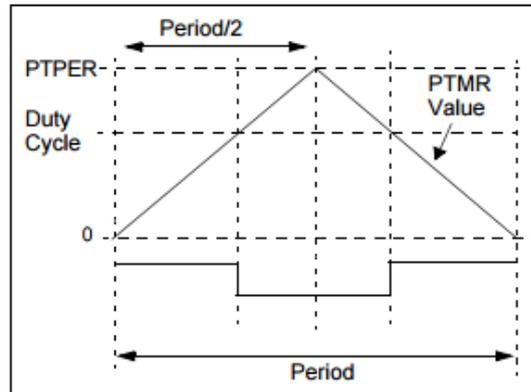


FIGURE II.30 – PWM aligné au centre

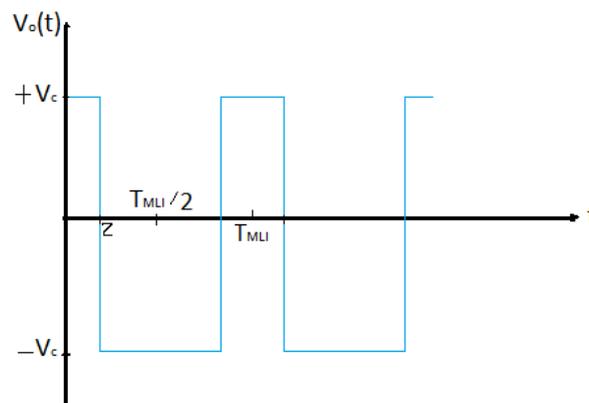


FIGURE II.31 – L'allure de tension de sortie de l'onduleur

II.8 Le transformateur

Il a pour rôle de modifier les amplitudes des grandeurs électriques alternatives (courants et tensions), à fréquence constante, en vue d'adapter le récepteur (charge) à un réseau.

Le transformateur est constitué essentiellement de :

1- Un circuit magnétique :

Même chose que pour une bobine à noyau de fer. Il a pour rôle de canaliser le flux magnétique.

2- Enroulements :

2.1- Sur les noyaux du circuit magnétique, on trouve plusieurs enroulements (isolés électriquement entre eux). L'un de ces enroulements est relié à la source alternative : C'est le primaire, on lui adopte la convention récepteur.

2.2- L'autre bobine(ou les autres) est le siège d'une F.E.M induite .Elle peut débiter dans un récepteur : c'est le secondaire, on lui adopte la convention générateur [5].

II.8.1 Le principe de fonctionnement :

Cette machine est basée sur la loi d'induction électromagnétique (loi de Lenz).

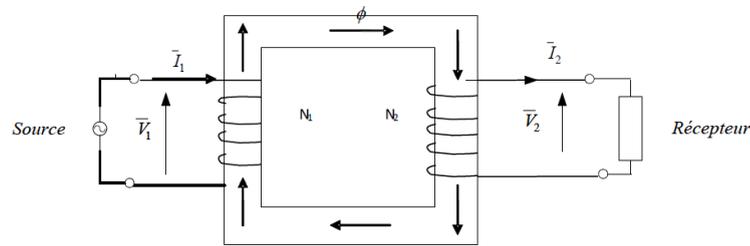


FIGURE II.32 – Le transformateur monophasé

En effet, la tension alternative au primaire va créer un flux magnétique alternatif qui traversant l'enroulement secondaire produira une F.E.M induite.

Remarque :

- Par principe de fonctionnement, le transformateur est une machine réversible.
 - Le transformateur ne comportera pas des parties en mouvement, il est dit : machine statique.
 - Le transformateur à vide (I_2) est une bobine à noyau de fer [5].
- En valeurs efficaces ca donne :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \mathbf{m} \quad (\text{II.11})$$

\mathbf{m} est appelé rapport de transformation.

Remarque :

Selon la valeur qui prend \mathbf{m} , on peut distinguer :

- $\mathbf{m} = 1 \Rightarrow V_2 = V_1$: le transformateur est un isolateur
- $\mathbf{m} > 1 \Rightarrow V_2 > V_1$: le transformateur est dit abaisseur
- $\mathbf{m} < 1 \Rightarrow V_2 < V_1$: le transformateur est dit élévateur



FIGURE II.33 – transformateur monophasé CHNT NDK-250

Remarque : Le transformateur monophasé utilisé est le CHNT NDK-250 avec une puissance de 250 VA et une fréquence de 50 – 60Hz. Il est constitué de deux demis bobines au primaire et au secondaire. Le primaire avec une tension de $2 * 24V$ et le secondaire avec une tension de 220V et 380V .

On utiliser cet transformateur comme un élévateur pour augmenter la tension de sortie de l'onduleur $V_{O_{eff}} = 24V$ ou comme un abaisseur pour mesurer la tension du réseau.

II.9 La simulation des différentes parties d'un GTI :

Remarque :

Nous avons choisi Le ALPV qui est un module photovoltaïque composé de 60 cellules en silicium polycristallines connectées en série ayant une puissance maximale de 230w et considéré dans les conditions standards $G = 1000W/M^2$, $T = 25^{\circ}C$. Pour réaliser la modélisation de ce module. Nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation.

II.9.1 La simulation du panneau photovoltaïque :

1-Influence de l'éclairement et la température sur notre panneau ALPV :

température fixe $T = 25^{\circ}$ et pour des différentes Irradiations :

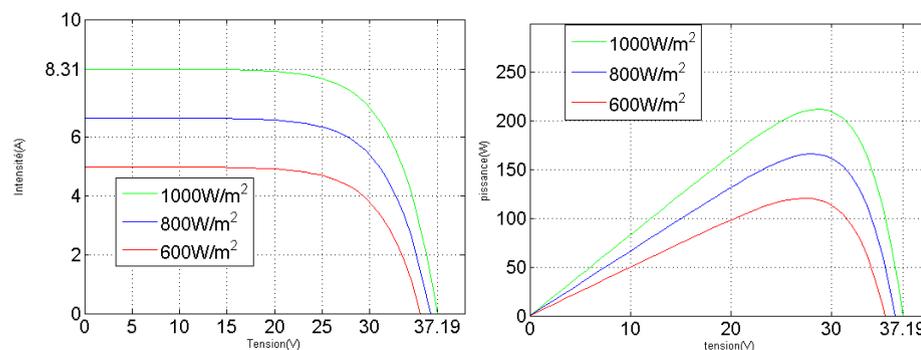


FIGURE II.34 – Caractéristique courant-tension et puissance-tension .

La(Figure II.34) 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 et pour 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 $P = f(V)$.

irradiation fixe $1000W/m^2$ et pour des différentes températures :

La(Figure II.35) 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 ne dépend pas de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit a une diminution. Et la caractéristique $P = f(V)$ 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 $P=f(V)$.

Le schéma de simulation du panneau photovoltaïque est mis en Annexe B.

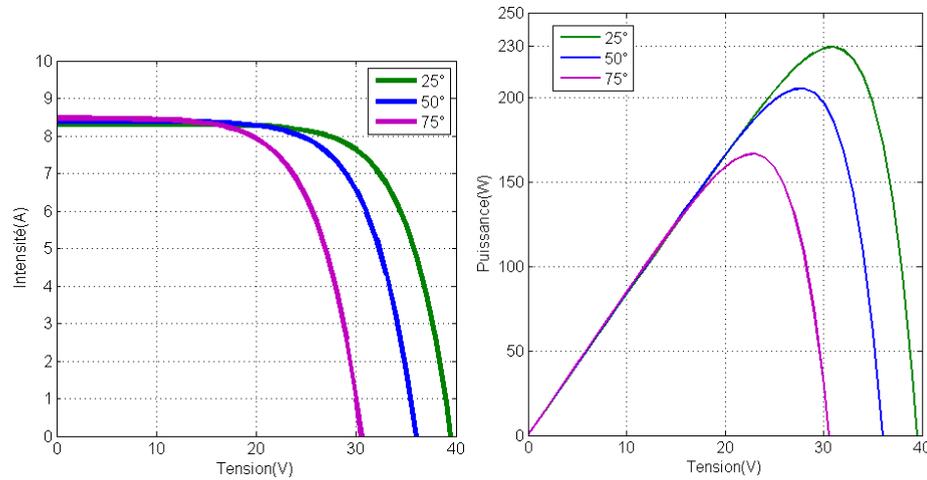


FIGURE II.35 – Caractéristique courant-tension et puissance-tension .

II.9.2 La simulations du système (panneau+hacheur) :

Le convertisseur boost entrelacé est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie et pour diminué les ondulations, tandis que le convertisseur Buck est employé pour abaisser la tension de sortie et c'est notre cas nous étions obligés d'augmenter la tension de du panneau photovoltaïque.

On a travaillé avec le Simpower pour obtenir les figures de tension et de courant. On a raccordé le panneau photovoltaïque qui débite 18 V et qui va alimenter notre hacheur Boost entrelacé. La sortie de notre hacheur doit être $V_c = 33V$ aux maximum.

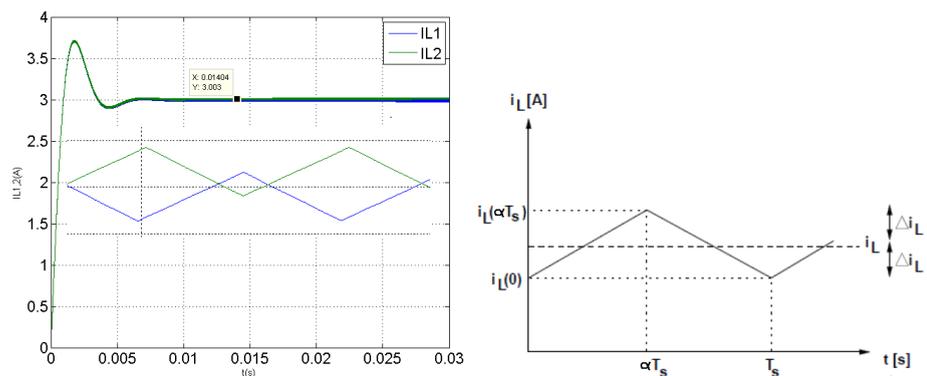


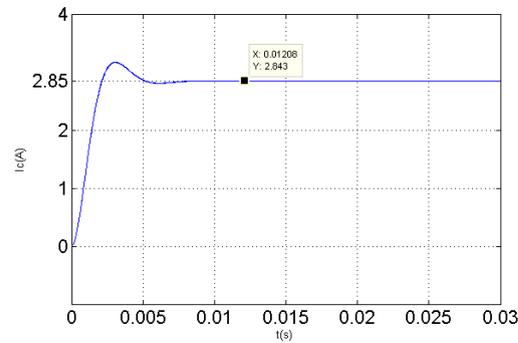
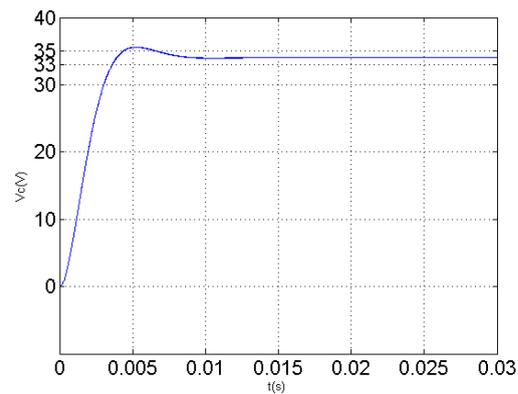
FIGURE II.36 – Caractéristique courant-tension et puissance-tension.

Commentaire :

-Pour la figure de la tension dans le régime transitoire on un dépassement de 6%elle arrive jusqu'à 35v puis elle se stabilise dans 33V avec des petites ondulations.

-Et concernant l'allure du courant il y a un petit dépassement le courant arrive jusqu'à 2.9A dans le régime transitoire puis il se stabilise a 2.8A avec des petits ondulations et c'est le rôle du entrelacé qui a réduit les ondulations.

Le schéma de simulation du hacheur Boost entrelacé est mis en Annexe C.

FIGURE II.37 – L'allure du courant I_c la sortie du hacheur entrelacé.FIGURE II.38 – L'allure de la tension V_c de la sortie du hacheur entrelacé.

II.9.3 La simulation de l'onduleur :

Remarque :

Dans notre projet (GTI) on a travaillé avec l'onduleur monophasé en pont et la commande des IGBT a base de MLI pour obtenir une tension alternative avec une tension d'entrée $V_c = 33V$ et en sortie on a $V_{o_{max}} = 33V$ alors la tension $V_{o_{eff}} = 24V$ puis on attaque un transformateur pour augmenter la tension a 220V et permettre l'injection au réseau.

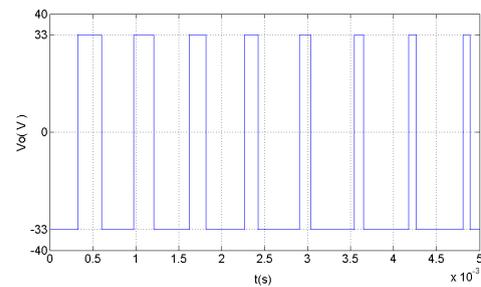


FIGURE II.39 – l'allure de la tension fondamentale de sortie d'onduleur

Le schéma de simulation de l'onduleur monophasé en pont est mis en Annexe D.

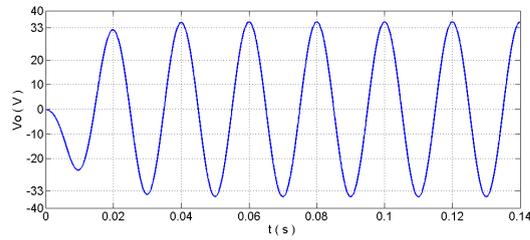


FIGURE II.40 – l'allure de la tension de la sortie d'onduleur

II.10 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenter les différents convertisseurs de notre **GTI**.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...).

Nous avons présenté les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans les **GTI**. Ainsi que l'onduleur monophasé en pont et en demi-pont avec la commande MLI.

La simulation du panneau photovoltaïque, le hacheur Boost entrelacé et l'onduleur monophasé en pont est très importante afin de pouvoir régler les performances d'un GTI en utilisant le MTLAB comme un outil de simulation pour simuler les différents convertisseurs et voir les signaux de sortie et les caractéristiques de notre panneau.

Enfin et d'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque que le hacheur Boost entrelacé peut augmenter la tension de sortie du panneau et élimine les ondulations du courant. La commande MLI a le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie de l'onduleur.

Chapitre III

Description de la plate-forme expérimentale

SOMMAIRE

III.1 INTRODUCTION	55
III.2 PRÉSENTATION DE LA CARTE EXPÉRIMENTALE	55
III.3 LE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE	57
III.3.1 Le condensateur d'entrée	57
III.4 LE HACHEUR BOOST ENTRELACÉ	57
III.4.1 Détermination des paramètres du Hacheur [12]	59
III.4.2 Application numérique	60
III.5 L'ONDULEUR DE TENSION	61
III.5.1 L'inductance	61
III.5.2 Calcul de la puissance active P et la puissance réactive Q	62
III.6 LE MICROCONTRÔLEUR	64
III.7 ACQUISITION DES TENSIONS ET LEURS MESURES	64
III.7.1 La tension du réseau (V_r)	64
III.7.2 La tension V_c du hacheur	67
III.8 LE TRANSFORMATEUR DE TENSION	68
III.9 CONCLUSION	68

Résumé

Ce chapitre présente la conception, la réalisation et la caractérisation des différentes parties de la carte expérimentale. Les structures présentées et validées dans les deux chapitres précédents sont ici dimensionnées et conçues. Les composants choisis sont dimensionnés selon leur fonctionnement via un effort de conception et de réalisation d'un onduleur solaire connecté au réseau.

III.1 Introduction

La réalisation d'une carte expérimentale destinée à l'implantation pratique des principes développés en théorie.

Notre carte expérimentale a été réalisée à l'université d'Abou Baker Belkaid de Tlemcen, dans le laboratoire d'automatique. Dans ce chapitre, nous présentons les composants principaux du banc d'essai et les réalisations que nous avons faites pour le montage de cette carte.

III.2 Présentation de la carte expérimentale

L'ensemble du banc se compose principalement : d'un panneau photovoltaïque de 230 Watts, d'un transformateur 220V/2*24V, d'un disjoncteur magnétothermique de protection et d'une carte expérimentale qui contient l'ensemble de mesure, de contrôle et de commande de cette installation (figure III.1).

Le schéma de simulation de l'onduleur monophasé en pont est mis en Annexe E.

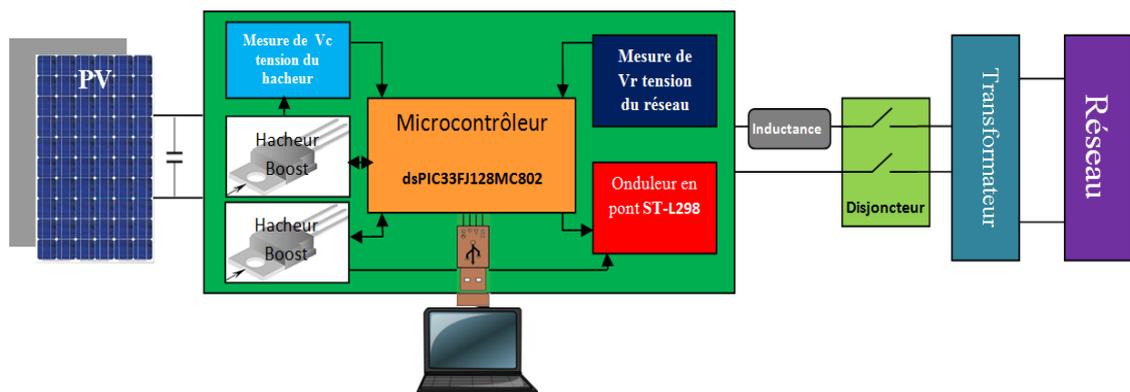


FIGURE III.1 – Représentation schématique du dispositif expérimental

La tension délivrée par le panneau photovoltaïque va être augmentée, mesurée et ondulée afin de l'injecter vers le réseau électrique à travers un disjoncteur de protection et un transformateur élévateur.(figure III.2)

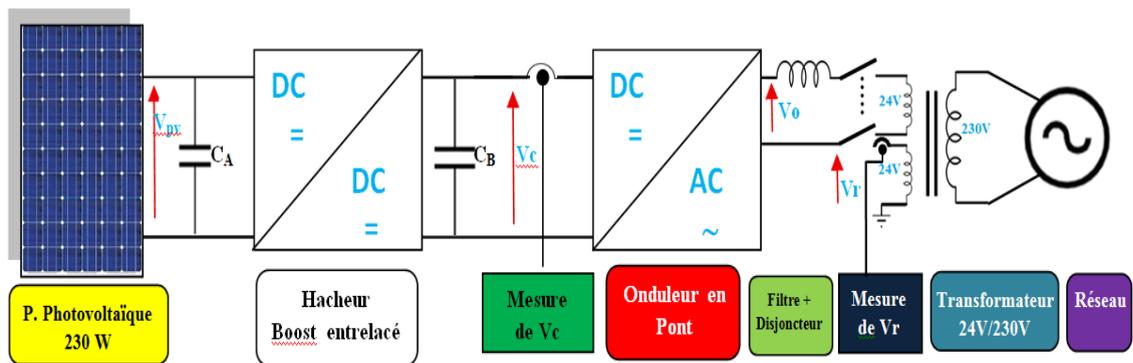


FIGURE III.2 – Schéma synoptique du dispositif expérimental

Les spécifications du système :

Le tableau suivant résume les spécifications de notre système photovoltaïque [26] [33] .

Spécification	Valeur
Tension d'entrée (V_{PV}) DC-DC	20 - 35 V
Courant d'entrée (I_{PV}) DC-DC	0 - 8 A
Tension de sortie (V_c) DC-DC	33 V
Tension de sortie (V_o) DC-AC	20 - 24 Vrms
Puissance nominale d'entrée (P_{pv})	230 W
Fréquence de commutation DC-AC	16 kHz
Fréquence de commutation (F_s) DC-DC	16 kHz
Voltage du réseau (V_r)	230 Vrms +/- 20%
Fréquence du réseau	50 Hz
Transformateur	2*24 V / 220 V

III.3 Le panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque utilisé dans notre carte expérimentale est un panneau polycristallin de 230 watts. Il contient des modules solaires développés par les spécialistes de l'entreprise "ALPV" pour apporter aux utilisateurs de la pérennité et de la sécurité, dans le respect de l'environnement et pour garantir une puissance nominale : 25 ans (80%) et 10 ans (90%) [26].

III.3.1 Le condensateur d'entrée

La capacité d'entrée, C_A est conçue pour lisser l'ondulation à haute fréquence à l'entrée du générateur photovoltaïque. Si la tension produite par le module est supposée constante et la tension dessinée par le convertisseur est supposé d'être un train d'impulsions.

III.4 Le hacheur Boost entrelacé

Les structures élévatrices apparaissent sous divers formes car il existe des structures isolées ainsi que non isolées. Des études sur les structures isolées ont déjà été menées [19]. Ces structures offrent des solutions afin de faire face au problème de fort gain de tension.

L'introduction de la commutation douce améliore le rendement du convertisseur en profitant de l'inductance de fuite du transformateur. Toutefois, même si les structures isolées permettent une grande souplesse dans les choix des tensions, il est plus intéressant d'utiliser des structures non isolées si elles garantissent les performances. C'est pourquoi, nous allons nous intéresser dans cette étude aux structures élévatrices non isolées que l'on retrouve sous le nom de Boost.

Plusieurs types existent : le Boost classique entrelacé, le double Boost entrelacé et un nouveau convertisseur proposé baptisé double Boost dual entrelacé, les applications de ces convertisseurs comprennent les véhicules électriques et la conversion de l'énergie renouvelable [18].

Afin d'augmenter la tension V_{PV} générée par le panneau photovoltaïque, on a utilisé un convertisseur classique élévateur, ce dernier et mis en parallèle avec un autre convertisseur élévateur (le Boost classique entrelacé) pour minimiser les ondulations de courant dans l'inductance comme c'est déjà expliqué dans le 2^{me} chapitre. Les commandes des interrupteurs électroniques sont décalées par 180°.

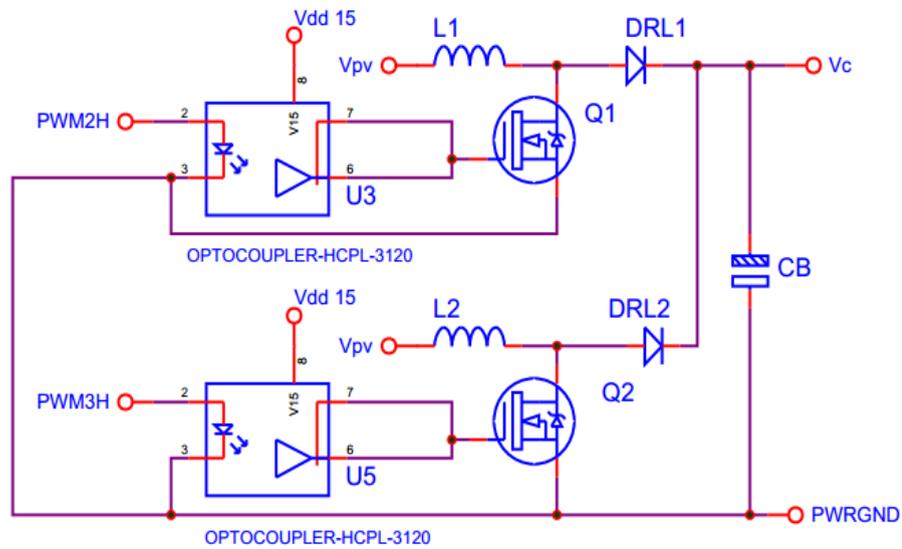


FIGURE III.3 – Le hacheur Boost Interleave

L'interrupteur utilisé dans le hacheur est le MOSFET IRF530 avec une tension max supportée de 100V et un courant de 16A.

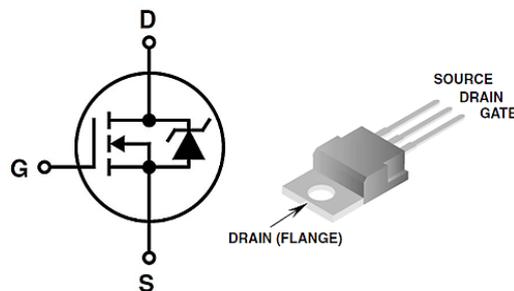


FIGURE III.4 – MOSFET IRF530

Le tableau suivant montre les caractéristiques du MOSFET IRF530 :

V_{DSS}	$R_{DS(on)}$	$I_D@25^{\circ}C$	t_r	V_{GS}
100 V	$< 0.16 \Omega$	16 A	20 ns	± 20 V

V_{DSS} : Drain-source Voltage

$R_{DS(on)}$: Static Drain-source On Resistance

$I_D@25^{\circ}C$: Drain current

t_r : temps de réponse

V_{GS} : Gate-source Voltage

L'optocoupleur : Afin d'attaquer le MOSFET de notre hacheur par la pin PWM du DSPIC, on a mis un optocoupleur entre le dsPIC et la MOSFET. L'optocoupleur mis en œuvre est le HCPL3120. Cet optocoupleur assure l'isolation galvanique entre la partie puissance et la partie commande, en cas de défaillance au niveau du circuit puissance (court-circuit,

surtension), le circuit de commande ne risque pas d'être endommagé.

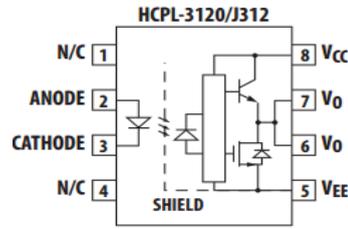


FIGURE III.5 – L'optocoupleur HCPL 3120

Le tableau suivant résume les caractéristiques du HCPL 3120 :

V_{CC}	V_{IORM}	I_{CC}	$I_{F(on)}@25^{\circ}C$	t_r
15 to 30 V	630 V_{peak}	5 mA	10 to 16 mA	0.1 μs

V_{CC} : Power Supply Voltage

V_{IORM} : Maximum Working Insulation Voltage

I_F : Input Current (ON)

t_r : Rise time

I_{CC} : maximum supply current

III.4.1 Détermination des paramètres du Hacheur [12]

Le rapport cyclique D :

A partir de l'équation (II.2) on peut extraire l'expression du rapport cyclique :

$$\alpha = 1 - \frac{V_{PV}}{V_C} \quad (\text{III.1})$$

La résistance R :

Ensuite, la résistance de charge équivalente peut être exprimée comme suit :

$$P_c = \frac{V_C^2}{R} \Leftrightarrow R = \frac{P_c}{V_C^2} \quad (\text{III.2})$$

Le courant de l'inductance :

$$I_L = \frac{V_C}{R} \cdot \frac{1}{1 - \alpha} \quad (\text{III.3})$$

L'ondulation du courant de l'inductance :

$$\Delta I_L = 0.1 * I_L \quad (\text{III.4})$$

La valeur de l'inductance :

$$L = L_1 = L_2 = \frac{V_{PV}}{\Delta I_L \cdot F_s} \cdot \alpha \quad (\text{III.5})$$

L'ondulation de la tension du condensateur :

$$\Delta V_{CB} = 1\% \cdot V_c \quad (\text{III.6})$$

La valeur du condensateur :

$$C_B = \frac{V_C}{\Delta V_{CB} \cdot R \cdot F_s} \cdot \alpha \quad (\text{III.7})$$

III.4.2 Application numérique

D'après l'équation (III.1) :

$$\alpha = 1 - \frac{18}{33} = 0.45$$

D'après l'équation (III.2) :

$$R = \frac{(33)^2}{100} = 10.89\Omega$$

D'après l'équation (III.3) :

$$I_L = \frac{33}{100} * \frac{1}{1 - 0.45} = 0.6A$$

D'après l'équation (III.4) :

$$\Delta I_L = 0.1 * I_L = 0.06A$$

D'après l'équation (III.5) :

$$L = \frac{18}{0.06 * 16 * 10^3} * 0.45 = 8.4mH$$

D'après l'équation (III.6) :

$$\Delta V_{CB} = 1\% * 33 = 0.33V$$

D'après l'équation (III.7) :

$$C_B = \frac{33}{0.33 * 10.89 * 16 * 10^3} * 0.45 = 258 \mu F$$

III.5 L'onduleur de tension

Nous avons utilisés un onduleur en pont à deux bras sous forme d'un circuit intégré L298 avec une tension supportable de 46V et un courant de 4A.

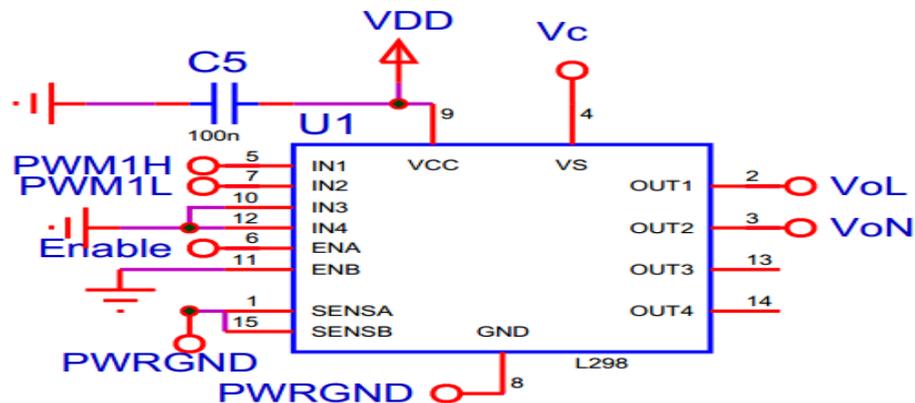


FIGURE III.6 – L'onduleur de tension L298

Le tableau suivant résume les caractéristiques du L298 :

V_S	V_{SS}	P_{tot}	$I_{F(on)}@25^\circ C$	$t_r(V_{en})$
50 V	7 V	25 w	4 A	0.4 μs

V_S : Power Supply Voltage

V_{SS} : Logic Supply Voltage

I_F : Total DC Current

t_r : Source Current Rise Time (Enable)

P_{tot} : Total Power Dissipation ($T_{case} = 75^\circ C$)

III.5.1 L'inductance

On place alors entre l'onduleur et le réseau monophasé, une inductance qui permet de relier deux sources de tension (onduleur de tension et réseau). Elle joue aussi le rôle de filtre.

III.5.2 Calcul de la puissance active P et la puissance réactive Q

$$v_r(t) = V_r \sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (\text{III.8})$$

$$v_o(t) = V_o \sqrt{2} \sin(\omega t + \delta) \quad (\text{III.9})$$

Si $\delta > 0 \Rightarrow v_o(t)$ est en avance sur $v_r(t)$ comme c'est montré sur la (figure III.7) :

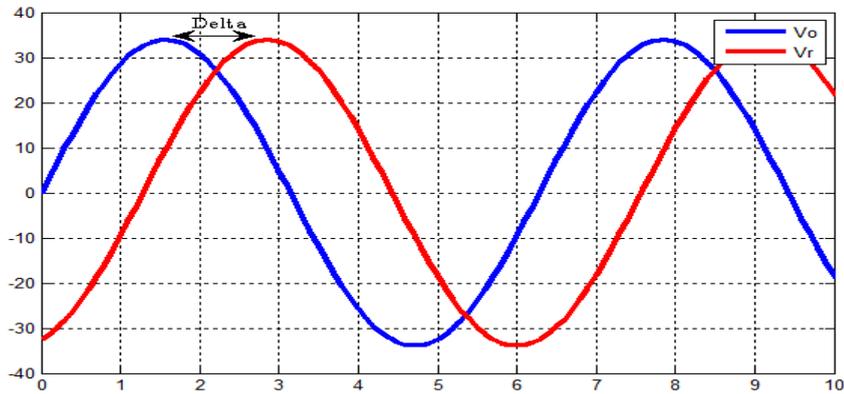


FIGURE III.7 – L'allure de $v_r(t), v_o(t)$ et le déphasage δ

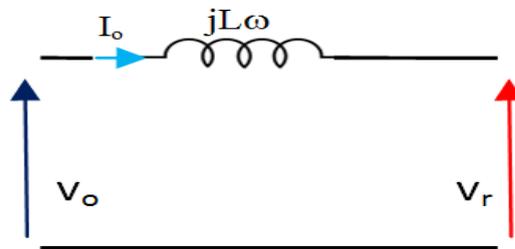


FIGURE III.8 – La maille entre $v_r(t)$ et $v_o(t)$

A partir de la (figure III.8) et en appliquant la loi des mailles on trouve :

$$\overline{V}_o - jL\omega I_o - \overline{V}_r = 0 \Rightarrow$$

$$I_o = \frac{\overline{V}_o - \overline{V}_r}{jL\omega} \quad (\text{III.10})$$

Calcul des puissances :

$$P = |\overline{V}_r| * |\overline{I}_o| \cos(\delta) \quad (\text{III.11})$$

En remplaçant l'équation (III.10) dans l'équation (III.11) on obtient :

$$P = \frac{V_o V_r e^{j\delta} - V_r^2}{jL\omega}$$

Après des simplifications on trouve :

$$P = \frac{1}{L\omega} \text{Re}(j[V_r^2 - V_o V_r \cos(\delta)] + V_o V_r \sin(\delta))$$

Et :

$$Q = \frac{1}{L\omega} \text{Im}(j[V_r^2 - V_o V_r \cos(\delta)] + V_o V_r \sin(\delta))$$

Donc :

$$P = \frac{1}{L\omega} [V_o V_r \sin(\delta)] \quad (\text{III.12})$$

Et :

$$Q = \frac{1}{L\omega} [V_r^2 - V_o V_r \cos(\delta)] \quad (\text{III.13})$$

III.5.2-a Imposition de P_o et Q_o

Parmi les problèmes d'interconnexion du système photovoltaïque au réseau c'est la qualité de puissance fournie au réseau. Donc l'imposition de la puissance active P_o et la puissance réactive Q_o injectées au réseau nécessite la réaction sur V_o et δ car $P_o = f(V_o, \delta)$ et $Q_o = f(V_o, \delta)$.

A partir des équations (III.12) et (III.13) on peut en déduire l'expression de V_o et δ :

$$V_o = \frac{\sqrt{(P_o L\omega)^2 + (V_r^2 - Q_o L\omega)^2}}{V_r} \quad (\text{III.14})$$

$$\delta = \arcsin \frac{P_o L\omega}{\sqrt{(P_o L\omega)^2 + (V_r^2 - Q_o L\omega)^2}} \quad (\text{III.15})$$



FIGURE III.9 – Schéma synoptique du principe d'envoi de la puissance active et la puissance réactive

III.6 Le microcontrôleur

Afin de commander et combiner les différents composants de la carte expérimentale, on a utilisé le dsPIC33FJ128MC802 de Microchip. C'est un microcontrôleur numérique de 16-bits à haute performance.

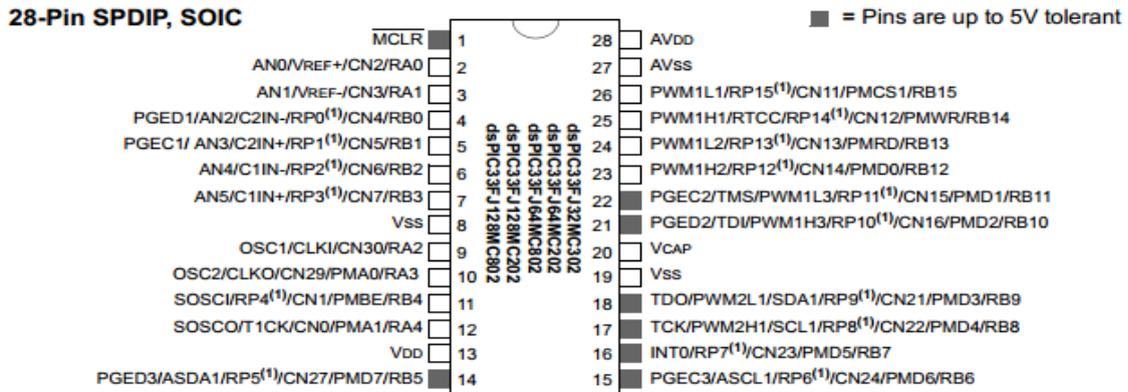


FIGURE III.10 – Diagramme des pins du dsPIC33FJ32MC202

III.7 Acquisition des tensions et leurs mesures

Pour notre réalisation, nous devons mesurer la tension du bus continu et aussi mesurer la tension alternative du réseau. Notre réseau est de 230V. Afin de faire la mesure, on a ajouté un transformateur abaisseur, d'une tension de 220V/24V et d'une puissance de 250VA. L'importance de faire les mesures c'est d'extraire le module de la tension du réseau et connaître l'angle θ .

III.7.1 La tension du réseau (V_r)

La pin ADC (Analog to Digital Converter) du dsPIC s'alimente entre 0 et VDD. Afin de mesurer la tension $v(t) = 24\sqrt{2}\sin(\omega t)$ acquise du réseau par le transformateur, on a besoin d'un montage additionneur non inverseur. Pour cela, on a utilisé l'AOP MCP6002 alimenté en 3.3V. La (figure III.11) montre l'opération à faire.

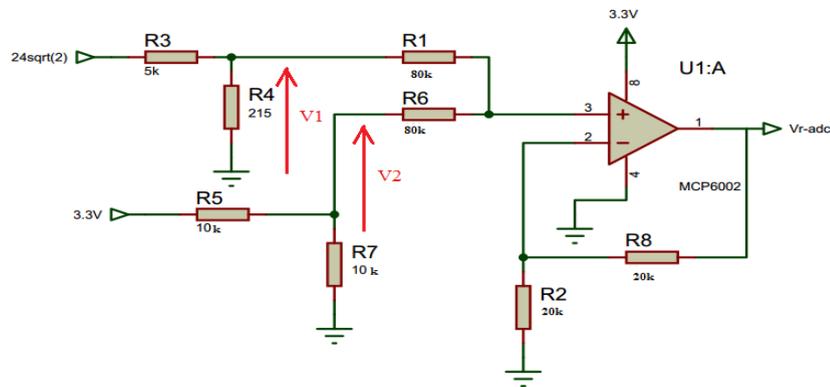


FIGURE III.11 – Le montage additionneur avec l'AOP MCP6002

Le montage précédent a pour but de réaliser l'addition des deux tensions d'entrée $V1 = 1.4V$ et $V2 = 1.65V$.

Ce calcul permet de dimensionner les résistances nécessaires au bon fonctionnement de la mesure

Calcul de V1 : $V_r = 24 \cdot \sqrt{2}V$,

On veut $V1 = 1.4V$,

En appliquant la loi de diviseur de tension on obtient :

$$V1 = \frac{V_r \cdot R_4}{R_3 + R_4}$$

$$\Rightarrow R_3 = R_4 \cdot \left(\frac{24 \cdot \sqrt{2} - 1.4}{1.4} \right)$$

$$\Rightarrow R_3 = R_4 \cdot 23.24$$

on pose $R_4 = 215\Omega$

Donc : $R_3 = 5K\Omega$

Calcul de V2 : $V_{DD} = 3.3V$,

On veut $V2 = 1.65V$,

On appliquant la loi de diviseur de tension on obtient :

$$V_2 = \frac{V_{DD} * R_7}{R_5 + R_7}$$

$$\Rightarrow R_5 = R_7 * \left(\frac{3.3 - 1.65}{1.65} \right)$$

$$\Rightarrow R_5 = R_7$$

On pose $R_7 = 10k\Omega$

Donc : $R_5 = 10k\Omega$

L'AOP est supposé idéal, en régime linéaire ($V_+ = V_-$).

Alors pour déterminer V_s de l'additionneur non inverseur il faut déterminer V_+ et V_- de l'équation $V_+ = V_-$:

Calcul de V_+ : à l'aide du théorème de Millman on peut en déduire cette formule :

$$V_+ = \frac{V_1 * R_1}{R_1 + R_6} + \frac{V_2 * R_6}{R_1 + R_6}$$

Si $R_1 = R_6$:

$$V_+ = \frac{V_1}{2} + \frac{V_2}{2}$$

Calcul de V_- : à l'aide du diviseur de tension on peut en déduire cette formule :

$$V_- = V_s * \left(\frac{R_2}{R_2 + R_8} \right)$$

Sachant que ($V_+ = V_-$), on a :

$$V_s * \left(\frac{R_2}{R_2 + R_8} \right) = \frac{V_1}{2} + \frac{V_2}{2}$$

$$\Rightarrow V_s = \frac{R_2 + R_8}{2 * R_2} * (V_1 + V_2)$$

Si $R_2 = R_8$: $V_s = (V_1 + V_2)$

Dans notre montage, V_s c'est V_{r_adc}

$$R_1 = R_6 = 80K\Omega$$

$$R_2 = R_8 = 20K\Omega$$

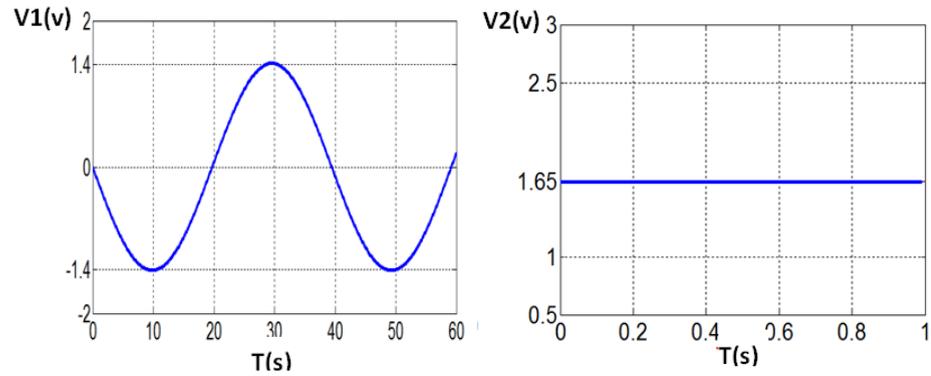


FIGURE III.12 – Les allures de V_1 et V_2

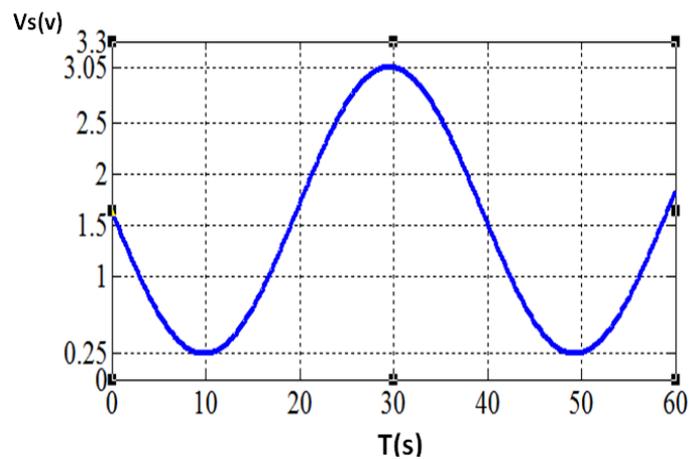


FIGURE III.13 – L'allure de V_s

III.7.2 La tension V_c du hacheur

Afin de lire la tension de sortie du hacheur, nous devons la mesurer à l'aide de l'AOP MCP6002. La (figure III.14) suivante montre le raccordement nécessaire pour le montage suiveur.

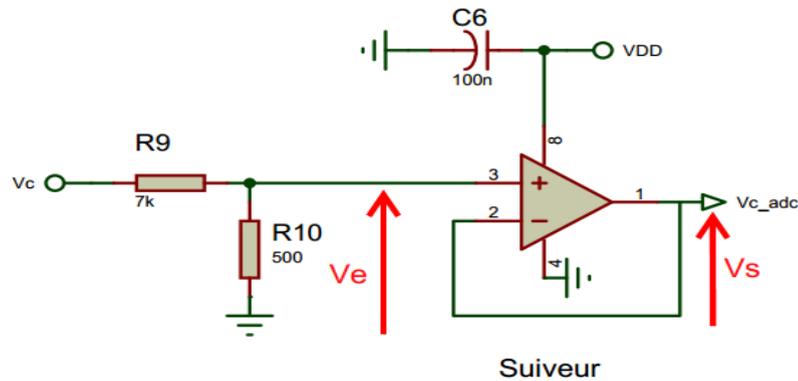


FIGURE III.14 – Le montage suiveur avec l’AOP MCP6002

Notre AOP est toujours en fonctionnement linéaire.

Calcul de V_e : à l’aide du diviseur de tension on peut en déduire cette formule :

$$V_e = \frac{V_c * R_{10}}{R_9 + R_{10}}$$

Si $V_{c_{max}} = 45V$, alors il faut que $V_s \leq 3V$ (pour ne pas dépasser VDD)

$$\Rightarrow R_9 = R_{10} \left(\frac{45-3}{3} \right)$$

$$\Rightarrow R_9 = R_{10} * 14$$

On a choisit $R_9 = 500\Omega$

Donc : $R_{10} = 7K\Omega$

III.8 Le transformateur de tension

Un transformateur basse tension augmente la tension à la sortie de l’onduleur jusqu’au niveau de la tension du réseau et assure une isolation galvanique entre l’onduleur PV et le réseau.

Le transformateur utilisé dans notre réalisation est de puissance de 250 VA et de tension de 220V/2*24V. Le double enroulement au primaire ou secondaire (selon notre considération) donne l’avantage de l’utiliser comme un élévateur de tension pour injecter la tension fourni par l’onduleur et pour l’utiliser comme un abaisseur de tension afin de prendre la mesure de tension de réseau.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes parties de la plate-forme expérimentale et ses différents éléments constitutifs. Les différents composants de la carte expérimentale ont

été dimensionnés et choisi selon le cahier de charge. Malheureusement, nous n'avons pas pu réaliser les tests expérimentaux car la carte n'a pas pu être réalisée à temps.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'onduleur photovoltaïque connecté au réseau électrique sous le nom Grid-Tie Inverter. 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 de l'énergie, particulièrement en Algérie, et d'un meilleur respect de l'environnement. Associées à une production décentralisée, 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.

L'intérêt porté aux énergies renouvelables nous a amené à nous intéresser aux onduleurs photovoltaïques comme production décentralisée. Ces systèmes utilisent des convertisseurs pour se connecter au réseau électrique et la puissance injectée est fortement variable puisqu'elle est dépendante de l'éclairement et la température. Une étude bibliographique a permis de recenser les différents systèmes photovoltaïques pouvant être connecté au réseau.

Notre travail de simulation, de réalisation et l'étude de la connexion au réseau électrique se résume à un convertisseur DC/DC de type Boost entrelacé qui fournit une tension continue. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur de tension en minimisant les ondulations du courant ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible et un autre convertisseur DC/AC commandé par la MLI qui converti la tension continu à une tension alternative filtrée par un filtre L et on les a modélisés et simulés sous Matlab-SIMULINK. Les résultats de la simulation ont démontré l'intérêt d'un dispositif entrelacé.

De cette étude ressort l'importance de la modélisation de la connexion au réseau électrique et de ces systèmes de production. La commande de l'onduleur et les systèmes de productions déterminent le comportement principal de la production d'énergie sur le réseau basse tension. Les technologies actuelles permettent une souplesse de commande importante et même de s'adapter aux défauts du réseau

et ainsi de ne pas être déconnectée du réseau.

Bibliographie

- [1] *cours électronique de puissance conversion continu-alternative*. 2012.
- [2] Philippe Barrade. *l'électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaires. press polytechnique et universitaires, 1ère édition*, 2006.
- [3] Huang Bin. *Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour application pile a combustible*. 14 mai 2009.
- [4] Christian Ripoll Bogdan Grabowski. *Aide-mémoire Électronique*. Dunod, 5e édition, 2008.
- [5] C.Galize. *coures ,introduction à l'électrotechnique et à l'électronique de puissance*. université de montpelleir, 12/02/2002.
- [6] 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.
- [7] CH.Maher. *Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque*. 2007-2008.
- [8] 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. EDF, France.
- [9] Matthias Jahn Detlef Schulz and Thomas Pfeifer. *Grid Integration of Photovoltaics and Fuel Cells*. Department of Electrical Engineering, Electrical Power Engineering, Helmut-Schmidt University, Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg, Germany.
- [10] M.Amaud Deves. *énergie photovoltaïque (application au traitement de l'eau potable et des eaux usées en rurales)*. *Revue des Energies Renouvelables FN-DAE*, Volume 11, No 12, 2003.
- [11] Violaine Didier. *Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances*. sous la direction de Bruno Gaiddon HESPUL, Août 2007.
- [12] Mr .S. Rajasekaran D.Jeba Sundari Newlin, R.Ramalakshmi. *A Performance Comparison of Interleaved Boost Converter and Conventional Boost Converter for Renewable Energy Application*. Number 978-1-4673-2594-3/13. IEEE, March 14-15, 2013, India.

- [13] V. Didier et B. Gaiddon. *Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, État de l'Art et Étude des Performances*. HESPUL, Août 2007.
- [14] M.N.Mchalikh et CH.Hmada. *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau Mémoire de Master*. 2013.
- [15] O.BENSEDDIK et F.DJALOU. *Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque Mémoire de Master*. 27/06/2012.
- [16] R. Teodorescu F. Blaabjerg. *Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems*. Number Vol.53, No.5. IEEE Transaction on Industrial Electronics, October 2006.
- [17] BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA. *La Commande Dun Système Photovoltaïque Dun Satel lite*. 08 Octobre 2013.
- [18] José Antenor Pomilio Felipe S. Garcia and Giorgio Spiazzi. *Modeling and control design of the interleaved double dual boost converter*. Number vol.60, no.8, pp.3283-3290. IEEE Transaction Industrial Electronics, Août 2013.
- [19] J. S. Lawler Hui Li, Fang Z. Peng. *A natural ZVS medium power bidirectional DCDC converter with minimum number of devices*. Number vol. 39, pp.525-534. IEEE transaction on industry applications, Mars 2003.
- [20] I.Bendjamaa. *Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque Mémoire de Magister*. 2011/2012.
- [21] MUHAMMAD H. RASHID J. David Irwin. *Power electronics Handbook*. University of West Florida Joint Program and Computer Engineering, 2001.
- [22] Merabet Kamel. *commande mu d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension triphasée*". 2011.
- [23] K.Sobaihi. *étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction Mémoire de Magister*. 2008.
- [24] Alain Bilbao learreta. *Rapport destage Projet Fin d'Etudes*. 2006.
- [25] Alain Bilbao learreta. *Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome Mémoire de Magister*. 2007-2008.
- [26] Photovoltaïc ALPV Module manufacuring. *Fiche Technique ALPV230-156P-60*. Algeria Photovoltaïc, 2/11/2010.
- [27] S. Mekhilef and N.A. Rahim. *XilinX FPGA based three phase PWM inverter and its application for utility connected PV system*. Number pp. 2079-2082. Proceeding of IEEE TENCON'02, 2002.
- [28] M.L.Louazane. *Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla Mémoire de Magister*. 16/06/2008.
- [29] Abouchabana Nabil. *Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT, Mémoire de Magister*. 2009.
- [30] A. Oi. *Design and simulation of photovoltaic water pumping system*. Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo September 2005.

-
- [31] Y. Pankow. *Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension*. Thèse de doctorat de l'école National supérieure d'Art et Métiers, Décembre 2004.
 - [32] Michel Pinard. *convertisseurs et électronique de puissance*. Dunod, 2007.
 - [33] L298 DUAL FULL-BRIDGE DRIVER DATA SHEET. STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES.
 - [34] 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.
 - [35] Lequeu Thierry. *Cours d'électronique de puissance, IUT GEII 2 ième année, Option EEP*. 2004/2005.

Annexe A : Le panneau photovoltaïque ALPV

Fabricant	ALPV
Modèle	ALPV230-156P-60
Type de cellules	Panneau solaire polycristallins, 156 x 156 mm
Puissance maximal (Pmax)	230W
Tolérance pour Pmax	0/+5Wc
Tension en circuit ouvert (Voc)	37.17V
Courant de court circuit (Isc)	8.31a
Tension à Pmax (Vpm)	29.32V
Courant à Pmax (Ipm)	7.84A
Tension maximale du système	1000V
Dimensions(mm)	1663x998x35
Poids	19.5Kg
Rendement	14.40%
Conditionnement	25 modules par palette

Annexe B : Schéma de simulation du panneau photovoltaïque ALPV 230W

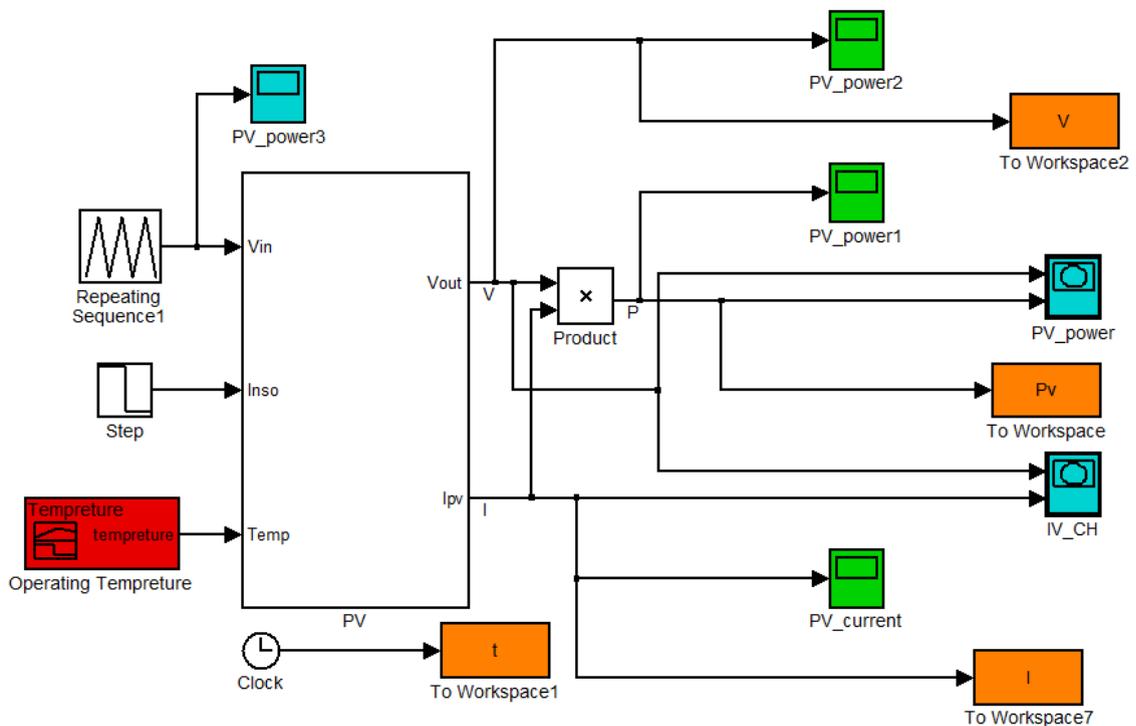


FIGURE 15 – Schéma de simulation du panneau photovoltaïque ALPV 230W

Le schéma précédent montre la simulation d'un panneau photovoltaïque de 230 Watts en agissant sur la température et l'irradiation. A la sortie, on obtient les allures de $I=f(V)$ et $P=f(V)$.

Annexe C : Schéma de simulation du hacheur boost entrelacé

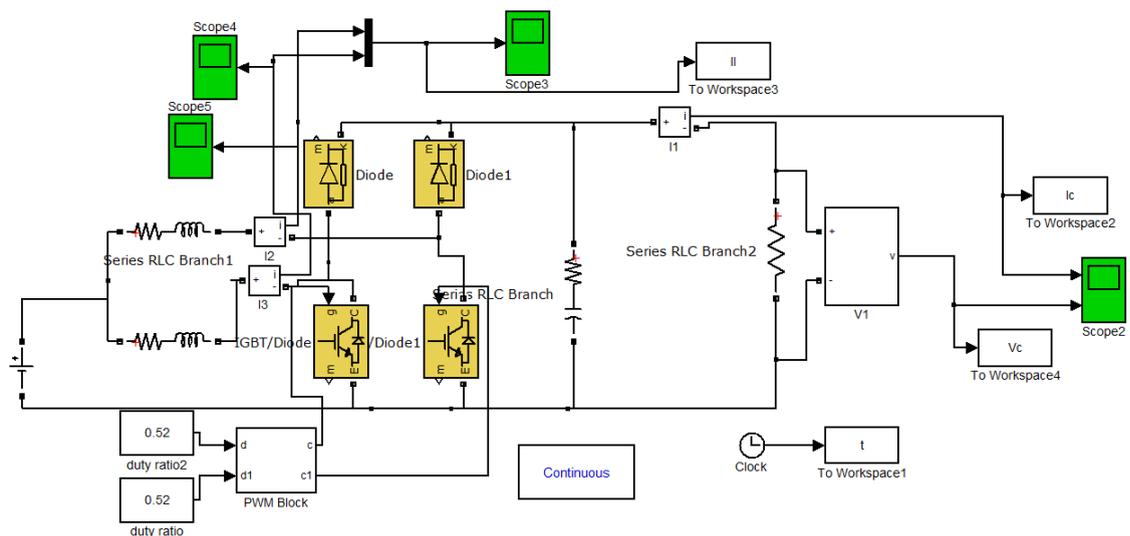


FIGURE 16 – Schéma de simulation du hacheur boost entrelacé

Le schéma précédent montre les composants du hacheur BOOST entrelacé. Il est constitué de deux hacheurs classiques élévateurs, chacun de ces derniers se compose d'une inductance, d'un IGBT et d'une diode par contre à la sortie ils contiennent un condensateur commun et une résistance qui simule la charge.

Annexe D : Schéma de simulation de l'onduleur de tension en pont

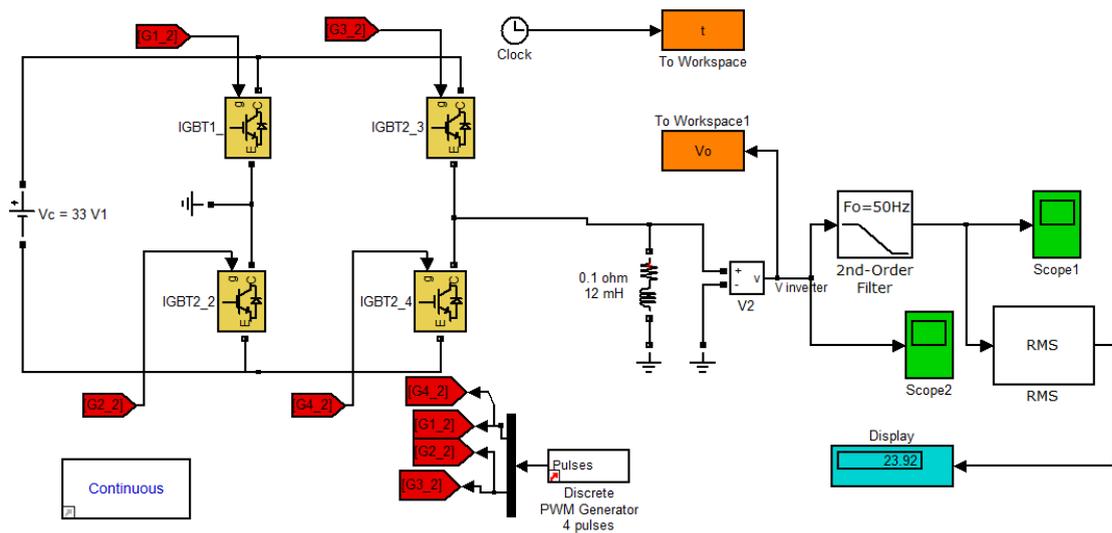


FIGURE 17 – Schéma de simulation de l'onduleur de tension en pont

L'onduleur de tension en pont précédent se compose de 4 IGBT avec une source de tension continue.

Annexe E : Schéma électrique global de la carte expérimentale

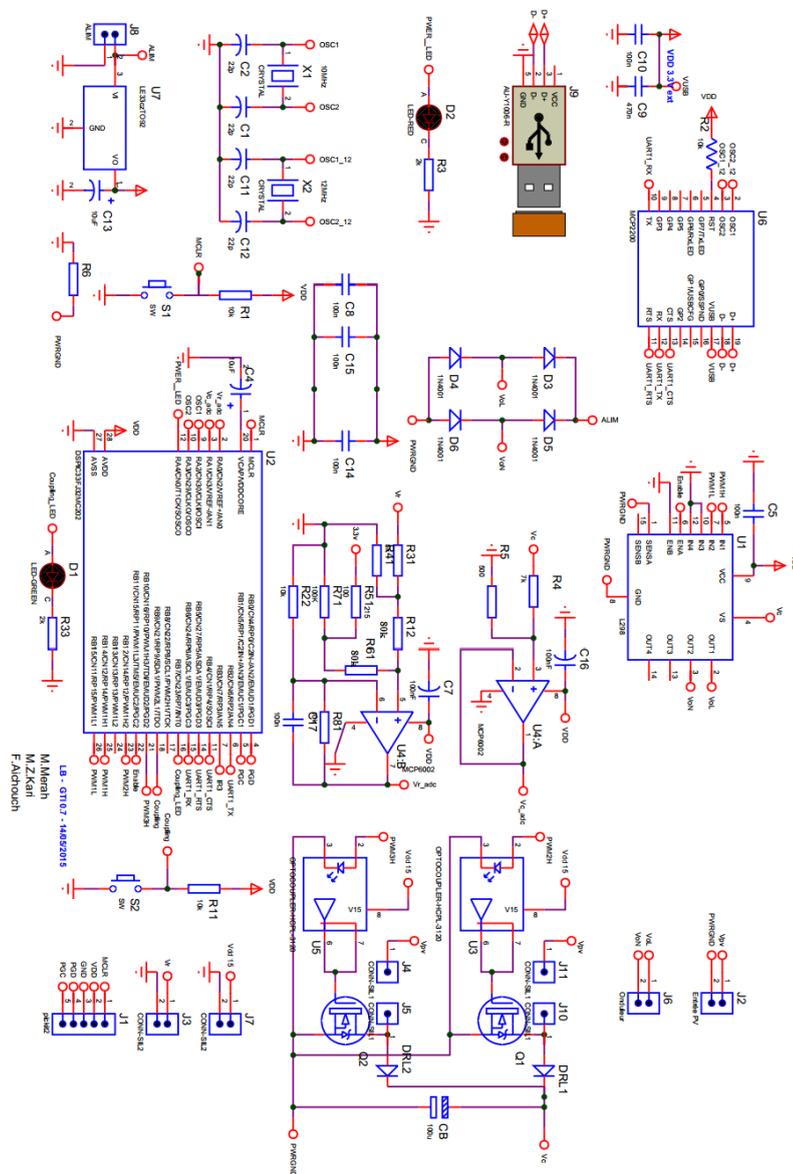


FIGURE 18 – Schéma électrique global de la carte expérimentale

CONCEPTION, SIMULATION ET RÉALISATION D'UN ONDULEUR PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTÉ AU RÉSEAU (

Résumé GRID-TIE INVERTER)

Les convertisseurs électrique sont utilisés dans plusieurs domaines et jouent un rôle primordial dans les applications photovoltaïques. Les travaux de ce mémoire portent de la conception, la simulation et la réalisation d'un onduleur photovol-taïque connecté au réseau. Dans un premier temps, l'état de l'art sur les GTI, les technologies des GTI, les différents types des systèmes photovoltaïques sont également passées en revue. Puis une étude sur les convertisseurs utilisés dans la plus part des onduleurs photovoltaïques raccordés au réseau électrique. Nous avons effectué une étude détaillées et des simulations sur différents parties d'un système photovoltaïque en utilisant un hacheur élévateur entrelacé et un onduleur en pont commandé par MLI. Après, l'architecture matérielle, les particularités, les mesures et les contrôle des puissance active et réactive employées sont détaillées. Les ap-proches de commande retenues, leurs principales fonctions, ainsi que leurs concep-tions sont présentées. Les solutions envisagées ont réalisées et imprimées sur cartes électroniques. Enfin une conclusion générale, donne une synthèse des principaux résultats et résume l'apport de ce travail.

Mots clés

Grid-Tie Inverter, onduleur photovoltaïque, Hacheur boost entrelacé, système pho-tovoltaïque, microcontrôleur, interconnexion au réseau .

CONCEPTION, SIMULATION AND REALIZATION OF A GRID

Abstract TIE INVERTER

The power converters are used in many areas and play a key role in photovoltaic applications. The work of this thesis are the design, simulation and implementation of a grid tie inverter. Firstable , the state of the art on the GTI, GTI's technology, different types of PV systems are also reviewed. Then a study of converters used in most grid tie inverter. Nous did a detailed study and simulations on different parts of a photovoltaic system using a interleaved boost chopper and a full-bridge inverter controlled with PWM. Next, the hardware architecture, features, measurement and control of active and reactive power used are detailed. Retained control approaches, their main functions and their designs are presented. The proposed solutions have made and printed on electronic cards. Finally a general conclusion gives a summary of key solutions and summarizes the contributions of this work.

Keywords

Grid-Tie Inverter, interleaved boost converter, photovoltaic system, microcontrol-ler, interconnection to the grid.

فهم، محاكاة وتطبيق عاكس الطاقة الشمسية المتصلة بالشبكة

الملخص

تستخدم المحولات الكهربائية في العديد من المجالات وتلعب دورا رئيسيا في تطبيقات الطاقة الشمسية. عمل هذه المذكرة يضم تصميم، محاكاة وانجاز عاكس الطاقة الشمسية المتصلة بالشبكة. في البداية، أيضا أنواع مختلفة من النظم الكهربائية الضوئية. قد تم GTI تكنولوجيا، GTI دراسة حالة فن أجهزة مراجعتهم تم استعراضهم. ثم دراسة المحولات المستخدمة في معظم عاكسات الطاقة الشمسية المتصلة بالشبكة الكهربائية. لقد قمنا بدراسة مفصلة والمحاكاة على أجزاء مختلفة من نظام عاكسات الطاقة الشمسية باستخدام محول الطاقة (مستمر - مستمر) مكبر على التوازي و العاكس رباعي التحكم بتعديل عرض النبض (على الجسر). بعد ذلك، بنية الأجهزة و الميزات، والقياس والسيطرة على الطاقة الفاعلة والطاقة الارتكاسية المستعملة قد تم تفصيلها. أيضا فهم مضمونهم قد تم الإشارة إليه، الحلول المدركة قد تم تنفيذها و طباعتها على لوحة الكترونية. أخيرا استنتاج عام يعطي ملخصا للنتائج الرئيسية و يلخص مساهمات هذا العمل

الكلمات المفتاح

تطبيقات الطاقة الشمسية، عاكس الطاقة الشمسية المتصلة بالشبكة، محول الطاقة (مستمر - مستمر) مكبر على التوازي، العاكس رباعي التحكم على الجسر