

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

BEGGAR Abderrahmane | SISSAOUI Mohamed

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industriel

Étude et analyse des onduleurs des systèmes solaires photovoltaïques

Soutenu devant le jury composé de:

MESSAOUDI	Noureddine	MCB	UMBB	Examineur
KHALFI	Kamel	MCB	UMBB	Examineur
MILOUDI	Lalia	MCB	UMBB	Promotrice

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Nous louons ALLAH pour tous les bienfaits dont Il nous a gratifiés.

Ces quelques lignes pour citer les personnes qui nous ont aidés à mener à terme ce travail et qu'on souhaite sincèrement remercier.

*On tient à remercier chaleureusement le **Dr. MILOUDI** notre promotrice pour ses remarques pertinentes et sa patience. Elle a su nous inculquer le sens du compter sur soi ce qui nous a permis de mettre en œuvre nos propres idées.*

Nos remerciements vont aussi à ceux qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail, le président de jury et les examinateurs

Nous remercions également tous les enseignants du département de génie électrique pour leurs contributions à notre formation

Merci à tous qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

À ma mère, décédée trop tôt, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, elle apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde

À mon père, aucun mot ne peut porter le poids de la gratitude, le respect et l'amour que je lui porte. Ma plus grande réussite est de rendre cet homme exemplaire fier de son fils

À ma chère sœur Meriem, merci d'avoir toujours été l'exemple à suivre, de m'avoir toujours soutenu, d'avoir été la grande sœur et l'amie qu'on espère avoir

À mes chers frères Faycel et Samir

À tata khadija

À Tous mes amis, tous mes camarades et particulièrement :

Mon binôme Mohamed, Ayoub, Abdelhak, Mohamed, Abdelghani, Yazid, Djilali, Mohamed elfateh et Malik

Et à tous ceux qui ont une relation de proche ou de loin avec la réalisation du présent rapport.

BEGGAR Abderrahmane

Le 24/09/2020

Dédicaces

À toi ma mère : Ma raison d'être, sans toi je ne serais jamais arrivé à écrire ces lignes ;

Tu as tout donné pour tes enfants, tu as sacrifié ta vie pour nous éduquer, tu as veillé des nuits pour que nous puissions dormir. Tu étais spécialement présente lors de mes moments de doutes, si je me suis relevé aujourd'hui c'est que tu en es la raison. Aucune expression n'est assez forte, pour décrire la magnifique maman que tu es, que dieu te garde pour moi et pour les gens qui t'aiment.

À toi mon père : La boussole de ma vie, le papa qui a consacré sa vie pour sa famille, l'homme qui a toujours su subvenir à nos besoins. Tu resteras à jamais le meilleur exemple à suivre, je ne serais jamais assez reconnaissant envers toi, Merci Papa.

À mes 2 sœurs, à mon frère, que dieu vous garde.

À la meilleure compagnie de tous les temps, Ayoub, Mohamed, Yanis, Djilali.

À Abdou BEGGAR, mon précieux ami, avec qui j'ai partagé tant de souvenirs avant d'être mon binôme pour ce travail.

À vous mes très chers amis, Ayoub et Melissa DEBA, je vous remercie pour vos précieux conseils et pour le bonheur que vous m'apportez au quotidien.

À l'ensemble des étudiants du département de l'Ingénierie des Systèmes Électriques.

SISSAOUI Mohamed
Le 24/09/2020

Résumé

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de 20 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an.

Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts 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 modules photovoltaïques systèmes 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 PV.

L'objectif de ce travail est de mieux faire connaître l'un des appareils d'électronique de puissance qui est l'onduleur PV en présentant une synthèse de l'état de l'art de ce dispositif industriel photovoltaïque, son principe de fonctionnement, ses principaux types rencontrés sur le marché, suivie d'une présentation des techniques de commande de l'onduleur et d'une simulations en utilisant le logiciel MATLAB/Simulink ainsi que ses différentes applications et ses critères de choix.

Abstract

At the global level, the photovoltaic systems market has been growing at a very high rate of 30 to 40% per year for more than 20 years now.

This exceptional growth, which is mainly due to photovoltaic systems connected to the electricity distribution network, is of course reflected in technological innovations and lower costs for photovoltaic modules, but also in major research and development efforts in the field of power electronics.

Indeed, the technical performance and reliability of the inverters used to connect the photovoltaic modules to the electricity distribution network are parameters that can strongly influence the annual production of electrical energy and therefore the financial profitability of a PV system.

The objective of this work is to provide a better understanding of one of the power electronics devices that is the PV inverter by presenting a synthesis of the state of the art of this industrial photovoltaic device, its operating principle, its main types found on the market, followed by a presentation of the control techniques of the inverter and a simulation using the MATLAB/Simulink software as well as its various applications and selection criteria.

ملخص

على المستوى العالمي، كانت سوق الأنظمة الكهروضوئية تنمو بمعدل مرتفع للغاية من 30 إلى 40% سنوياً لأكثر من عشرين عاماً الآن. وهذا النمو الاستثنائي، الذي يرجع أساساً إلى النظم الكهروضوئية المتصلة بشبكة توزيع الكهرباء، ينعكس بطبيعة الحال في الابتكارات التكنولوجية وانخفاض تكاليف الوحدات الكهروضوئية، ولكن أيضاً في جهود البحث والتطوير الرئيسية في مجال إلكترونيات الطاقة. والواقع أن الأداء الفني والموثوقية التي يتمتع بها اللاووتر المستخدمة في ربط الوحدات الكهروضوئية بشبكة توزيع الكهرباء من البارامترات القادرة على التأثير بقوة على الإنتاج السنوي للطاقة الكهربائية، وبالتالي الربحية المالية للنظام الكهروضوئي.

والهدف من هذا العمل هو توفير فهم أفضل لأحد الأجهزة الإلكترونية العاملة بالطاقة وهو محول الطاقة الكهروضوئية من خلال تقديم توليفة من أحدث هذه الأجهزة الضوئية الصناعية، ومبدأ تشغيلها، وأنواعها الرئيسية الموجودة في السوق، يليه عرض لتقنيات التحكم في العاكس ومحاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink بالإضافة إلى التطبيقات المختلفة ومعايير الاختيار الخاصة به.

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Dédicaces

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations et symboles

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

CHAPITRE 1: ÉTAT DE L'ART

INTRODUCTION 5

1. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE..... 5

1.1 Définition 5

1.2 Types de panneaux photovoltaïques..... 5

1.3 La cellule photovoltaïque 6

1.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (PV) 6

1.5 Installation solaire photovoltaïque..... 7

1.6 Système photovoltaïque avec stockage de l'électricité 7

1.7 Système photovoltaïque à autoconsommation relié au réseau 8

2. L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE 9

2.1 L'électronique de puissance et la conversion électrique 9

2.2 Les convertisseurs électriques 10

3. LES ONDULEURS 11

3.1 Définition..... 11

3.2 Le rôle de l'onduleur..... 12

3.3 Historique 12

3.4 Les différentes topologies d'un onduleur photovoltaïque 13

3.4.1	Onduleur centralisé (Central-plant inverter)	13
3.4.2	Onduleur modulaire (Module-integrated inverter)	14
3.4.3	Onduleur de rangé (string inverter)	14
3.4.4	Onduleurs Multiple-string	15
3.5	Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques (PV).....	17
3.6	Principe de fonctionnement	18
3.7	Installation et entretien d'un onduleur photovoltaïque	19
3.7.1	Installation	19
3.7.2	Entretien	19
3.8	Les grands leaders et fabricants d'onduleurs photovoltaïques	19
3.9	Comparatif des critères de choix de l'onduleur photovoltaïques	21
CONCLUSION		22

CHAPITRE 2: FONCTIONNEMENT ET SIMULATION DES ONDULEURS

INTRODUCTION	24
1. LES DIFFERENTES STRATÉGIES DE COMMANDE DES ONDULEURS DE TENSION	24
1.1. La commande en ondes pleines	25
1.2. La commande en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions)	26
2. LES TYPES DES ONDULEURS	26
2.1. Onduleur Monophasé	26
2.1.1. Onduleur de tension monophasé en demi-pont	26
2.1.2. Onduleur de tension monophasé en pont	27
2.2. Onduleur triphasé	29
2.2.1 Commande d'un onduleur triphasé.....	30
3. LA COMMANDE MLI	31
3.1. Principe de base de MLI	31
3.2. Les caractéristiques de MLI	31
3.3. Les différents types de modulation	32
3.3.1. Modulation naturelle	32
3.3.2. Modulation régulière	32
3.4. Technique de production d'onde MLI	32
3.4.1. Technique analogique	33
3.4.2. Technique digitale (numérique).....	33
3.4.3. Technique hybride	33
4. DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE MODULATION DE LARGUEUR D'IMPULSIONS	34
4.1. MLI simple	34

4.2. MLI multiple	36
4.3. MLI Sinus triangulaire (sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM))	36
5. SIMULATION DE L'ONDULEUR PHOTOVOLTAÏQUE AVEC LA COMMANDE MLI	37
5.1. Onduleur monophasé	37
5.1.1. Modélisation du circuit	37
5.1.2. Résultat de la simulation	39
5.2. Onduleur triphasé	40
5.2.1. Modélisation du circuit	40
5.2.2 Résultat de la simulation	42
CONCLUSION	44

CHAPITRE 3: APPLICATIONS ET CRITÈRES DE CHOIX DES ONDULEURS

INTRODUCTION	46
1. LES APPLICATIONS DES ONDULEURS DANS LES SYSTÈMES SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES.....	46
1.1. Contrôle de la vitesse de rotation des machines à courant alternatif	46
1.2. Assurer la continuité des alimentations des secours	46
1.3. Les applications dans le transport	47
1.3.1. Transport ferroviaire	47
1.3.2. Transport Aériens et maritimes	47
1.4. Alimentation sans interruption (ASI)	48
1.5. La protection des équipements	48
2. LES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES	48
3. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT.....	49
3.1. La compatibilité en puissance	49
3.1.1 La puissance nominale	49
3.1.2 La puissance crête	49
3.2 La compatibilité en tension	50
4. LES AVANTAGES	50
5. LES INCONVENIENTS	50
6. LA DURÉE DE VIE	50
7. LE RENDEMENT	51
8. CONCLUSION.....	53

CONCLUSION GÉNÉRALE	54
Références Bibliographiques :	54

Liste des figures

Figure 1: Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	7
Figure 2: Système photovoltaïque avec stockage de l'électricité.....	8
Figure 3: Système photovoltaïque autoconsommation relié au réseau	8
Figure 4: Système photovoltaïque autoconsommation relié au réseau	10
Figure 5: Schéma symbolique d'un onduleur	11
Figure 6: Installation photovoltaïque autonome.....	11
Figure 7: Onduleur central (Central-plant inverter)	13
Figure 8: Onduleur modulaire (Module-integrated inverter)	14
Figure 9: Onduleur de rangé (string inverter)	14
Figure 10: Onduleur Multiple-string	15
Figure 11: courbe caractéristique typique d'un module photovoltaïque.....	17
Figure 12: Principaux fabricants industriels et fournisseurs des onduleurs photovoltaïques....	20
Figure 13: Principe de fonctionnement d'un onduleur [16]	24
Figure 14: Les différentes techniques de commande	25
Figure 15 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont	26
Figure 16: Schéma de Principe d'un Onduleur de tension Monophasé En pont.....	27
Figure 17: Les trois configurations possibles d'un onduleur monophasé en pont	27
Figure 18: Circuit de puissance d'un onduleur triphasé [22]	29
Figure 19: Réalisation du signal MLI [25].....	30
Figure 20: Technique analogique [28]	32
Figure 21: Technique digital [27].....	33
Figure 22: Technique hybride [28].....	33
Figure 23: MLI d'une simple impulsion [23].....	34
Figure 24: MLI multiple [31]	35
Figure 25: MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire [27].....	36
Figure 26: Schéma Simulink d'un onduleur monophasé en pont complet.....	37
Figure 27: schéma des composants du SUBSYSTEM utilisé.....	37
Figure 28: Illustration de la MLI Sinus triangle (Monophasé)	38
Figure 29: le courant de sortie de l'onduleur monophasé.....	39
Figure 30: Schéma Simulink d'un onduleur triphasé en pont complet	40
Figure 31: schéma du bloc UNIVERSAL bridge sous Simulink.....	41
Figure 32: Illustration de la MLI Sinus triangle (triphase)	41
Figure 33: Allure de courant de l'onduleur triphasé avec la commande MLI	42
Figure 34: variation de la vitesse d'une machine synchrone [32].....	45

Figure 35: Alimentation de secours	46
Figure 36: Alimentation sans interruption	47

Liste des tableaux

Tableau 1: les différents types d'onduleur et leurs paramètres	15
Tableau 2: comparatif de choix de l'onduleur photovoltaïque [14]	21
Tableau 3: Commande de 180° [24]	30
Tableau 4: Commande de 120° [24]	30

Liste des abréviations et symboles

EPV	Energie photovoltaïque
PV	Photovoltaïque
N	Silicium
P	Bore
Hz	Hertz
HF	haute fréquence
DC	Courant direct
AC	Courant alternatif
MPP	Maximal power point (point de puissance maximal)
MPPT	Maximal power point tracker
W	Watt
MW	Méga watt
U	La tension
I	Le courant
V_0	La tension efficace
V_{C0}	Tension à vide
I_{C0}	Courant court-circuit
I_{Mpp}, I_{opt}	courant optimal
V_{Mpp}, V_{opt}	Tension optimale
V_c	Tension de charge
I_c	Courant de la charge

IP	le type de protection
MLI	Modulation par largeur d'impulsion
PWM	pulse width modulation
P_c	Puissance crête
P_n	Puissance nominale
H	Henry
F	Farad
R	Résistance
C	Conductance
S	Interrupteur
FEM	Force électromagnétique
(m)	nombre d'impulsions
VA	Voltampère
A_p	Amplitude de signal d'onde porteuse
A_r	Amplitude de signal de référence
f_p	Fréquence du signal d'onde porteuse
f_r	Fréquence du signal de référence
(ρ)	le nombre des impulsions par alternance
δ_m	Largeur de la $m^{\text{ème}}$ impulsion

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CONTEXTE

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour leur développement vu que les besoins énergétiques ne cesseront d'augmenter.

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des sources traditionnelles comme le pétrole, le gaz, etc...

L'utilisation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution qui présente des dangers sur l'environnement. De plus cette consommation excessive réduit les réserves de ce type d'énergie d'une façon dangereuse pour les générations futures.

Vu le risque de disparition des sources d'énergie fossiles, l'exploration des domaines des sources à énergies renouvelables est d'une importance majeure pour les années à venir. Les énergies renouvelables sont de plusieurs types, à savoir : hydraulique, éolienne, photovoltaïque ...

Notre étude s'inscrit dans la filière photovoltaïque.

Chaque jour le soleil fournit une énergie lumineuse importante à la terre. Le problème réside dans le fait que la forme sous laquelle nous recevons cette énergie n'est pas directement exploitable. C'est pourquoi nous devons recourir à des procédés de conversion de cette énergie électrique. La première étape est donc de convertir l'énergie lumineuse du soleil en une énergie électrique, cette conversion se fait à l'aide des cellules solaires photovoltaïques, ensuite vient l'étape de mise en forme et d'adaptation aux normes en vigueur afin de profiter au maximum de cette énergie.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse plus particulièrement au rôle de l'onduleur dans un système photovoltaïque. Nous désignons par système photovoltaïque, l'ensemble d'éléments constituant une application industrielle ou domestique tirant son énergie électrique d'un générateur photovoltaïque. Bien sûr, dans ce système l'onduleur est un élément important dans la conversion de l'énergie électrique continue produite par les panneaux photovoltaïques en une énergie alternative qui sera utilisée directement ou injectée dans le réseau.

Notre étude se divise en trois chapitres. L'objectif du premier chapitre est de présenter le principe de fonctionnement, le rôle et les caractéristiques des onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques.

Le second chapitre présente l'étude des différentes techniques de commandes et la simulation d'un onduleur PV sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Dans le troisième et dernier chapitre nous nous intéresserons à l'importance et la présence des onduleurs dans le secteur industriel par leurs diverses applications telle que l'association aux machines électriques, qui permet de réaliser des entraînements électriques à vitesse variable, ainsi que l'alimentation sans interruption et secours des équipements électriques.

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale qui résume les travaux réalisés.

Chapitre 1

Etat de l'art

INTRODUCTION

L'énergie électrique est généralement distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins.

Grâce aux progrès technologiques réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques comme les onduleurs voient progressivement leur champ d'applications s'élargir.

Dans ce premier chapitre, nous faisons un état de l'art sur l'énergie solaire photovoltaïque ainsi qu'une étude descriptive générale sur les onduleurs photovoltaïques est présentée. Cette étude comprend : le rôle des onduleurs photovoltaïques, leurs types, leurs principes de fonctionnements, ainsi que leurs installations et leurs entretiens.

1. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

1.1 Définition

L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source c'est le soleil, ce dernier est considéré comme inépuisable à l'échelle du temps humain. En fin de vie, le panneau photovoltaïque aura produit 20 à 40 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication et à son recyclage.

1.2 Types de panneaux photovoltaïques

Il y a 3 types de panneaux photovoltaïques

- Les panneaux solaires monocristallins sont les panneaux qui ont les taux de rendement les plus élevés. Leur cycle de fabrication est très complexe, ils coûtent donc relativement chers par rapport à leur gain de productivité.

- Les panneaux solaires amorphes (ou micro amorphes) ont des taux de rendement plus faibles mais sont plus actifs par faible luminosité (temps couvert, ombre). Ils coûtent moins chers, mais produisent largement moins d'énergie que les panneaux cristallins.

- Les panneaux solaires poly cristallins (ou multi cristallins) permettent d'avoir le ratio coût/productivité le plus attractif. C'est la raison pour laquelle une grande majorité des installations utilisent actuellement ce type de panneaux. [1]

1.3 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique de base du système qui, exposé aux photons de la lumière, produit de l'électricité. Cet effet photovoltaïque fut découvert en 1839 par le physicien français Antoine Becquerel. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module ou capteur_solaire photovoltaïque et ces modules regroupés entre eux forment une installation solaire. L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et de transport électrique. [2]

1.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (PV)

L'effet photovoltaïque désigne la capacité que possèdent certains matériaux, par exemple le silicium, à transformer l'énergie contenue dans le rayonnement solaire en électricité. En effet, cette transformation ne peut se faire sans capteur qui, appelé cellule photovoltaïque (PV) (ou encore photopile) et composé d'un matériau semiconducteur, absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique

Dans une cellule photovoltaïque, lorsqu'un photon (particule de lumière) est absorbé par le semi-conducteur, il donne naissance à un électron et à un "trou". En effet, ce photon va transmettre son énergie à un électron (particule négative) qui va alors se libérer de l'attraction de son noyau et donc laisser un " trou " (chargé positivement) derrière lui. Pour obtenir un courant électrique, les charges positives (" trous ") et négatives (électrons) doivent être séparées puis attirées vers l'extérieur.

C'est à ce moment qu'intervient le champ électrique interne créé par la jonction PN : c'est lui qui va repousser les électrons dans la zone N et donc séparer les charges. Les porteurs de charges sont ensuite, collectés par l'intermédiaire d'une grille, qui fait office d'anode, à l'avant et un contact, qui fait office de cathode, à l'arrière. On obtient alors une tension continue d'environ 0,5 V entre ces électrodes.

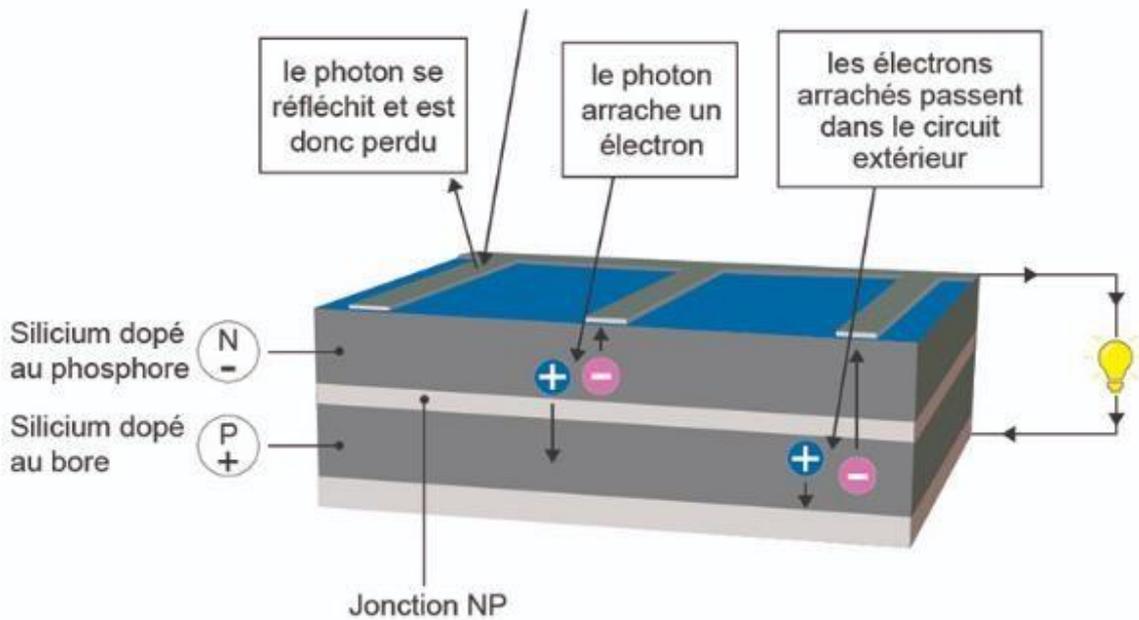


Figure 1: Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

1.5 Installation solaire photovoltaïque

La production du courant par des cellules photovoltaïques repose sur le principe de l'effet photoélectrique. Ces cellules produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire. Ensuite l'utilisation de ce courant continu diffère d'une installation à l'autre, selon le but de celle-ci. On distingue principalement deux types d'utilisation, celui où l'installation photovoltaïque est connectée à un réseau de distribution d'électricité et celui où elle ne l'est pas. [2]

1.6 Système photovoltaïque avec stockage de l'électricité

Les installations non connectées peuvent directement consommer l'électricité produite. À grande échelle, c'est le cas des calculatrices solaires et autres appareils, conçus pour fonctionner en présence de lumière naturelle ou artificielle (dans un logement ou un bureau). À plus petite échelle, des sites non raccordés au réseau électrique (en montagne, sur des îles ou des voiliers, un satellite...) sont alimentés de la sorte, avec des batteries d'accumulateurs pour disposer d'électricité au cours des périodes sans lumière (la nuit notamment). [3]

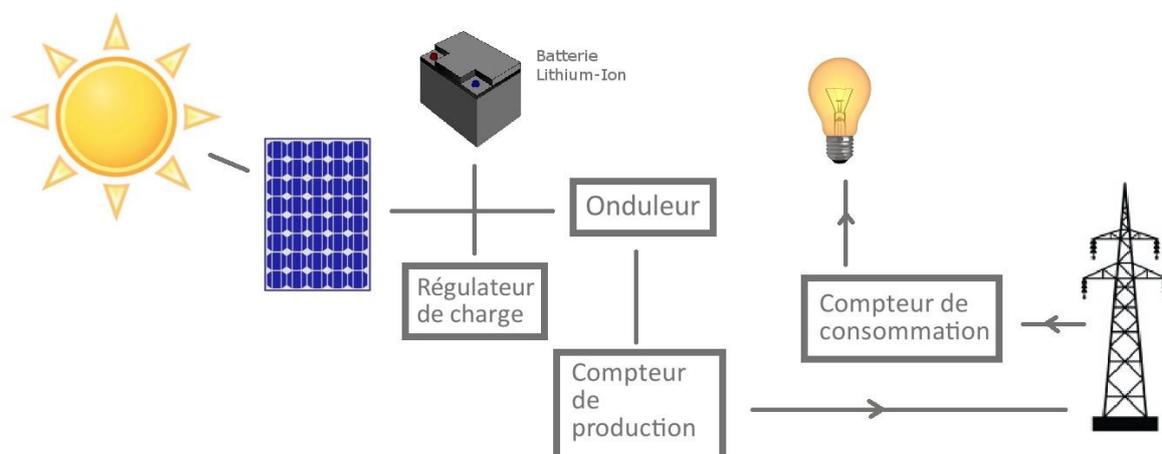


Figure 2: Système photovoltaïque avec stockage de l'électricité

1.7 Système photovoltaïque à autoconsommation relié au réseau

Des installations photovoltaïques sont aussi connectées aux réseaux de distribution électrique. Sur les grands réseaux de distribution (Amérique du Nord, Europe, Japon...), des installations photovoltaïques produisent de l'électricité et l'injectent dans le réseau. Pour ce faire, ces installations sont munies d'onduleurs qui transforment le courant continu en courant alternatif aux caractéristiques du réseau (fréquence de 50 Hz en Europe ou 60 Hz en Amérique du Nord) [3]

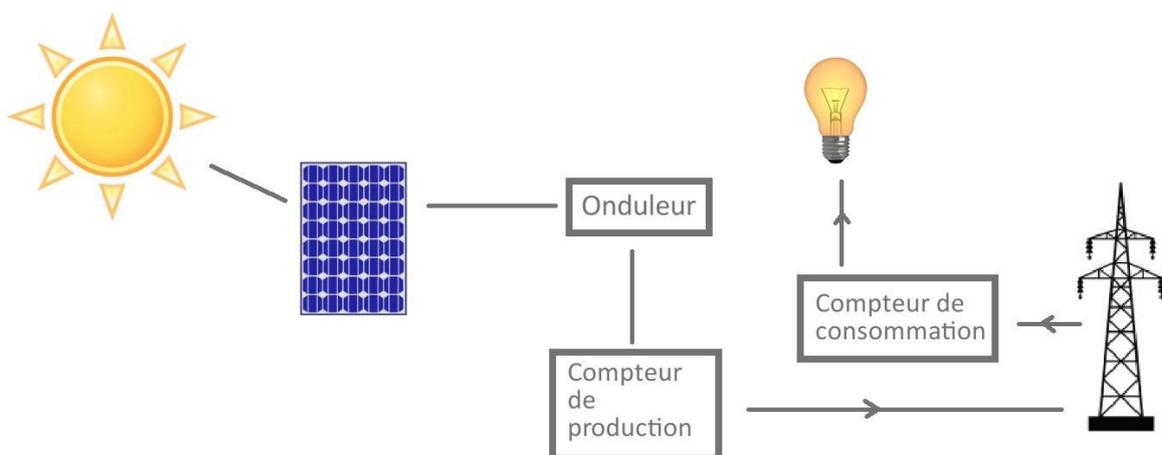


Figure 3: Système photovoltaïque autoconsommation relié au réseau

2. L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

L'électronique de puissance est la branche de l'électrotechnique qui a pour objet d'étudier de la conversion statique d'énergie électrique (notamment les structures, 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

La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseur statique qui sont des dispositifs qui transforment l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge [4].

2.1 L'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, elle utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques. La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseur statique qui sont des dispositifs qui transforment l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge [5].

2.2 Les 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 (Éolienne, photovoltaïque, pile à combustible). [6]

Avec le développement de l'automatique, de l'électronique et de l'informatique, on peut dire que les convertisseurs remplacent les «machines» utilisant des composants électroniques en commutation. [7]

Parmi les avantages de ces convertisseurs :

- Transfert de puissance peut-être contrôlé et même régulé
- Système moins encombrant et moins lourd

Chapitre 1: état de l'art

- Un rendement excellent
- Grâce à l'automatisation une facilité de mise œuvre
- Protections plus efficaces
- Grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants, un coût relatif en baisse.

La figure ci-après représente les types de convertisseurs :

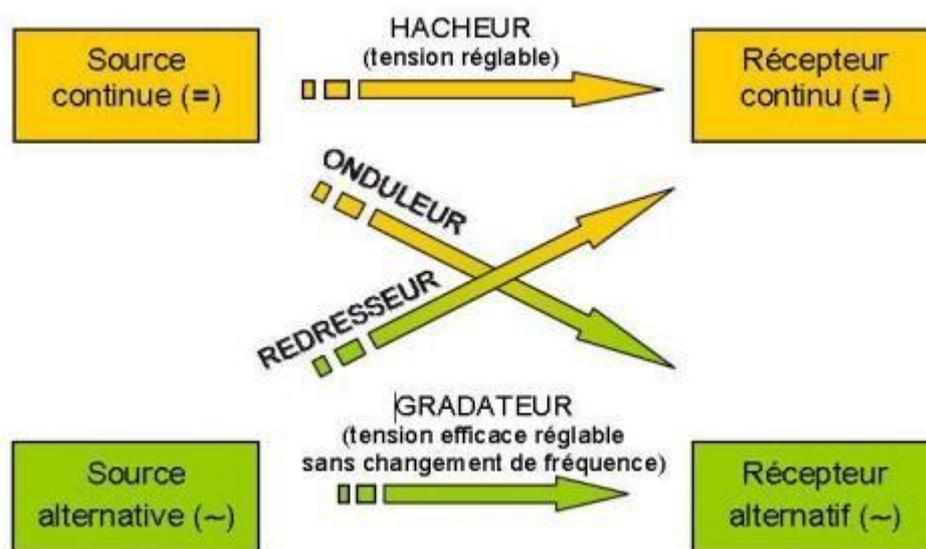


Figure 4: Système photovoltaïque autoconsommation relié au réseau

La tension fournie par les panneaux photovoltaïques est une tension de type continu pour l'adapter à nos besoins il y a deux sortes de convertisseurs :

- les hacheurs **DC-DC**
- les onduleurs **DC-AC**

3. LES ONDULEURS

3.1 Définition

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à fréquence fixes ou variables sous forme d'une alimentation alternative monophasée ou triphasée à partir d'une source d'énergie électrique continue.

L'onduleur est utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif pour assurer l'alimentation en énergie des charges (micro-ordinateur, station de télécommunication) pendant

Chapitre 1: état de l'art

la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux, ...). La représentation symbolique d'un onduleur est donnée par la figure 5. [7]

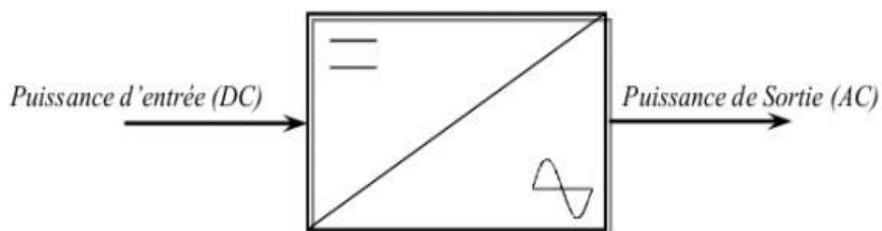


Figure 5: Schéma symbolique d'un onduleur

Les onduleurs photovoltaïques sont incontournables pour un raccordement au réseau des panneaux solaires photovoltaïques.

Ils permettent d'adapter le courant continu sortant du générateur photovoltaïque en un courant alternatif injectable dans le réseau public.

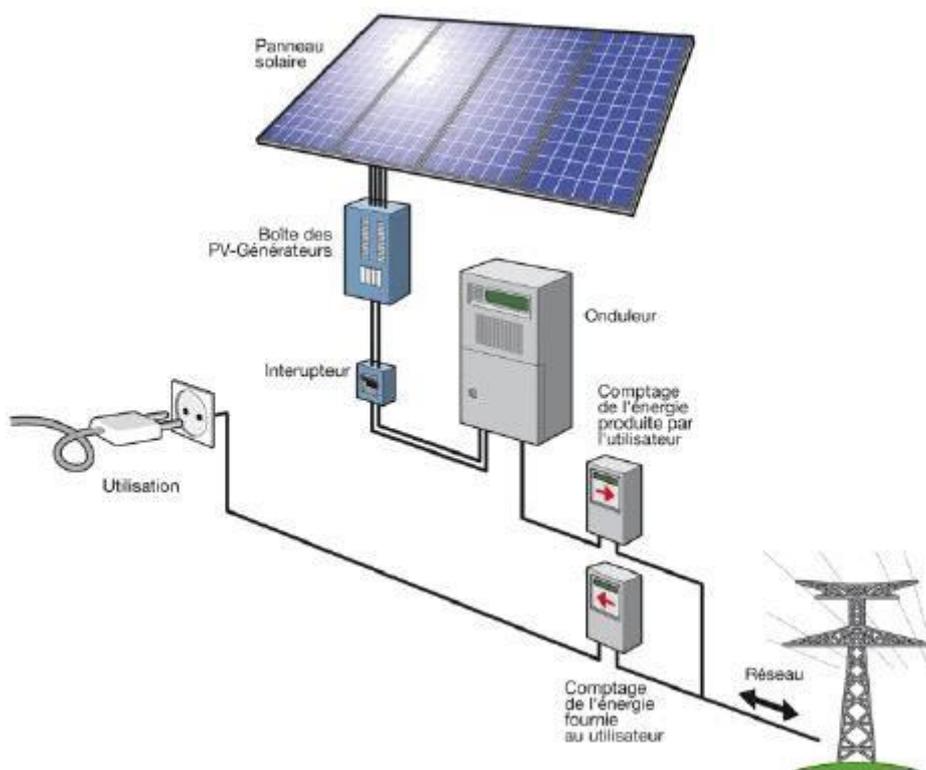


Figure 6: Installation photovoltaïque autonome

Chapitre 1: état de l'art

3.2 Le rôle de l'onduleur

Les onduleurs photovoltaïques ont des fonctions maîtresses dans le cadre d'une utilisation de l'électricité dans le réseau public :

- Transformer le courant continu produit par les modules photovoltaïques en courant alternatif.
- Optimiser le rendement de l'installation en cherchant constamment le point de puissance le plus élevé par rapport au flux lumineux (MPP)
- Protéger l'installation et le réseau contre toutes les anomalies de fonctionnement potentiellement dangereuses (écart de tension, fuite de courant,...)
- Contrôler le fonctionnement général de l'installation et signaler des anomalies : transmission des données, indication de rendement, affichage de messages d'erreurs. [8]

3.3 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 stockent le courant continu qui ne sera converti qu'une seule fois par la suite. C'est important car chaque conversion du courant continu en 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 opérationnelle, 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 rentables pour le particulier.

3.4 Les différentes topologies d'un onduleur photovoltaïque

L'onduleur est souvent considéré comme le "cerveau" d'une installation solaire photovoltaïque. Sa fonction de base consiste à transformer la production de courant continu sortant des panneaux en courant alternatif, qui sera ensuite consommé par nos appareils électriques. Il existe 4 différents types d'onduleurs photovoltaïques :

3.4.1 Onduleur centralisé (Central-plant inverter)

Cet onduleur est à mettre en place pour la totalité du générateur. L'utilisation d'un boîtier de raccordement est nécessaire entre l'appareil et le générateur. Ce type d'onduleur est idéal pour réaliser les montages qui combinent les branchements en série et en parallèle. Il permet de produire un flux lumineux identique pour tous les modules photovoltaïques. Et entre ces modules, on note de faibles tolérances de puissance. Avec un onduleur centralisé, il est possible d'atteindre une puissance de plusieurs MW.

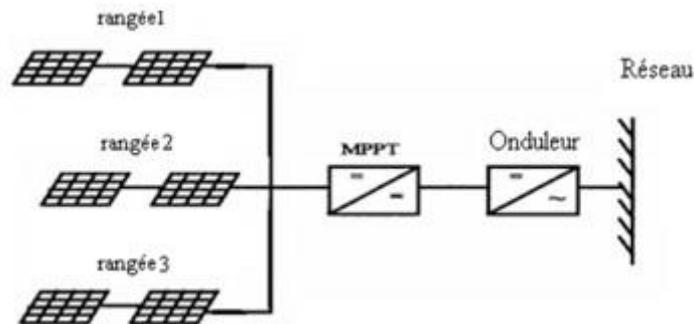


Figure 7: Onduleur central (Central-plant inverter)

3.4.2 Onduleur modulaire (Module-integrated inverter)

La bonne conversion du courant produit par l'installation photovoltaïque peut se faire à partir d'un onduleur modulaire. Avec celui-ci, il est impératif de réaliser un branchement direct des modules sur le réseau. Il est possible que l'installation de l'onduleur sur les modules se fasse en usine. Optez pour une telle solution si l'installation est de petite puissance. On n'aura pas à faire de câblage de courant continu. Et si un module est ombragé, cela n'aura pas d'influence sur le reste de l'installation.

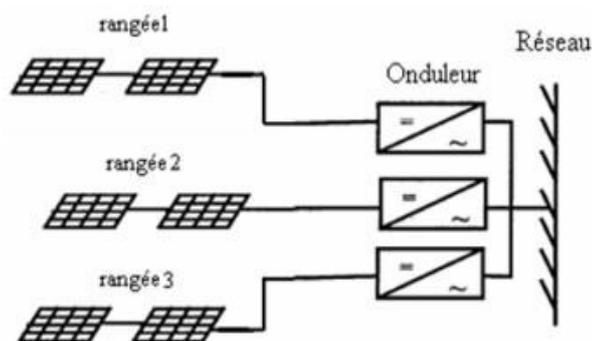


Figure 8: Onduleur modulaire (Module-integrated inverter)

3.4.3 Onduleur de rangé (string inverter)

On parle d'onduleur string lorsque les modules sont branchés dans un string ou rangée. Une telle configuration permet de produire un flux lumineux différent entre les rangées reliées au réseau grâce à un onduleur. La tolérance en cas d'intensités différentes de luminosité entre les rangées est un point positif de l'onduleur string. Il est parfaitement adapté aux installations de grande puissance.

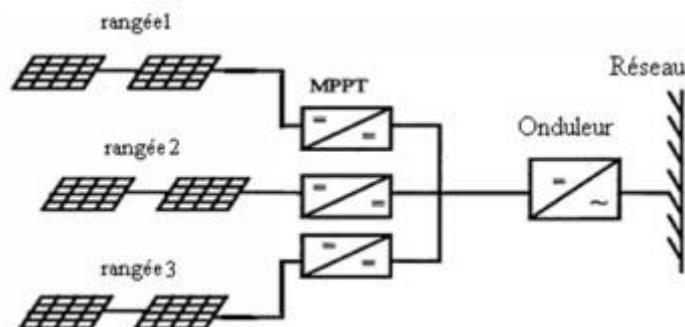


Figure 9: Onduleur de rangé (string inverter)

3.4.4 Onduleurs Multiple-string

Il s'agit d'une association d'onduleurs centralisés et d'onduleurs string. Pour être plus clair, est disposé un onduleur centralisé au niveau du branchement au réseau et un onduleur string là où se trouvent les générateurs. Avec un tel système, il est possible de choisir plusieurs orientations des modules photovoltaïques. Aussi, cette disposition permet d'avoir un rendement plus élevé que celui d'un onduleur centralisé. [9]

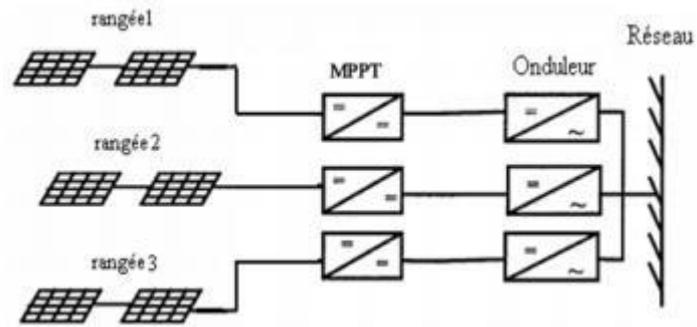


Figure 10: Onduleur Multiple-string

Dans la page qui suit, un tableau de synthèse résumant le type d'onduleur à privilégier suivant ces paramètres.

Tableau 1: les différents types d'onduleurs et leurs 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"> -Fiables tolérances de puissance entre les modules - Possibilité de grimper a une puissance de plusieurs MW
Onduleur 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 -Tolérance aux intensités différentes de luminosité entre les rangées. -Adaptés aux installations de grande puissance
Onduleur Multistring	<ul style="list-style-type: none"> -Association d'onduleurs centralisés et string - Onduleur centralisé du côté du branchement au réseau -Onduleur string du côté du générateur 	<ul style="list-style-type: none"> -Types de modules différents -Orientations de modules variées -Ombres partielles sur l'installation -Nombre de modules différents par rangées 	<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 les réseaux -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

3.5 Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques (PV)

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion DC/AC est le même.

La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système. En effet, le générateur PV (ensemble de modules PV) a une courbe caractéristique IV non linéaire (Figure 11). Pour un éclairement et une température donnés, la tension en circuit ouvert ou à forte charge est à peu près constante (assimilable à une source de tension), tandis qu'en court-circuit ou à faible charge le courant est pratiquement constant (source de courant).

La tension de circuit ouvert est sensible à la température et diminue quand la température augmente. Le courant de court-circuit est quant à lui proportionnel à l'éclairement : augmente si l'éclairement augmente. [10]

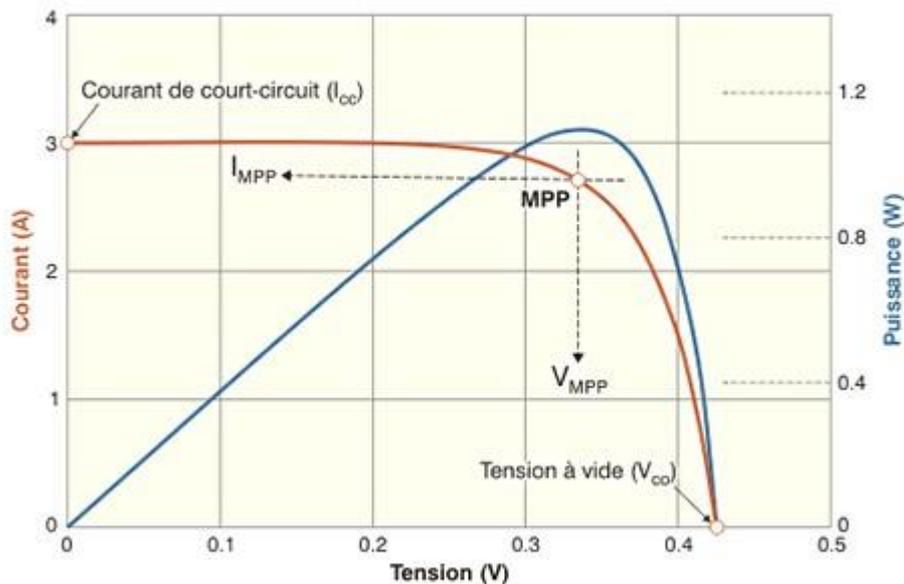


Figure 11: courbe caractéristique typique d'un module photovoltaïque

Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

- Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

Chapitre 1: état de l'art

- Son courant court-circuit : I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

3.6 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de l'onduleur solaire se détermine en fonction du type et des performances du système de production solaire sur lequel il est installé.

Il est le cœur même de l'installation lorsqu'il est mis en place dans un système connecté au réseau. Il doit assurer la conversion de la tension continue du réseau solaire en tension alternative qui peut être directement utilisée ou exportée vers un réseau électrique public.

D'autre part, il faut qu'il respecte strictement les normes et les exigences du réseau électrique dans ce type de système photovoltaïque. En effet, les onduleurs connectés au réseau doivent par exemple fournir une tension alternative de forme strictement sinusoïdale. En cas de panne du réseau, l'onduleur solaire se désactive automatiquement.

L'onduleur solaire n'est pas obligé de correspondre aux réglementations et aux exigences du réseau électrique s'il est installé sur un système hors réseau. Ce système peut accueillir un ou plusieurs onduleurs en fonction de son envergure.

Quand on transporte beaucoup de puissance (W) dans un câble, on peut soit avoir une tension élevée (U) soit une intensité élevée (I). C'est l'intensité qui crée les pertes d'échauffement par effet Joule. C'est la raison pour laquelle on préfère transporter l'électricité avec des tensions importantes, et que l'on parle de ligne haute tension ou très haute tension. Néanmoins, il faut que la tension au niveau des prises soit la même pour tous (220 V). Il est donc nécessaire d'avoir des postes de transformation. Or, avec un courant continu, on peut arriver à saturation du circuit magnétique d'un transformateur. C'est pour cette raison que le courant alternatif s'est répandu au détriment du courant continu. Il y a d'ailleurs eu une guerre du courant fin 19^{ème} siècle entre Thomas Edison et Nikola Tesla. [11]

3.7 Installation et entretien d'un onduleur photovoltaïque

3.7.1 Installation

Plusieurs normes doivent être respectées pour que l'onduleur fonctionne d'une manière sûre et pour que l'installation soit esthétique.

Le choix de l'emplacement est primordial pour que l'installation soit réussie. Normalement, la durée de vie de l'onduleur est de 20 ans en moyenne, mais l'endroit où il est placé peut

Chapitre 1: état de l'art

énormément influencer sur sa longévité. Il est recommandable ainsi de l'installer dans un endroit frais, sec et propre. S'il est installé à l'extérieur ou s'il est constamment exposé au soleil, alors ses performances diminueront considérablement, car ses composants ne supportent pas ces conditions.

Par ailleurs, son emplacement dans le local n'est pas non plus choisi au hasard. On veillera par exemple à le placer à un endroit facile d'accès pour que son entretien et/ou sa réparation est plus commodes. L'idéal est qu'il reste à proximité des cellules photovoltaïques pour être parfaitement efficace. [12]

3.7.2 Entretien

En tant que composant clé du système photovoltaïque, l'onduleur central doit être opérationnel pendant de nombreuses années, même s'il peut parfois être soumis à des situations très rudes. En effet, les intempéries, l'usure et la poussière peuvent à terme impacter sa durée de vie. Néanmoins, il est tout à fait possible de préserver ses performances en adoptant les bons gestes.

- Un diagnostic complet de l'appareil et une inspection des câbles par des services de maintenance qualifiés doivent être effectués annuellement.
- Il est important de remplacer les pièces au premier signe d'usure pour prévenir les éventuelles pannes.
- Les saletés et les poussières qui couvrent l'onduleur doivent être nettoyées régulièrement.
- Il est aussi ingénieux de prévoir des pièges contre les nuisibles tels que les souris et les cafards qui peuvent entrer dans l'appareil et risquent d'affecter son bon fonctionnement.

[12]

3.8 Les grands leaders et fabricants d'onduleurs photovoltaïques

Selon une étude publiée par Wood Mackenzie, les Chinois HUAWEI et SUNGROW et l'Allemand SMA ont conservé en 2019 pour la cinquième année de suite leur rang de premiers fabricants mondiaux d'onduleurs PV sur un marché qui a progressé de 18%.

Power ELECTRONICS occupe le 4e rang mondial en conservant sa première place sur le marché américain. De son côté, l'Italien FIMER, à la faveur du rachat des activités onduleurs d'ABB, réalise la plus belle progression, en devenant le cinquième fournisseur mondial d'onduleurs photovoltaïques, se classant pour la première fois dans le top 10.

Les 10 principaux fournisseurs mondiaux d'onduleurs photovoltaïques détenaient 76% du marché en 2019, le même pourcentage que l'année précédente. Depuis 2015, ce pourcentage

Chapitre 1: état de l'art

oscille autour de 75%. De même, les cinq premiers fournisseurs d'onduleurs ont accaparé 56% du marché mondial, soit un point de moins qu'en 2018.

Une analyse de Wood Mackenzie montre que la demande mondiale d'onduleurs a augmenté de 18% l'année dernière. Les dix plus grands fournisseurs d'onduleurs représentaient 76% du commerce mondial. [13]

La figure ci-dessous représente les leaders des fabricants mondiaux de modules photovoltaïques solaires (PV) en 2019 : [13]

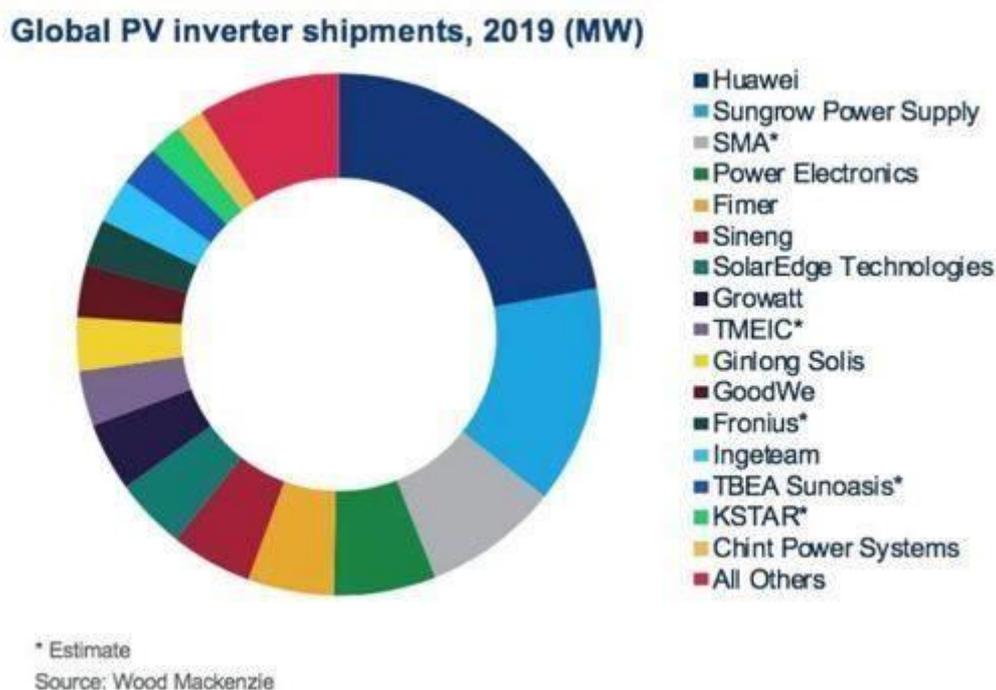


Figure 12: Principaux fabricants industriels et fournisseurs des onduleurs photovoltaïques

3.9 Comparatif des critères de choix de l'onduleur photovoltaïque

Le prix d'un onduleur photovoltaïque représente en moyenne 10 à 20 % du total du coût de l'installation. Le tableau 2, synthétise les principaux critères de choix d'un onduleur photovoltaïque.

Chapitre 1: état de l'art

Tableau 2: comparatif de choix de l'onduleur photovoltaïque [14]

Marques	SMA SUNNY BOY	SMA SUNNY BOY	SHNEIDE R	MASTER VOLT	POWER ONE	SOLARM AX	FRPNIUS
Modèles	3000 TL-21	2500 TL-21	2800	XS 3200	3000	3000 S	IG 30 V1
Type de protection	IP 65	IP 65	IP 43	IP 44	IP 65	IP 54	IP 54
Rendement maximal	97.0%	94.1%	95%	95.4%	96.8%	97%	94.8%
Rendement européen	96.1%	96.0%	94%	94.3%	96%	95.4%	94.8%
Puissance nominale	3000	3000	2800	2500	3000	2500	2500
Pays du fabricant	Allemagne	Allemagne	France	Hollande	Suisse	Suisse	Autriche
Prix	1750 €	1400 €	1390 €	1990 €	1570 €	1300 €	1260 €

Remarque : le pourcentage indique la quantité de courant continu transformé en courant alternatif. Plus ce pourcentage est élevé, plus l'efficacité sera élevée. Les fiches techniques des fabricants d'onduleurs annoncent 2 types de rendement : le rendement maximal, annoncé par le constructeur et le rendement européen (ou Euro-éta). Les rendements européens sont des rendements obtenus dans des conditions identiques entre les onduleurs et permettent une meilleure comparaison entre chaque onduleur.

CONCLUSION :

A travers ce chapitre, nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologies de l'élément principal d'une installation PV qui est l'onduleur, tout en expliquant ses différentes structures ainsi que les leaders du marché mondial des onduleurs PV d'autre part.

En comparant les caractéristiques techniques de chaque type d'onduleur, et en se basant sur le côté économique, en déduit que chaque fabricant met en partie ce qu'il veut, du coup, le choix de l'onduleur idéal pour chaque installation PV, nécessite en effet de la patience et de nombreuses recherches.

Chapitre 2

Fonctionnement et
simulation des onduleurs

INTRODUCTION

Ce chapitre on présente une brève description des onduleurs ; qui rendent l'énergie plus facile et plus accessible pour l'utilisation ainsi que les différentes techniques de commande

La commande souvent adaptée aux convertisseurs statiques est la stratégie MLI. Plusieurs méthodes ont été développées avec l'objectif de générer à la sortie de l'onduleur Une tension sinusoïdale ayant le moins d'harmoniques possibles [15].

Après avoir rappelé le principe de fonctionnement de la MLI, nous allons la modéliser Sous l'environnement du logiciel MATLAB/SIMULINK.

La simulation du système à l'aide de MATLAB/SIMULINK est tout à fait justifiable En raison de ses divers avantages uniques comme la facilité et l'efficacité de Programmation élevées, l'interface graphique élégante et son architecture ouverte Permettant l'adaptation à un grand nombre de cas.

1. LES DIFFERENTES STRATEGIES DE COMMANDE DES ONDULEURS DE TENSION

Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles par exemple : variateur de vitesse des moteurs à courant alternatif, chauffage par induction, les alimentations de secours, les alimentations non interrompues. L'entrée d'onduleur peut être une batterie, une tension continue issue des panneaux solaires, ou d'autre source de courant continu, obtenues à partir d'un redressement monophasé ou triphasé comme le montre la figure ci-dessous [16]

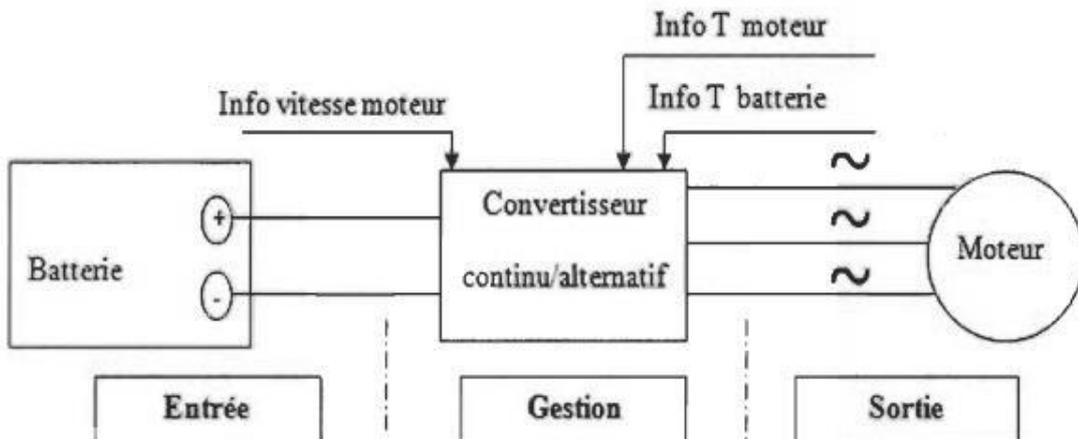


Figure 13: Principe de fonctionnement d'un onduleur [16]

Chapitre 2: Fonctionnement et simulation des onduleurs

De façon générale, Les onduleurs peuvent être monophasés ou triphasés suivant l'application désirée.

Pour assurer la détermination en temps réel des instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, il existe plusieurs techniques de modulation (figure 14) telles que : La modulation sinus-triangle, la modulation en pleine onde [16].

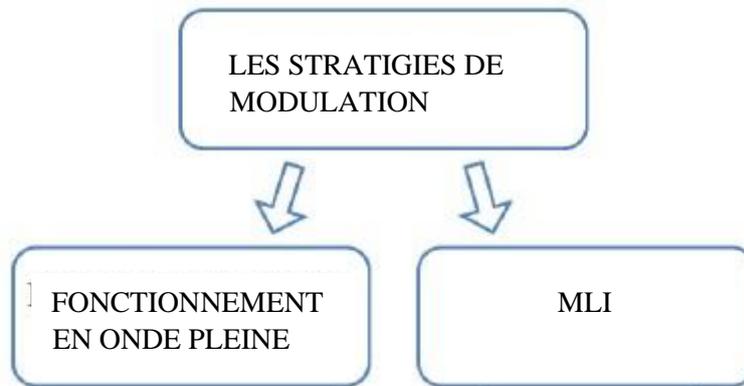


Figure 14: Les différentes techniques de commande

1.1. La commande en pleines ondes

C'est la stratégie de commande la plus simple à mettre en œuvre. Par contre la tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible et donc de fréquence basse. Le filtrage est difficile dans ce mode de commande, les interrupteurs travaillent à la fréquence des grandeurs électriques de sortie [17].

La tension générée par la stratégie de la commande pleine onde a une forme rectangulaire, sa décomposition en série de Fourier montre que cette forme d'onde est riche en harmoniques.

Pour une commande pleine onde (180°), la décomposition en série de Fourier de la tension composée est donnée par [18].

$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5..}^a \frac{4V_S}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} \sin \left(n \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \right) \dots \dots \dots (1)$$

Les tensions V_{bc} , V_{ca} sont décalée par rapport à V_{ab} respectivement de 120° et 240°.

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

La modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM : Pulse Width Modulation en anglais), consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable. Son objectif est d'obtenir une tension de sortie qui est proche de la sinusoïdale par le contrôle de l'évolution du rapport cyclique, et d'imposer à l'entrée de l'onduleur un courant de type continu avec des composantes alternatives d'amplitudes réduites et de fréquences élevées.

2. LES TYPES D'ONDULEURS

Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [19]

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

2.1. 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) [19].

2.1.1. Onduleur de tension monophasé en demi-pont

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la (Figure 15).

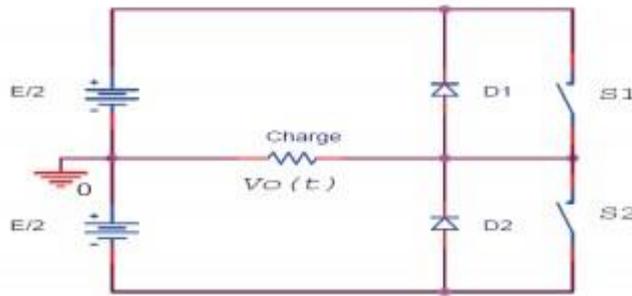


Figure 15 : Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés $S1$ et $S2$ 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 $S1$, la tension aux bornes de la charge serait donc de $+E/2$, et prend la valeur $-E/2$ quand le second interrupteur, $S2$ 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 $D1$, $D2$, 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 [19].

Chapitre 2: Fonctionnement et simulation des onduleurs

2.1.2. 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 16) à quatre interrupteurs permet ceci et est appelé pont complet ou pont en H.

A l'aide de cette structure en pont, trois configurations sont possibles (Figure 17) :

S1 S3 fermés, S2 S4 ouverts : $v = +E$

S1 S3 ouverts, S2 S4 fermés: $v = -E$

S2 S3 fermés, S1 S4 ouverts ou S1 S4 fermés, S2 S3 ouverts : $v = 0$

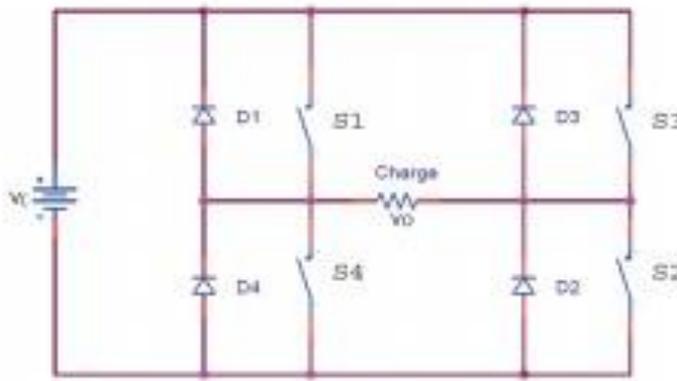


Figure 16: Schéma de Principe d'un Onduleur de tension Monophasé En pont

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 [20].

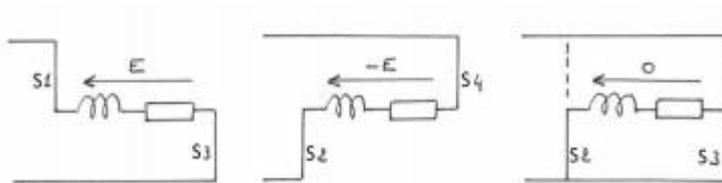


Figure 17: Les trois configurations possibles d'un onduleur monophasé en pont

Chapitre 2: Fonctionnement et simulation des onduleurs

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 :

$$P_c = P_0 \dots \dots \dots (2)$$

Calcul de la valeur moyenne de I_s :

$$\begin{aligned} I_{cmoy} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_0 \sin(\omega t - \alpha) d\omega t \dots \dots \dots (3) \\ &= \frac{2}{\pi} I_0 \cos \alpha \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_0 \cos \alpha \end{aligned}$$

A pertes minimales :

A partir des équations (2) et (3) :

$$P_c = P_0 \Leftrightarrow V_c I_{cmoy} = V_0 I_0 \cos \alpha \Leftrightarrow V_c = \frac{V_0 I_0 \cos \alpha}{I_{cmoy}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot V_0 \dots \dots \dots (4)$$

2.2. Onduleur triphasé

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

La figure (18) présente la structure générale d'un onduleur triphasé qui se compose de trois onduleurs demi-pont monophasé en parallèle. Le contrôle de commutation de chaque demipont permet d'obtenir trois phases déphasées de 120°. Les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires pour que la tension de la source continue ne soit jamais en court-circuit et que les courants des circuits I_a , I_b et I_c ne soient jamais ouverts. Il faut noter que les interrupteurs donnent trois tensions de sorties [21].

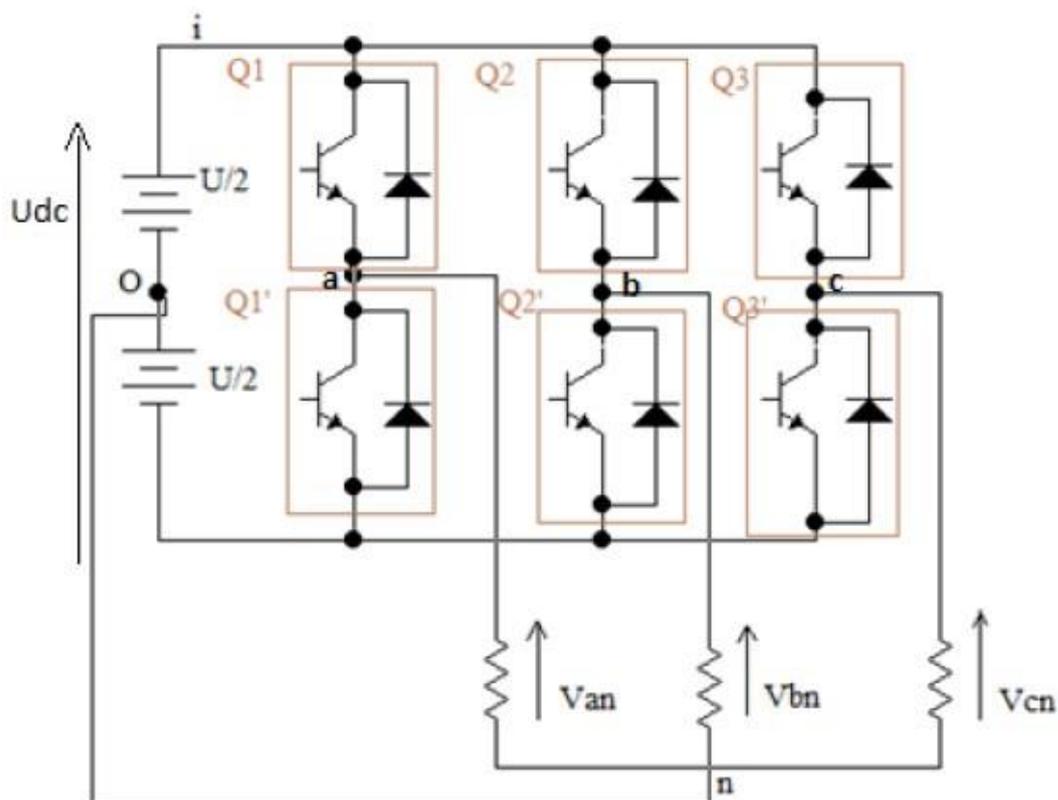


Figure 18: Circuit de puissance d'un onduleur triphasé [22]

2.2.1. Commande d'un onduleur triphasé

2.2.1.1. Commande 180°

Dans la commande 180° chaque interrupteur est commandé pour une durée de demi-période. D'après le tableau (3) la fermeture d'un interrupteur coïncide avec l'ouverture de l'autre interrupteur située dans le même bras [23]. La commande des interrupteurs de deux bras différents est décalée de 120°.

Tableau 3: Commande de 180° [24]

Q1	Q1'	Q1
Q2'	Q2	Q2'
Q3	Q3'	Q3

Chapitre 2: Fonctionnement et simulation des onduleurs

2.2.1.2 Commande 120°

Dans la commande 120° chaque interrupteur est commandé pour une durée égale à un tiers d'une période. D'après le tableau (4) la fermeture d'un interrupteur ne coïncide pas avec l'ouverture de l'autre interrupteur située dans le même bras [23]. La commande des interrupteurs de deux bras différents est décalée de 120°.

Tableau 4: Commande de 120° [24]

Q1		Q1'		Q1	
Q2'		Q2		Q2'	
	Q3'		Q3		Q3'

3. LA COMMANDE MLI

3.1. Principe de base de MLI

La technique en MLI consiste à générer un signal de sortie formé par plusieurs créneaux de largeurs variables et d'amplitude égale à la tension d'alimentation. Les ordres d'ouvertures et de fermetures des interrupteurs sont donnés par l'intersection d'un signal triangulaire (porteuse) à un signal de référence selon la stratégie choisie.

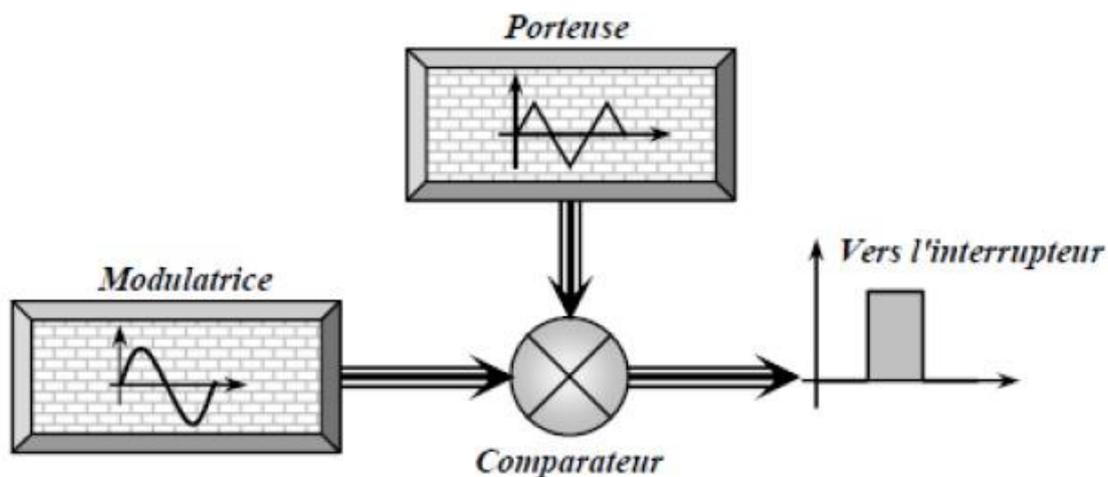


Figure 19: Réalisation du signal MLI [25]

3.2. Les caractéristiques de MLI

Les paramètres importants dans la commande MLI sont :

- La fréquence de modulation f_p .
- L'indice de modulation m : qui est défini comme le rapport de la fréquence de la porteuse par la fréquence de la modulante.

$$m = f_p / f_r$$

Il faut noter quand le coefficient de modulation est grand cela signifie que la neutralisation des harmoniques est efficace.

- Le coefficient de réglage A : est défini comme étant le rapport de l'amplitude de la modulante par l'amplitude de la porteuse non modulée

$$A = A_r / A_p$$

Le coefficient de réglage ne doit jamais être égal à « 1 », il faut toujours laisser une durée suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras [26].

3.3. Les différents types de modulation

Le principe consiste à comparer deux ondes pour cela on distingue deux types de modulation :

- Modulation naturelle.
- Modulation régulière.

3.3.1. Modulation naturelle

Cette modulation nous permet de comparer directement le signal de la porteuse avec le signal modulant afin d'obtenir à la fin une onde modulée. A cet effet la largeur d'impulsion est proportionnelle à l'amplitude du signal modulé à l'instant où le basculement aura lieu, car ce basculement correspond à des intersections des deux ondes (porteuse et modulatrice) instantanées. Cet effet génère deux conséquences importantes:

- Les centres des impulsions dans le signal MLI résultant ne sont pas équidistants.
- Il n'est pas possible de définir les largeurs d'impulsions en utilisant des expressions analytiques [27].

3.3.2. Modulation régulière

Les techniques MLI à échantillonnage régulier proviennent de la technique triangulo-sinusoidale. Elles consistent à comparer une porteuse triangulaire à une version discrétisée de la référence [27]. A cet effet on distingue:

- Technique à échantillonnage régulier symétrique.
- Technique à échantillonnage régulier asymétrique.
- Technique à échantillonnage régulier modifié.

3.4. Technique de production d'onde MLI

Afin de générer le signal de contrôle nécessaire à la commande ainsi qu'au blocage des éléments semi-conducteurs il utilise plusieurs techniques d'obtention d'onde MLI. A cet effet pour obtenir des signaux MLI il existe trois techniques sont :

- Technique analogique.
- Technique digitale.
- Technique hybride.

3.4.1. Technique analogique

La technique analogique est basée sur la comparaison entre un signal triangulaire "onde porteuse" et un signal sinusoïdal "onde modulatrice", la comparaison est réalisée grâce à un amplificateur opérationnel.

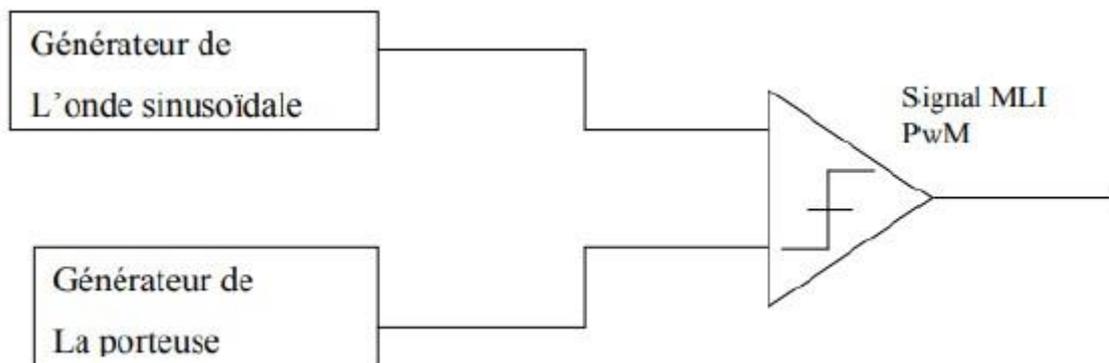


Figure 20: Technique analogique [28]

3.4.2. Technique digitale (numérique)

Elle consiste à utiliser des microprocesseurs qui assurent la génération des impulsions en se servant d'un programme définissant les angles d'amplitudes calculés au préalable. Cette méthode nous a permis d'avoir une amélioration significative en matière de simplicité et performance du circuit de commande [28]

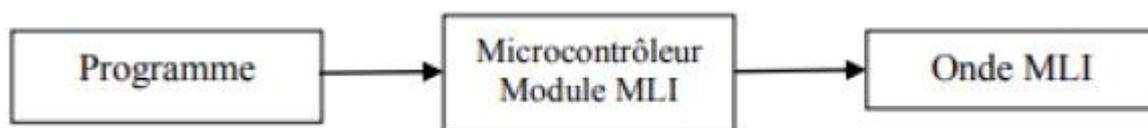


Figure 21: Technique digitale [27]

3.4.3. Technique hybride

La technique hybride est une combinaison entre les circuits analogiques et digitaux, durant la période de transition de la technique analogique à la technique digitale. Cette méthode est basée sur la comparaison de deux signaux par un comparateur analogique dont l'un est triangulaire par exemple généré par un ordinateur, et l'autre sinusoïdal (cas d'un onduleur) généré par un circuit analogique.

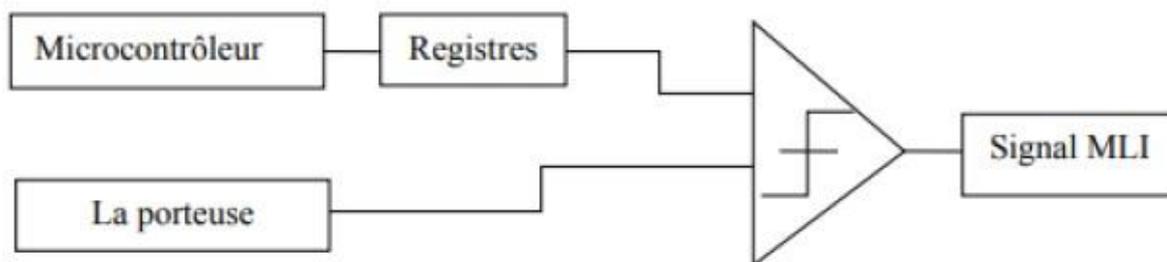


Figure 22: Technique hybride [28]

4. DIFFERENTES TECHNIQUES DE MODULATION DE LARGUEUR D'IMPULSIONS

4.1. MLI simple

Dans la technique MLI simple on utilise seulement une seule impulsion par demi-cycle ou la largeur de cette impulsion fait varier l'amplitude de la tension à la sortie de l'onduleur. Dans cette méthode on compare un signal de référence d'amplitude, avec un signal d'onde porteuse triangulaire d'amplitude p . La figure ci-dessous montre la génération des signaux de commande et de sortie d'un onduleur monophasé à pont complet utilisant la modulation MLI simple. La fréquence du signal de référence est celle de la fondamentale de la tension de sortie. En variant r , de 0 à p , la largeur d'impulsion δ peut varier de 0 à 180° [29]. La

Chapitre 2: Fonctionnement et simulation des onduleurs

relation r/p est la variable de contrôle et s'appelle "index de modulation d'amplitude" de la tension de sortie [30].

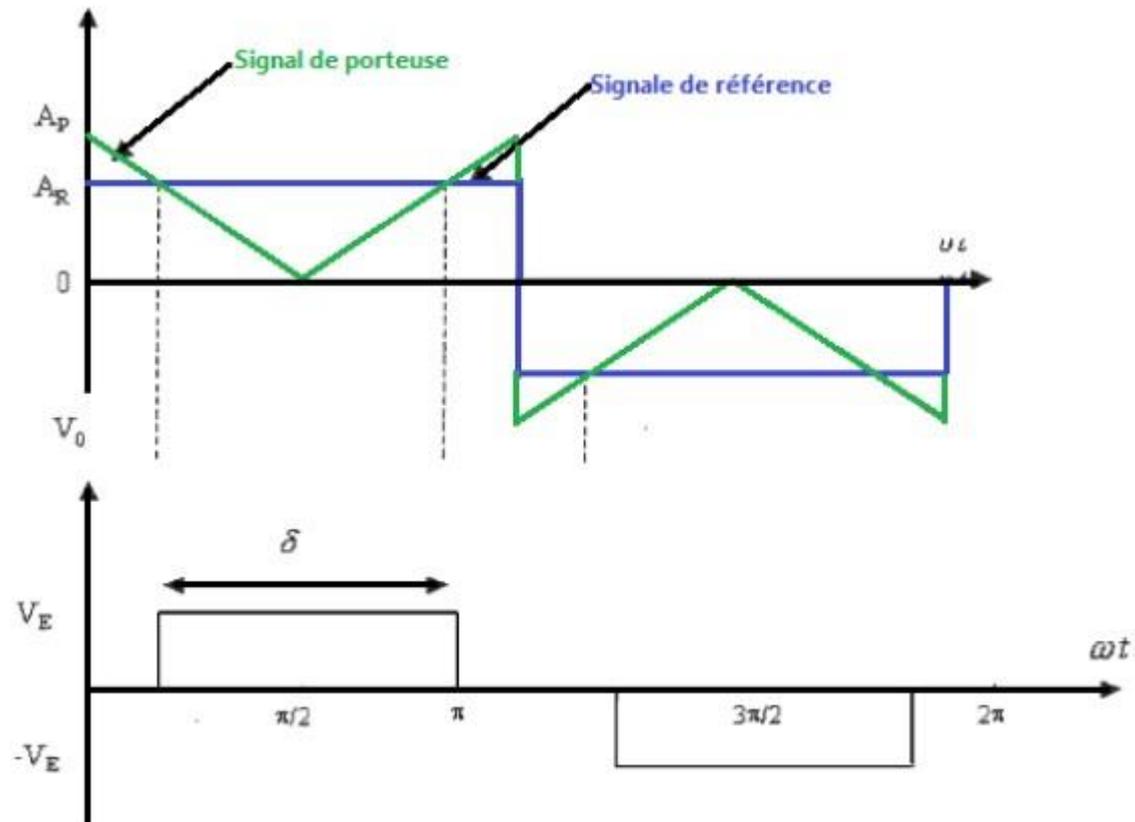


Figure 23: MLI d'une simple impulsion [23]

La tension de sortie efficace est déterminée comme suit :

$$V_0 = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{(\pi-\delta)/2}^{(\pi+\delta)/2} V_E^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = V_E \sqrt{\frac{\delta}{\pi}} \dots \dots \dots (5)$$

Ainsi, la tension de sortie V_0 dépend de la largeur d'impulsion δ . La série de Fourier de la tension de sortie produite est :

$$V_0 = \sum_n^{\infty} = 1,3,5 \dots \frac{4V_E}{n\pi} \sin(n\omega t) \dots \dots \dots (6)$$

4.2. MLI multiple

Cette technique permet de diminuer les harmoniques en ajoutant plusieurs impulsions dans chacune des alternances de la tension de sortie. Les impulsions de commande des interrupteurs s'obtiennent par les intersections d'un signal de référence et d'un signal porteur triangulaire [30]. La fréquence du signal de référence règle la fréquence de sortie f_r et la fréquence porteuse f_p , du signal détermine le nombre d'impulsions durant la demi alternance [31], avec le nombre d'impulsions par demi cycle qui est donné par :

$$m = \frac{f_p}{2f_r}$$

Le signal de sortie obtenu est un signal de créneaux de largeurs égales.

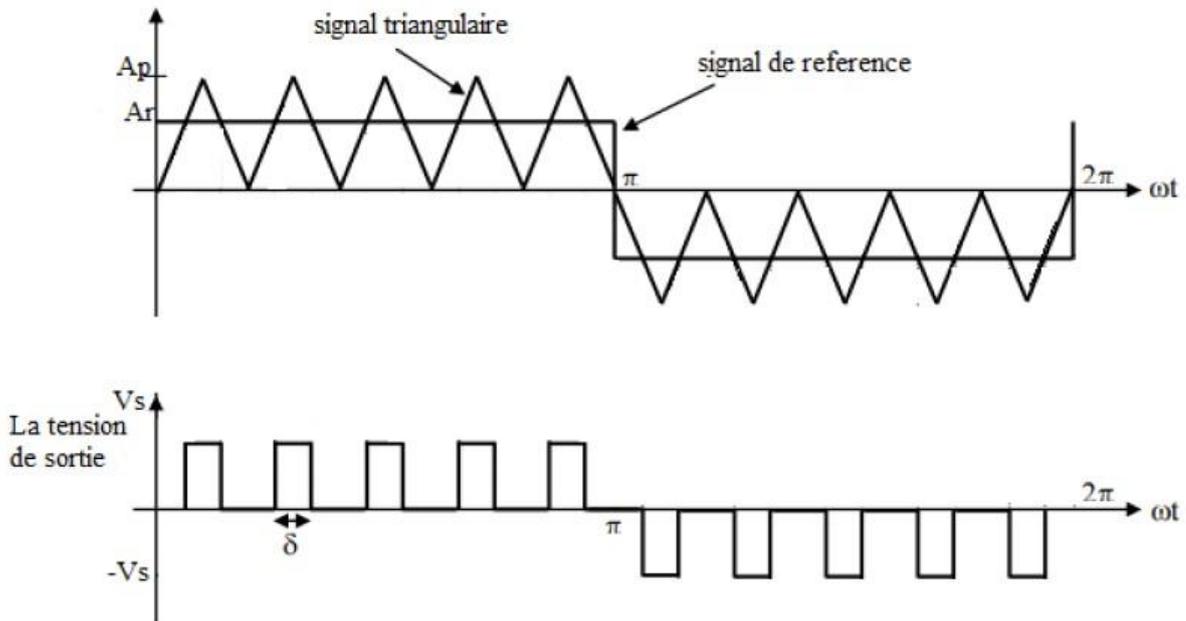


Figure 24: MLI multiple [31]

La tension efficace est donnée par la relation suivante :

$$V_0 = \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\frac{\pi-\delta}{2}}^{\frac{\pi+\delta}{2}} V_E^2 d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = V_E \sqrt{\frac{p\delta}{\pi}} \dots \dots \dots (7)$$

4.3. MLI Sinus triangulaire (sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM))

Dans cette technique est le signal de référence est un signal sinusoïdal. On obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable. Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante [26]. La figure ci-dessous montre la tension de sortie. La fréquence du signal de sortie de l'onduleur est déterminée par la fréquence du signal de référence. La fréquence du signal porteur détermine le nombre p des impulsions par demi-cycle. Ce type de MLI est la plus

Chapitre 2: Fonctionnement et simulation des onduleurs

utilisée dans les applications industrielles, car elle est la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques [26].

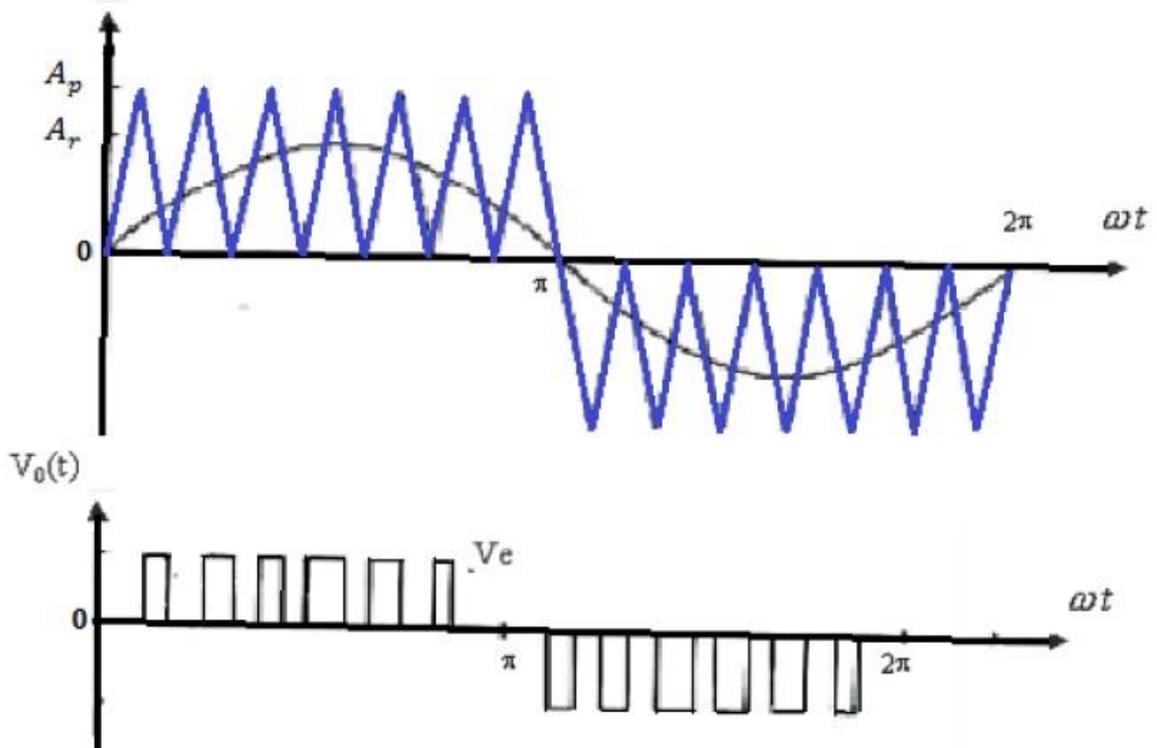


Figure 25: MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire [27]

La tension efficace V_0 de sortie est donnée par :

$$V_0 = V_E \left(\sum_{m=1}^p \frac{\delta_m}{p} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(8)$$

Où δm = Largeur de la $m^{\text{ème}}$ impulsion et p = le nombre des impulsions par alternance. Contrairement à la modulation MLI de multiples impulsions la technique MLI sinusoïdale permet de réduire de façon significative le facteur de distorsion de la tension de sortie. Toutes les harmoniques d'ordre égal ou inférieur à $2p-1$ sont éliminées par cette technique. [30]

5. SIMULATION DE L'ONDULEUR PHOTOVOLTAÏQUE AVEC LA COMMANDE MLI

5.1 Onduleur monophasé

5.1.1. Modélisation du circuit

Le schéma de simulation de l'onduleur monophasé en pont complet implanté dans L'environnement Simulink/MATLAB est représenté sur la figure 26

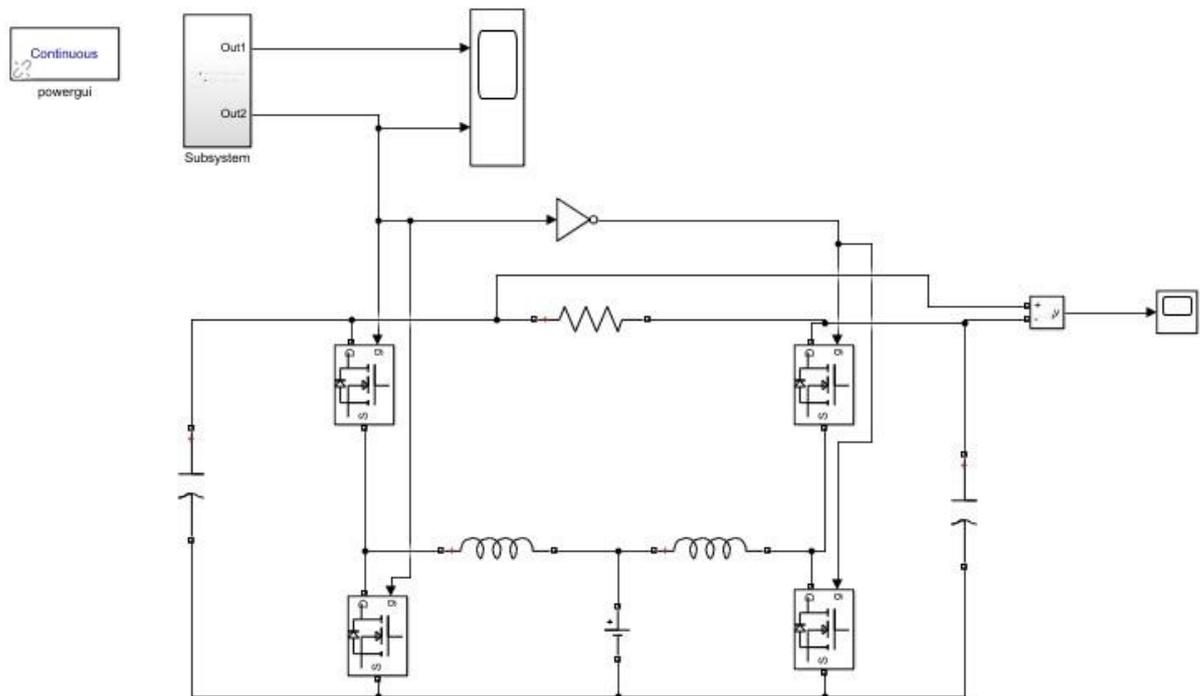


Figure 26: Schéma Simulink d'un onduleur monophasé en pont complet

Bloc SUBSYSTEM (sous système) :

On parle de sous-système pour désigner une partie du système qui a lui-même les caractéristiques d'un système et qui est constitué de plusieurs composants.

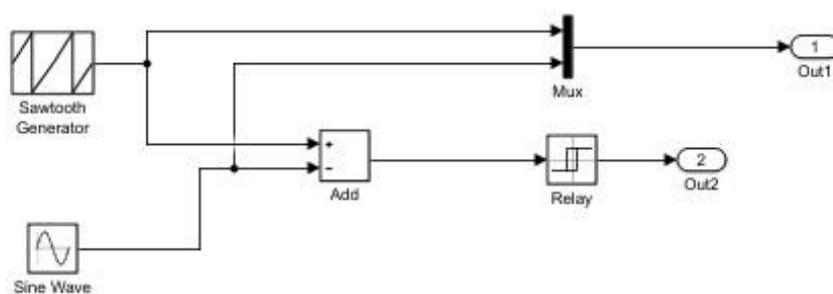


Figure 27: schéma des composants du SUBSYSTEM utilisé

Chapitre 2: Fonctionnement et simulation des onduleurs

5.1.2. Résultat de la simulation

Les paramètres utilisés pour la simulation sont : $E=100V$; $R=100\text{ Ohms}$; $L=3mH$; $C=6mF$; $F = 50\text{ Hz}$.

Les différents signaux obtenus après la simulation sont représentés dans les figures qui suivent.

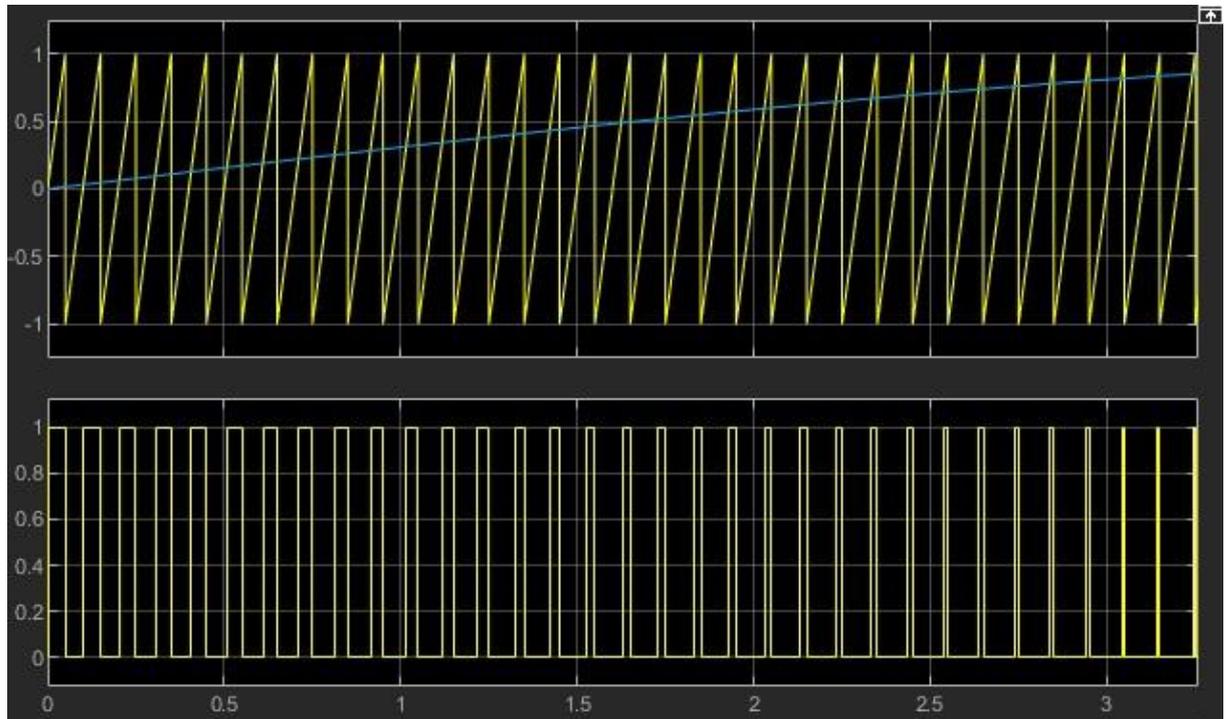


Figure 28: Illustration de la MLI Sinus triangle (Monophasé)

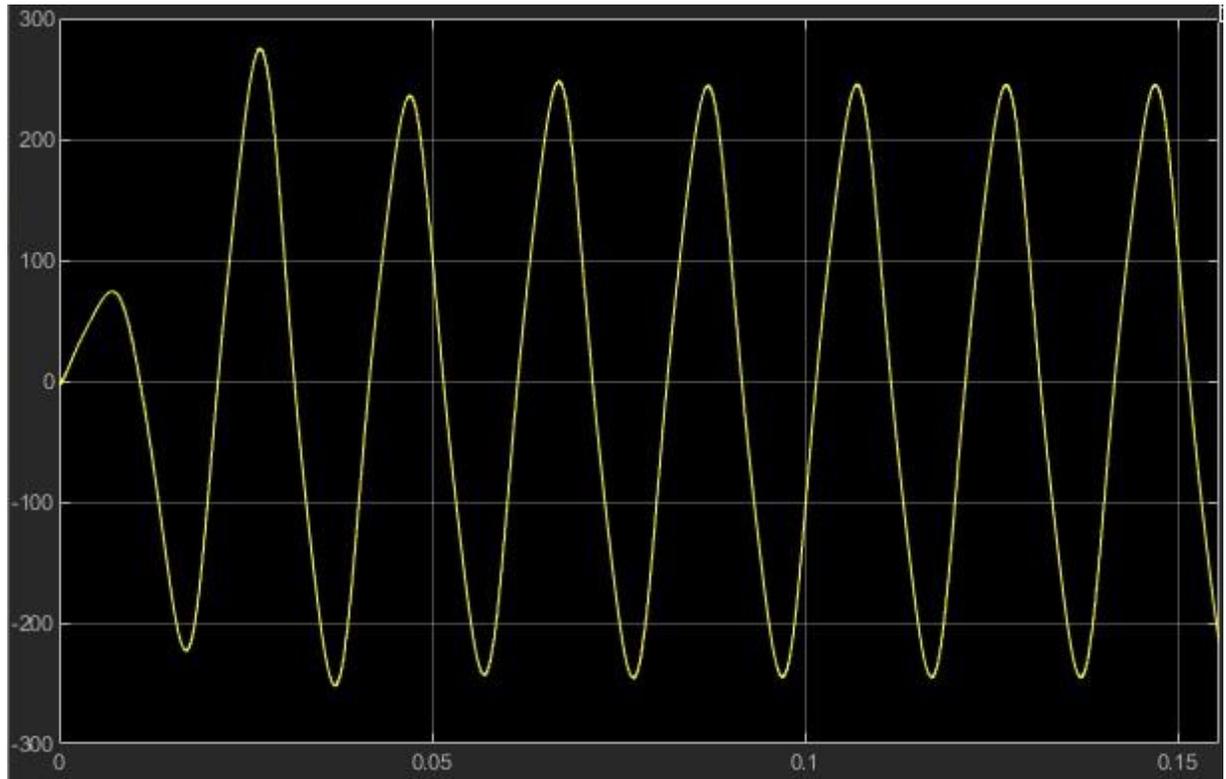


Figure 29: le courant de sortie de l'onduleur monophasé

Interprétation des résultats

Le courant de sortie de l'onduleur est quasiment sinusoïdal, comme le montre la figure précédente, et c'est dû à l'intervention d'un filtre RLC qui a pour but : élimination des harmoniques et lissage de tension de sortie.

Le signal rectangulaire de fréquence 50Hz (Figure 28 p39) présente un rapport cyclique de 50%, ce qui signifie que la durée pendant laquelle le signal reste à l'état haut, est identique à la durée pendant laquelle il reste à l'état bas. Sa valeur moyenne est égale à la moitié de l'amplitude maximale.

5.2 Onduleur triphasé

5.2.1. Modélisation du circuit

Le schéma de simulation de l'onduleur triphasé en pont complet implanté dans l'environnement Simulink/MATLAB est représenté sur la figure 30

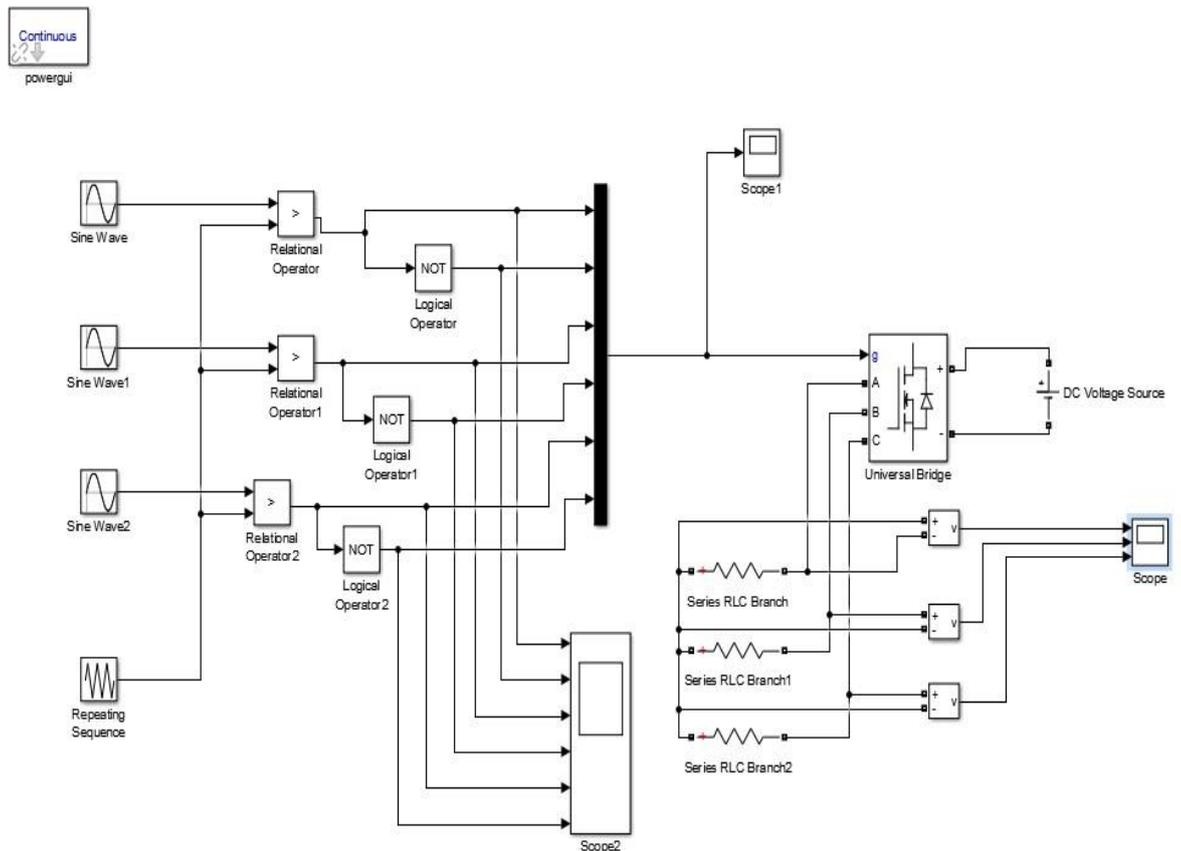


Figure 30: Schéma Simulink d'un onduleur triphasé en pont complet

Bloc UNIVERSAL Bridge

Le bloc UNIVERSAL Bridge (Figure 31 p42) implémente un convertisseur de puissance triphasé universel qui comprend jusqu'à six interrupteurs d'alimentation connectés dans une configuration de pont. Le type de commutateur d'alimentation et la configuration du convertisseur peuvent être sélectionnés dans la boîte de dialogue. [31]

Le bloc UNIVERSAL Bridge permet de simuler des convertisseurs utilisant à la fois des dispositifs électroniques de puissance à commutation naturelle (ou à commutation de ligne) (diodes ou thyristors) et des dispositifs à commutation forcée (GTO, IGBT, MOSFET).

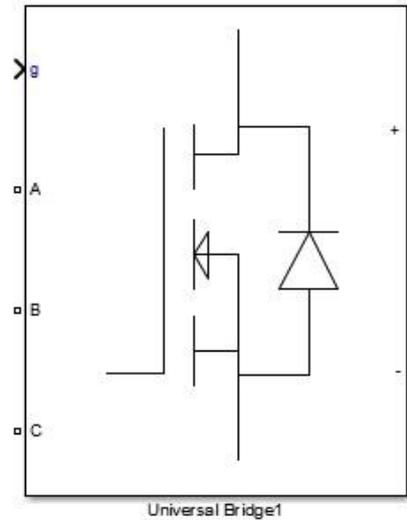


Figure 31: schéma du bloc UNIVERSAL bridge sous Simulink

5.2.2 Résultat de la simulation

Les paramètres utilisés pour la simulation sont :

$E=200V$; $R=10\text{ Ohms}$; $F=50\text{Hz}$

Les différents signaux obtenus après la simulation sont représentés dans les figures qui suivent (figure 32, figure 33)

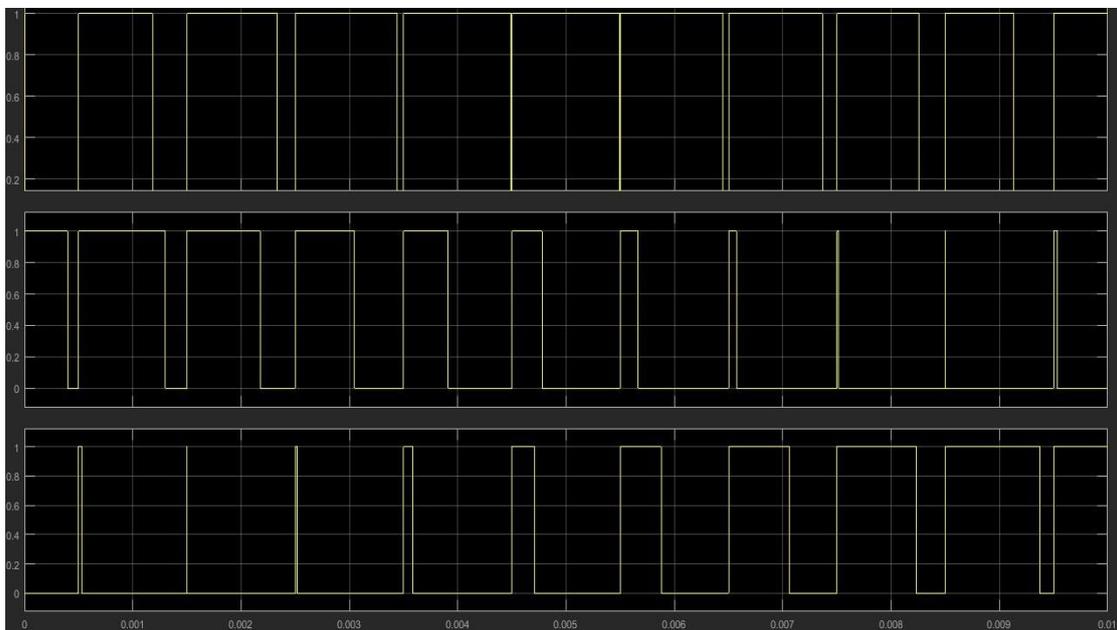


Figure 32: Illustration de la MLI Sinus triangle (triphase)

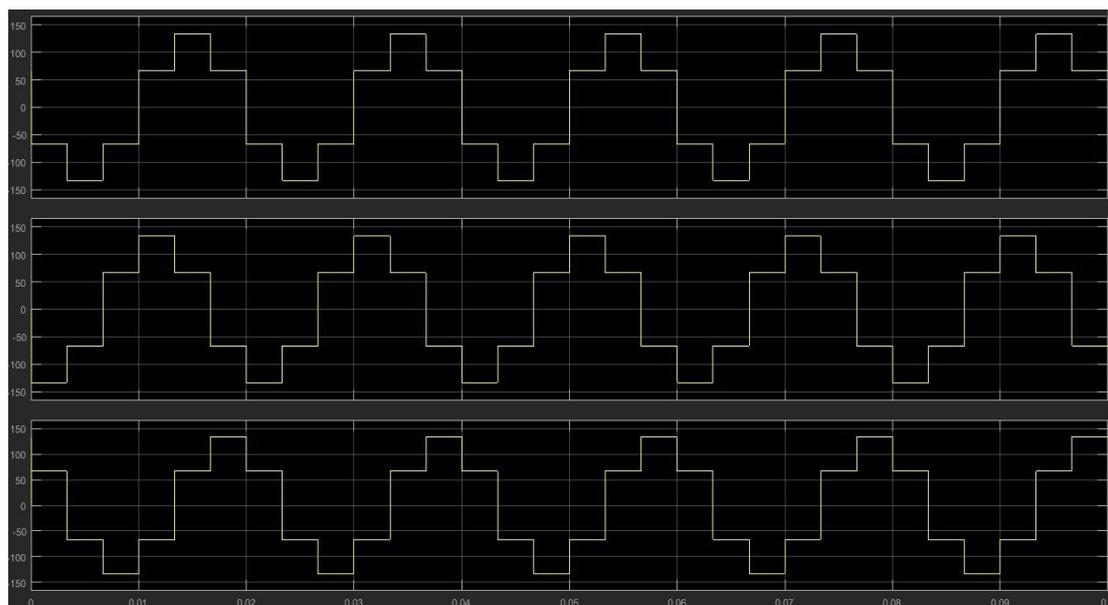


Figure 33: Allure de courant de l'onduleur triphasé avec la commande MLI

Interprétation des résultats

Les trois références sinusoïdales sont déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f . Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi (Figure 33), donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites ce qui engendre des pertes supplémentaires. Il faut utiliser le filtrage (cas d'onduleur monophasé) afin d'avoir les allures de courant et de tension souhaitées.

Remarque

Il existe des onduleurs "Pur Sinus" qui produisent un signal sinusoïdal conforme à celui du réseau électrique, et des onduleurs "Pseudo Sinus". Un troisième type d'onduleur, à onde carrée se trouve également sur le marché mais offre un signal de faible qualité et ne peut être utilisé que pour les petites charges.

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une manière générale l'onduleur monophasé ainsi que l'onduleur triphasé dédiés au système photovoltaïque, nous avons analysé leurs fonctionnements, leur technique de commande MLI (modulation des largeurs d'impulsion).

Puis on a simulé ces deux types d'onduleurs sous l'environnement MATLAB/Simulink.

Chapitre 3

Applications et critères de choix des onduleurs

INTRODUCTION

Dans ce dernier chapitre nous allons présenter les différentes applications des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques ainsi que sa fonction sécuritaire.

Nous mettrons en évidence aussi les critères élémentaires afin de bien choisir l'onduleur le mieux adapté pour chaque installation de production d'énergie solaire, nous présenterons également les avantages et les inconvénients de ce convertisseur statique (DC-AC).

1. LES APPLICATIONS DES ONDULEURS DANS LES SYSTEMES SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUES

1.1. Contrôle de la vitesse de rotation des machines à courant alternatif

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. A cet effet il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée. [32]

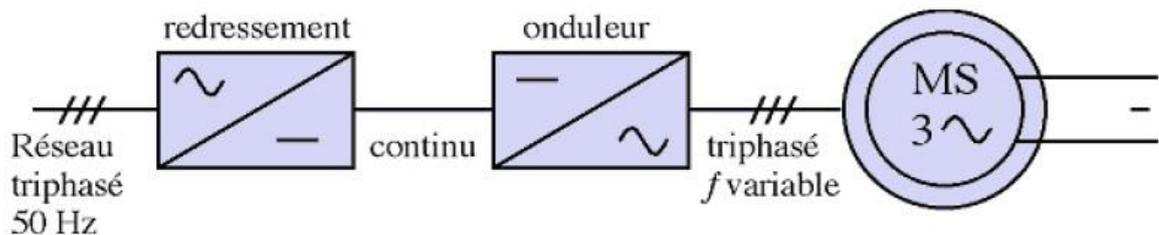


Figure 34: variation de la vitesse d'une machine synchrone [32]

1.2. Assurer la continuité des alimentations de secours

En cas de coupure du réseau, la tension continue stockée dans les batteries sera convertit en tension alternative à travers l'onduleur pour continuer l'alimentation des machines, surtout en informatique pour éviter les pertes d'informations (Figure 35).

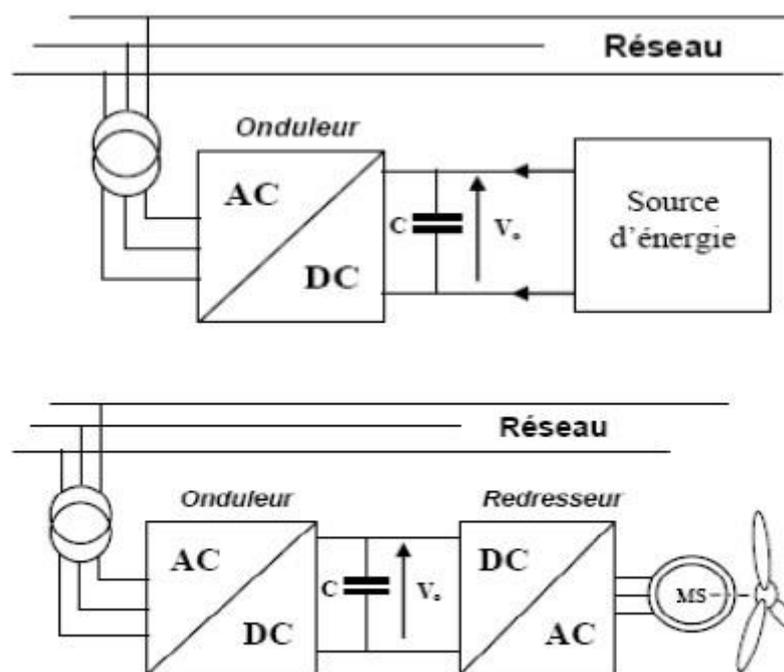


Figure 35: Alimentation de secours

1.3. Les applications dans le transport

1.3.1. Transport ferroviaire

Les motrices actuellement développées sont mues par des machines alternatives asynchrones. Pour contrôler la vitesse de rotation de ces dernières, on doit pouvoir faire varier la fréquence de leur l'alimentation. Cela est réalisé par un onduleur. [33]
Exemple : TGV, trains, Tramway.

1.3.2. Transport Aériens et maritimes

Tout avion produit lui-même l'énergie électrique dont il a besoin pour le fonctionnement de ces équipements de bord. [33]

1.4. Alimentation sans interruption (ASI)

Les onduleurs peuvent assurer une alimentation électrique 24h sur 24 h en cas de rupture dans le réseau. [34]

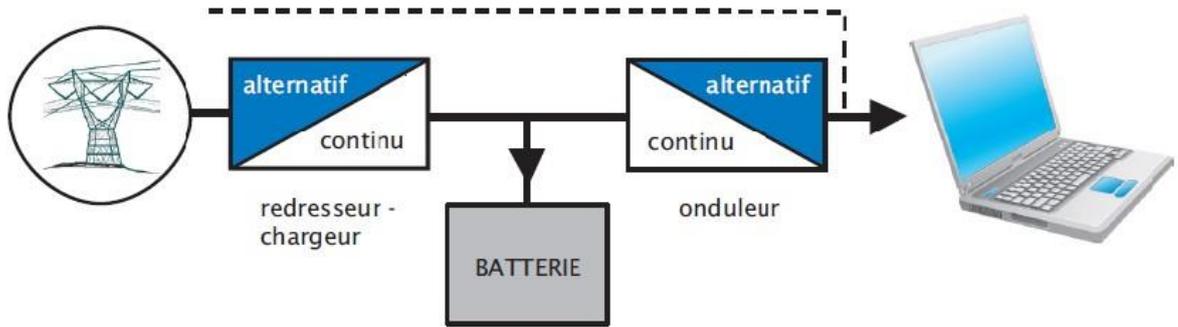


Figure 36: Alimentation sans interruption

1.5. La protection des équipements

Les onduleurs protègent des différents équipements dans différents domaines contre les perturbations.

2. LES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES

Le raccordement entre les panneaux photovoltaïques et le réseau se fait à travers les onduleurs. Ce dernier joue un rôle crucial dans les installations de production d'énergie solaire. Il est en effet l'appareil qui sert de passerelle entre le système photovoltaïque et le réseau électrique, qu'il s'agisse d'un montage résidentiel ou d'une centrale électrique. Aussi ils permettent d'adapter l'énergie délivrée du panneau et l'énergie injectée au réseau.

Les onduleurs ne se limitent plus seulement à transformer la puissance continue (DC) générée par les modules solaires en puissance alternative sous forme d'une tension sinusoïdale de fréquence souhaitée (230 V/400V – 50Hz), mais ils exploitent également la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en le forçant à fonctionner à son point de puissance maximum.

De plus, ils assurent une surveillance fiable du réseau pour protéger ce dernier contre les pannes et interrompre, l'alimentation en cas de problèmes survenant, soit du réseau, soit de l'installation. [35]

3. CHOIX ET DIMENSIONNEMENT

L'onduleur est un organe primordial de l'installation qu'il ne faut pas négliger. La détermination de ses caractéristiques se fera naturellement en fonction du champ de capteur pris en charge.

Chaque onduleur possède en effet des plages de fonctionnement précises qui devront impérativement correspondre aux caractéristiques du courant continu généré par les modules. [36]

Le choix et le dimensionnement de l'onduleur tiendront compte de :

3.1. La compatibilité en puissance

Sur les fiches techniques des onduleurs, on trouve (au minimum) deux types de puissance indiqués :

3.1.1. La puissance nominale

La valeur nominale correspond à la puissance maximale que l'onduleur peut délivrer en continu sur la longue durée. Afin de calculer la puissance nominale dont on aura besoin, on fait l'addition de la puissance nominale des appareils électriques susceptibles de fonctionner en même temps. Le total ne doit pas dépasser la puissance nominale de l'onduleur.

$$P_{\text{onduleur}} \geq P_n$$

Avec : $P_n = \sum P_{\text{élec}}$

3.1.2. La puissance de crête

Pour ce qui est de la puissance crête, il s'agit de la puissance maximale que peut délivrer un onduleur pendant quelques secondes (5 en principe). C'est en quelque sorte sa capacité de réponse aux courants de démarrage élevés de certains appareils. La puissance crête de l'onduleur doit être supérieure à la somme des puissances de démarrage des appareils susceptibles de démarrer en même temps et la puissance nominale des appareils fonctionnant en continu.

$$P_c > P_n$$

Avec: $P_n = \sum P_{\text{élec}}$

Chapitre 3 : Applications et critères de choix des onduleurs

3.2. La compatibilité en tension

La tension d'entrée de l'onduleur en courant continu doit être supérieure à celle du générateur photovoltaïque et de la batterie. La tension de sortie doit correspondre à celle des appareils utilisés, soit en principe du 220/230V [33]

$$U_{\text{onduleur}} > U_{\text{solaire}}$$

4. LES AVANTAGES

Les avantages de l'onduleur solaire sont nombreux et varient en fonction de leurs types :

- contrôler le réseau et s'assurer du bon fonctionnement des modules photovoltaïques par la recherche de point de puissance maximal.
- Contrôler de bon fonctionnement de toute l'installation photovoltaïque.
- Il est rentable sur le long terme, il est autonome et n'exige pas trop d'entretien.
- Il est écologique et sûr pour l'environnement.
- La protection de découplage coupe automatiquement le courant et permet ainsi d'éviter tout risque d'électrocution lors d'opérations de maintenance. [37]

5. LES INCONVENIENTS

L'onduleur photovoltaïque peut également présenter quelques faiblesses et imposer des contraintes :

- Plus il est performant, plus il coûte cher.
- Tout comme les cellules photovoltaïques, il devient moins performant en cas d'absence du soleil.
- Son entretien doit être exclusivement pris en charge par un professionnel, et impose la souscription à un contrat de maintenance.
- Il doit être remplacé au bout de 10 ans et les panneaux au bout de 25 à 35 ans. [37]

6. LA DURÉE DE VIE

La durée de vie de l'onduleur photovoltaïque dépend de plusieurs paramètres :

- La marque

Chapitre 3 : Applications et critères de choix des onduleurs

- La provenance
- Les certificats
- Son emplacement
- L'entretien
- La maintenance et les références de l'installateur.

Une garantie de 5 ans sur les produits est devenue la norme chez les constructeurs, alors qu'elle n'était que de 2 ans, il y a quelques années.

Il est possible d'étendre la garantie à 10 ans, voire à 20 ans suivant les constructeurs. Cette étendue de la durée de vie est le résultat de l'utilisation de composants de meilleure qualité, surdimensionnés ou plus résistants aux hausses de températures. [38]

7. LE RENDEMENT

C'est sans conteste le principal critère de choix, car il influe sur le dimensionnement du champ photovoltaïque et de la batterie.

Le rendement est le rapport entre deux grandeurs. Dans le cas d'un onduleur, le rendement se mesure en comparant la puissance (P_s) de sortie de l'onduleur par rapport à la puissance d'entrée (P_e).

La puissance d'entrée délivrée par le champ photovoltaïque dépend du nombre de modules, de la puissance individuelle de chacun d'eux, de l'ensoleillement instantané et peut se trouver limitée par une trop forte température ou un mauvais dimensionnement des connectiques.

Le rendement des onduleurs ne cesse d'augmenter depuis ces dernières années, Cette amélioration participe, bien entendu, à la constante diminution des coûts de l'électricité générée par le PV. Il y a 28 ans, 90% était considéré comme un très bon rendement des systèmes PV. Actuellement le rendement maximal (pic) des meilleurs onduleurs sur le marché atteint les 98%. Plus le rendement est élevé, plus la durée de vie de l'onduleur sera élevée (les onduleurs sont sensibles à la chaleur) et ses dimensions pourront être réduites (les systèmes de refroidissement ne seront plus nécessaires).

L'autre amélioration notable est celle du « rendement européen», qui prend en compte l'efficacité à charge partielle de l'onduleur. Plusieurs valeurs de rendement sont données dans les fiches techniques des onduleurs. À cause d'un mauvais rendement à charge partielle, la valeur du Rendement européen est plus faible que celle du rendement maximal mais c'est elle

Chapitre 3 : Applications et critères de choix des onduleurs

qui est la plus proche de la réalité du fonctionnement de l'élément : le rendement européen est le plus proche de la réalité de fonctionnement de l'élément.

Il y a 25 ans, il pouvait atteindre jusqu'à 5% de moins que le rendement maximal alors qu'aujourd'hui la différence est comprise entre 1 et 2%, pour les meilleurs modèles.

Les valeurs du rendement pour un même onduleur peuvent varier sensiblement avec la tension d'entrée considérée (voir partie sur la performance des onduleurs), et décroître si l'onduleur fonctionne dans un milieu à température ambiante élevée. Si un isolement galvanique n'est pas requis, quelques points de rendements pourront être gagnés grâce à l'utilisation d'onduleurs sans transformateur.

Le rendement maximal est encore amené à augmenter jusqu'à 99% dans les prochaines années. Cette augmentation serait possible en optimisant les composants utilisés afin d'avoir le moins de pertes de chaleur possible. Diviser les pertes thermiques par 2, c'est augmenter de 1% l'efficacité (de 98% à 99%) mais aussi améliorer la durée de vie des composants de l'onduleur, très sensibles à la chaleur. Moins de pertes thermiques signifient également que les systèmes de refroidissements ne sont plus nécessaires et que les dimensions des boîtiers des onduleurs peuvent être réduites.

Cette amélioration du rendement peut être obtenue en optimisant les composants utilisés afin d'avoir le moins de pertes de chaleur possible.

Les recherches sur les premiers transistors de puissance en nanotubes continuent. Ils pourraient remplacer les transistors IGBT et diminuer considérablement les pertes, déjà faibles avec les IGBT.

Un moyen de réduire les pertes dans les transistors est d'en monter plusieurs en parallèle plutôt qu'un seul, afin de diminuer les pertes lors du fonctionnement à charge partielle. [39]

CONCLUSION

Dans ce dernier chapitre, nous avons brièvement présenté les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité, ce sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système photovoltaïque.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'utilisation de l'énergie solaire semble être une nécessité pour l'avenir .En effet, le soleil est une source d'énergie renouvelable, disponible dans tous les pays, et chaque jour, on apprend à mieux la valoriser.

S'il est indispensable de continuer à améliorer les rendements des éléments photovoltaïques, il ne faut pas seulement raisonner en puissance produite, mais aussi en puissance consommée. Donc quand on pense «solaire» on doit penser «faible consommation».

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 de la température.

Quelques notions sur le rayonnement solaire ont été passées en revue. Tels que les types des panneaux solaires et le principe de Fonctionnement d'une cellule PV

Notre travail de modélisation et de simulation, ainsi que l'étude de la connexion au réseau électrique se résume à un convertisseur DC/AC (monophasé et triphasé) commandé par la MLI qui convertit la tension continu en une tension alternative et on les a modélisés et simulés sous MATLAB-SIMULINK. Les résultats de la simulation ont démontré l'intérêt d'un dispositif entrelacé.

Cette période de projet de fin d'étude a considérablement enrichi nos connaissances dans le domaine des énergies renouvelables et plus particulièrement dans le domaine photovoltaïque qui est en plein essor ces derniers temps.

Références bibliographiques :

- [1] Surin Khomfoi, Leon M. Tolbert, "Multilevel Power Converters", the University of Tennessee USA, Department of Electrical and Computer Engineering, August 2007.
- [2] Alain Bidart et Laurent Dubois, « Les énergies fossiles et renouvelables », Dossier pédagogique réalisé par la Fondation Polaire Internationale, Mai 2003.
- [3] Production d'énergie électrique : Energie Solaire Photovoltaïque, Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes , juin 2007
- [4] «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » mémoire de magister, Université Tizi Ouzou, 2011.
- [5] « Caractérisation Automatisée d'une cellule solaire », mémoire de master Université de Biskra, 2014.
- [6] « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », thèse de doctorat, université de Grenoble, 2010.
- [7] Systèmes D'énergie Hybrides Solaires PV », Energie Solaire Photovoltaïque et son Stockage, ASPROM Paris ,2010.
- [8] « Onduleurs pour systèmes photovoltaïques autonomes et couplés au réseau de distribution », Rapport de stage université de la réunion, 2007-2008.
- [9] MUHAMMAD H. RASHID J. David Irwin. Power electronics Handbook. University of West Florida Joint Program and Computer Engineering, 2001.
- [10] « Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations », Thèse de Doctorat université de Grenoble, 2006.
- [11] « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances » , Août 2007.
- [12] BARRADE Philippe. Livre d'Electronique de puissance: méthodologie et convertisseurs élémentaires. Edition 2006.
- [13] HIDRI Imed. Cour d'électronique de puissance les convertisseurs DC-DC et DC –AC .Institut supérieur des études technologiques de Nabeul. Janvier 2013

- [14] « Etude Formelle pour la Synthèse de Convertisseurs Multiniveaux Asymétriques: Topologies, Modulation et Commande », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- [15] S Laurenti CAPITANEANU « Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux », DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE , Novembre 2009
- [16] L. Gyugyi and E. Strycula, "Active AC power filters", in Conf. Rec. IEEE- IAS Annu. Meeting, 1976, pp. 529–535.
- [17] M. Takeda, K. Ikeda, & Y. TOMINAGA, "Harmonic current and reactive power Compensation with an active filter in conf. Rec. IEEE-PESC 1988, pp.1174–1179. [18] Muhammad H.RACHID « Power Electronics, circuits, devices, and applications», Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1993.
- [19] O.BENSEDDIK et F.DJALOUJ. Etude et optimisation du fonctionnement D'un système photovoltaïque Mémoire de Master. 27/06/2012.
- [20] cours électronique de puissance conversion continu-alternative. 2012. [21] MECHERI Salah-EDDINE. Réalisation d'un onduleur de tension monophasé contrôlé par une carte ARDUINO. Mémoire de master. Université de Constantine.2014.
- [22]BARRADE Philippe. Livre d'Electronique de puissance: méthodologie et convertisseurs élémentaires. Edition 2006.
- [23]BOUKAROURA Abdelkader. Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph. Mémoire de magister. Université de Sétif. Décembre 2009.
- [24]M. YAICHI "Analyse de la technique de modulation vectorielle SVM (Space Vector Modulation) appliquée aux onduleurs Multi niveaux " Thèse de Magister de l'université DJILLALI-LIABES de Sidi-Bel-Abbès. 2006.
- [25]ADJIMI Nadia et BELAIDI WAHIBA. Modélisation et commande d'un onduleur MLI. Mémoire de master. Universitaire Larbi Ben M'HIDI Oum El-Bouaghi.2009
- [26]BERREZZEK Farid. Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone. Mémoire de magister. Université d'Annaba.2006

- [27] BENSALAH WASSILA et BOUTALEB NOUR EL HOUDA. Etude de la commande des redresseurs MLI. Mémoire de master. Centre Universitaire Belhadj BOUCHAIB d'AinTemouchent.2016
- [28] BOUSEHABA Moussa. Réalisation d'une commande mli à choix multiple. Mémoire de master. Université de Tlemcen.2017
- [29] MERABET Kamel. Commande mu d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension triphasée. Université du Québec. 2011
- [30] BENMIRA Hassan. Implantation de la commande vectorielle spatiale dans un circuit dédié. Université du Québec. 2003
- [31] MERHOUM Amina. Optimisation Des Techniques De MLI Pour Les Equipements FACTS A Base D'onduleur. Mémoire de magister. Université d'Oran.2013
- [32] LAKEHAL B. Modélisation et commande d'un onduleur triphasé multi niveaux. Mémoire de master. Université de Bejaia. 2015
- [33] BARRADE Philippe. Livre d'Electronique de puissance: méthodologie et convertisseurs élémentaires. Edition 2006.
- [34] Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph.
Abdelkader BOUKAROURA
- [35] Mémoire des onduleurs photovoltaïques connectés au réseau électrique/ HASSAINE Linda/Maître de recherche B Division Energie solaire photovoltaïque
- [36] Hind DJEGHLOUD, HOCINE BENALLA, "Space Vector Pulse Width Modulation Applied to the Three-Level Voltage Inverter", Electro technics Laboratory of Constantine, mentouri- Constantine University.
- [37] Pearl diffusion « Choisir son onduleur- caractéristiques- conseils et astuces (TUTO PEARL) ». 01 Septembre 2016
- [38] BOUDRIES Zoubir. Cour de commande des machines électriques. Université de Bejaia. 2006
- [39] ABDELKADER BOUKAROURA « realiser-une-installation/choix-du-materiel/fonctionnementet-categories-des-onduleurs-photovoltaïques/rendement-et-performance-des-onduleurs » Université de oran 2012

