



Mémoire de Projet de fin d'étude

Préparé par

Mohammed MCHICHOU

Pour l'obtention du diplôme

Ingénieur d'Etat en

SYSTEMES ELECTRONIQUES & TELECOMMUNICATIONS

Intitulé

Etude et conception d'un onduleur photovoltaïque

Encadré par :

Pr F. ERRAHIMI

Pr N. ES-SBAI

Soutenu le 01 Juillet 2015, devant le jury composé de :

Pr F. ERRAHIMI

Encadrante (FST-Fès)

Pr N. ES-SBAI

Encadrante (FST-Fès)

Pr H. EL MARKHI

Examineur (FST-Fès)

Notice Biographique

Auteur : MCHICHOU Mohammed

Année : 2015

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques de Fès

Spécialité : Ingénieur d'Etat Systèmes Electroniques et
Télécommunications

Lieu de stage : Laboratoire Energies Renouvelables & Systèmes
Intelligents, Faculté des Sciences et Techniques de Fès

Cadre du rapport : Stage de Fin d'Etude

Titre du projet de stage :

« Etude et conception d'un onduleur photovoltaïque »

Encadrantes :

Mme F. ERRAHIMI

Mme N. ES-SBAI

Date de début du stage : Le 01 Mars 2015

Date de fin du stage : Le 22 Juin 2015

Dédicace

Je dédie ce mémoire:

À mes très chers parents

À ma chère sœur Salima

À mes chers frères Yassine et Youssef

À toute ma famille

À Tous mes amies, tous mes camarades et particulièrement :

Arafa, Omar, Ahmed et Youssef

À tous mes professeurs et enseignants

Je dédie aussi ce travail aux membres du laboratoire LERSI pour leur accueil et les conseils qu'ils m'ont prodigué tout au long de la durée du stage.

A tous mes collègues de l'Etude et particulièrement la promotion de cycle ingénieur d'état systèmes électroniques et télécommunications 2012/2013.

MCHICHOU Mohammed

Remerciements

Je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience qui m'ont permis d'accomplir ce modeste travail.

*Je tiens en premier à exprimer ma profonde gratitude, ma fidèle reconnaissance, mes respects et mes remerciements les plus sincères à mes encadrantes **Mme. FATIMA ERRAHIMI** et **Mme. NAJIA ES-SBAI** qui n'ont pas cessé de me prodiguer leurs conseils et leurs recommandations ainsi que pour leur générosité en matière d'encadrement*

Je remercie également le membre de jury pour avoir examiné ce travail.

*De même, je tiens à témoigner ma reconnaissance à tous mes enseignants et les doctorants **Mr. O. DIORI**, **Mr. A. GAGA** et **Mr Y. CHEDDADI** qui ont contribué à l'enrichissement de mes connaissances.*

Mes remerciements sont destinés aussi au personnel de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès pour sa générosité, sa gentillesse et sa présence permanente pour me servir.

Enfin, mes remerciements sont adressés à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumé

La demande croissante de l'énergie électrique et l'épuisement futur inévitable des sources classiques exigent des recherches sur des sources alternatives, comme les énergies renouvelables parmi lesquelles, l'énergie solaire est la plus utilisée vu ses nombreux domaines d'applications.

Ce mémoire est consacré à la conception d'un onduleur photovoltaïque multi-niveaux. Pour un fonctionnement optimal du système, nous connectons le générateur photovoltaïque (GPV) à un hacheur survolteur adapté par une commande MPPT en utilisant la méthode de Perturbation et Observation (P&O), pour assurer le fonctionnement à sa puissance maximale quelque soit les conditions climatiques.

L'onduleur qui peut assurer l'injection de cette énergie photovoltaïque au réseau électrique doit répondre aux exigences du raccordement au réseau électrique (la fréquence, la valeur maximale de la tension et le déphasage). En effet, l'onduleur cinq niveaux à structure cascade à commande MLI sinusoïdale permet de répondre à ces exigences.

Mots clés : Source PV, Onduleur cascade à cinq niveaux, MPPT

Abstract

The increasing demand of electric power and the inevitable of conventional sources require us to research on alternative sources, such as renewable energies, from permitting; solar energy is the energy which the most widely used because of its many advantages.

This work is devoted to the concept of a photovoltaic inverter multilevel. For optimum operation of the system, we connect the GPV to a chopper booster adapted by MPPT control by the conventional method Disruption and Observation (P&O) which ensures their maximum powers when the climatic conditions changes.

The inverter which can ensure the injection of this photovoltaic power to the grid must meet the requirements for connection to the electricity grid (frequency, the maximum value of the voltage and phase angle). The inverter five levels structure cascaded controlled PWM sinusoidal permit these requirements of interconnection.

Keywords: solar generator PV, Power inverter five levels cascaded, MPPT.

Liste des Symboles et Abréviations

Symboles

| | |
|--------------------------|--|
| P_{MAX} | Puissance maximale du module PV |
| $P_{entrée}, P_{sortie}$ | Puissance d'entrée et de sortie de l'onduleur PV |
| η | Rendement de l'onduleur PV |
| V_{eff} | Tension efficace |
| N | Niveau de la tension de sortie de l'onduleur multi-niveaux |
| V_s, I_s | Tension et courant de sortie |
| h | Rang d'harmonique |
| I_{LI}, V_{LI} | Les valeurs efficaces de courant et tension fondamental |
| I_{Lh}, V_{Lh} | Les valeurs efficaces de courant et tension harmonique |
| $THDi, THDv$ | Taux de distorsion harmonique en courant et en tension |
| ω_c | Pulsation de coupure |
| V_{ref}, V_p | Tension référence et porteuse |
| Ki | Interrupteurs de l'onduleur |
| V_{dc} | Tension de bus continu de l'onduleur |
| D_{Ki} | Commande d'un interrupteur de l'onduleur |
| f_c | Fréquence de coupure du filtre |
| $V_{out, max}$ | Amplitude de la tension de sortie |
| $V_{out, eff}$ | Valeur efficace de la tension de sortie |
| V_{PV}, V_s | Tension d'entrée et de sortie du convertisseur DC-DC |
| I_{PV}, I_s | Courant d'entrée et de sortie du convertisseur DC-DC |
| D | Rapport cyclique |
| T | Intervalle de commutation de l'interrupteur du convertisseur DC-DC |
| T_{ON}, T_{OFF} | Intervalles de la fermeture et de l'ouverture de l'interrupteur |
| η_{MPPT} | Rendement du convertisseur DC-DC |

| | |
|------------|--|
| V_c | tension contractuelle du réseau |
| L_F | Inductance de filtre de raccordement |
| ΔV | Différence de potentielle entre la tension de réseau et la tension de l'onduleur |

Abréviations

| | |
|--------|---|
| PV | Photovoltaïque |
| GPV | Générateur Photovoltaïque |
| DC | Direct Corrent |
| AC | Alternating Current |
| PPM | Point de Puissance Maximale |
| MPPT | Maximum Power Point Tracker |
| MLI | Modulation de Largeur d'Impulsion |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| NPC | Neutral Point Clamped |
| THD | Taux de Distorsion Harmonique |
| SVM | Space Vector Modulation |
| H | Onduleur en pont complet (H-Bridge) |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| MOSFET | Métal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor |
| GTO | Gate Turn-Off Thyristor |
| P&O | Méthode de Perturbation et Observation |
| BT | Basse Tension |
| PLL | Phase Locked Loop |
| DP | Détecteur de Phase |
| VCO | Voltage Controlled Oscillator |
| PID | Proportional-Integral-Derivative controller |

Table des matières

| | |
|----------------------------|----|
| Introduction générale..... | 13 |
|----------------------------|----|

Chapitre 1 : Les onduleurs photovoltaïques

| | |
|---|----|
| 1.1. Introduction | 16 |
| 1.2. Généralités | 16 |
| 1.2.1. Description | 16 |
| 1.2.2. Fonctionnement | 17 |
| 1.2.3. Rendement..... | 19 |
| 1.3. Types d'onduleurs photovoltaïques..... | 20 |
| 1.4. Onduleurs multi-niveaux | 21 |
| 1.4.1. Onduleur multi-niveaux à diode de bouclage..... | 22 |
| 1.4.2. Onduleur multi-niveaux à condensateurs flottants | 23 |
| 1.4.3. Onduleur multi-niveaux à alimentation séparée (en cascade) | 24 |
| 1.5. Conclusion..... | 25 |

Chapitre 2 : Pollution harmonique & Stratégies de commandes

| | |
|---|----|
| 2.1. Introduction | 27 |
| 2.2. L'influence des charges sur la sortie de l'onduleur | 27 |
| 2.2.1. Charges linéaires | 27 |
| 2.2.2. Charges non-linéaires | 27 |
| 2.2.3. Les harmoniques..... | 28 |
| 2.3. Les solutions pour éliminer les harmoniques | 29 |
| 2.3.1. Filtrage passif | 29 |
| 2.3.2. Filtrage actif | 31 |
| 2.4. Les différentes stratégies de Commande des onduleurs de tension..... | 33 |
| 2.4.1. La commande en pleine onde | 33 |
| 2.4.2. Modulation de largeur d'impulsion | 34 |
| 2.4.2.1. La modulation sinus-triangle (MLI sinusoidale)..... | 34 |
| 2.4.2.2. La modulation vectorielle (SVM) : | 36 |
| 2.5. Conclusion..... | 38 |

Chapitre 3 : Conception d'un onduleur cascade à cinq niveaux

| | |
|--|----|
| 3.1. Introduction | 40 |
| 3.2. Modélisation de l'onduleur cascade à cinq niveaux | 40 |
| 3.2.1. Structure de l'onduleur à cinq niveaux..... | 40 |
| 3.2.2. Principe de fonctionnement..... | 41 |
| 3.2.3. Choix des composants de puissance..... | 42 |
| 3.3. Commande des interrupteurs | 43 |
| 3.3.1. Cas d'une charge linéaire | 46 |
| 3.3.2. Cas d'une charge non-linéaire..... | 47 |
| 3.4. Conception de l'onduleur cascade à cinq niveau..... | 51 |
| 3.5. Conclusion..... | 56 |

Chapitre 4 : Technique MPPT et raccordement au réseau

| | |
|--|--------|
| 4.1. Introduction | 58 |
| 4.2. Etage d'adaptation DC-DC du système PV avec fonction MPPT..... | 58 |
| 4.2.1. Les types des convertisseurs DC-DC | 58 |
| 4.2.2. Etage d'adaptation de type BOOST | 58 |
| 4.2.3. Algorithme de Poursuite du point de puissance maximale P&O | 60 |
| 4.2.4. Amélioration de l'algorithme P&O | 62 |
| 4.3. Raccordement de l'onduleur PV au réseau..... | 66 |
| 4.4. Conclusion..... | 68 |
| Conclusion générale | 69 |
| Références bibliographiques | 70 |
| Annexe A : NORME IEEE STD 519-1992..... | 73 |
| Annexe B : Classification des composants de puissance | 74 |
| Annexe C : l'architecture d'Arduino Mega 2560 | 75 |
| Annexe D : Programme en langage C de l'algorithme P&O avec fonction MLI..... | 76 |
| Annexe E : Circuit imprimé de l'onduleur cascade à cinq niveaux | 77 |

Listes des figures

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure 1.1 | : Schéma d'installation d'un onduleur photovoltaïque..... | 16 |
| Figure 1.2 | : Fonctions principales d'un onduleur PV..... | 17 |
| Figure 1.3 | : Caractéristiques d'un module photovoltaïque (à 25°C)..... | 18 |
| Figure 1.4 | : Schéma synoptique d'un étage DC-DC de l'onduleur PV..... | 18 |
| Figure 1.5 | : Schéma synoptique d'un étage DC-AC de l'onduleur PV..... | 19 |
| Figure 1.6 | : Schémas de principe des différents types d'onduleurs..... | 20 |
| Figure 1.7 | : Les différentes topologies des onduleurs multi niveaux..... | 22 |
| Figure 1.8 | : Structures NPC à trois niveaux a) et à cinq niveaux b)..... | 22 |
| Figure 1.9 | : Structures à condensateurs flottants à trois niveaux a)et à cinq niveaux b)..... | 23 |
| Figure 1.10 | : Onduleur en cascade à cinq niveaux a) et à N niveaux b)..... | 24 |
| Figure 2.1 | : Déformation de la fondamentale par des harmoniques de rang 3et de rang 7..... | 28 |
| Figure 2.2 | : a) Filtre série et b) Filtre parallèle..... | 29 |
| Figure 2.3 | : a) Filtre passe-bas RC, b) Filtre passe-bas LC..... | 30 |
| Figure 2.4 | : Les différentes techniques de commandes..... | 33 |
| Figure 2.5 | : Schéma de principe de la technique sinus-triangle..... | 34 |
| Figure 2.6 | : Principe de la MLI sinusoïdale à triangle multiple..... | 35 |
| Figure 2.7 | : Modulation intersective pour un convertisseur 5 niveaux..... | 35 |
| Figure 2.8 | : Tension de sortie de l'onduleur à cinq niveaux avant et après filtrage..... | 35 |
| Figure 2.9 | : Approximation du vecteur de référence par les tensions d'alimentation..... | 36 |
| Figure 2.10 | : Principe de la génération de la MLI vectorielle à partir des vecteurs d'états..... | 37 |
| Figure 2.11 | : Configuration correspondant aux vecteurs de sortie pour un onduleur à 5 niveaux..... | 37 |
| Figure 3.1 | : Structure de l'onduleur cascade à cinq niveaux..... | 40 |
| Figure 3.2 | : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode..... | 41 |
| Figure 3.3 | : Les états des interrupteurs et la forme de tension de sortie..... | 42 |
| Figure 3.4 | : Classification des composants de puissance en fonction de la fréquence de découpage..... | 42 |
| Figure 3.5 | : Schéma de puissance de l'onduleur cascade à cinq niveaux..... | 43 |
| Figure 3.6 | : Schéma de commande..... | 43 |
| Figure 3.7 | : Les signaux de commande..... | 44 |
| Figure 3.8 | : Allures de la tension et du courant aux bornes de la charge..... | 44 |
| Figure 3.9 | : Spectre de fréquence de la tension et du courant de la charge..... | 45 |

| | | |
|----------------------|---|-----------|
| <i>Figure 3.10</i> : | <i>Onduleur cascade avec un filtre passe-bas LC de deuxième ordre et une charge linéaire.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Figure 3.11</i> : | <i>Allures de la tension et du courant de la charge après filtrage.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Figure 3.12</i> : | <i>Spectre de fréquence de la tension de la charge après filtrage.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Figure 3.13</i> : | <i>Onduleur cascade avec un filtre passe-bas LC de deuxième ordre et une charge non-linéaire.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Figure 3.14</i> : | <i>Allures de la tension et du courant de la charge non-linaire après filtrage.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figure 3.15</i> : | <i>Spectres de fréquences de la tension et du courant de la charge non-linéaire.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figure 3.16</i> : | <i>Filtre passe-bas LC d'ordre 4.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figure 3.17</i> : | <i>Onduleur cascade avec un filtre passe-bas LC d'ordre 4 et une charge non-linéaire.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Figure 3.18</i> : | <i>Allures de la tension et du courant de la charge non-linaire après le filtrage passe-bas d'ordre 4.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Figure 3.19</i> : | <i>Spectres de fréquences de la tension et du courant de la charge non-linéaire.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Figure 3.20</i> : | <i>Modélisation de l'onduleur cascade monophasé à cinq niveaux avec un filtre passe-bas et un transformateur.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Figure 3.21</i> : | <i>Allures de la tension et du courant de sortie.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Figure 3.22</i> : | <i>Cheminement de la programmation et de l'implantation de la commande.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Figure 3.23</i> : | <i>La carte Arduino utilisée.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Figure 3.24</i> : | <i>Schéma de puissance et de commande de l'onduleur cascade à cinq niveaux.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Figure 3.25</i> : | <i>Le bloque "Arduino".....</i> | <i>53</i> |
| <i>Figure 3.26</i> : | <i>Le circuit de Driver 1.....</i> | <i>54</i> |
| <i>Figure 3.27</i> : | <i>Les signaux de commande.....</i> | <i>54</i> |
| <i>Figure 3.28</i> : | <i>La tension aux bornes de la charge.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Figure 3.29</i> : | <i>Schéma d'un bras de l'onduleur avec son driver.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Figure 3.30</i> : | <i>Circuit imprimé d'un bras de l'onduleur.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figure 3.31</i> : | <i>Circuit globale de l'onduleur.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figure 4.1</i> : | <i>Convertisseur élévateur de tension de type Boost.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figure 4.2</i> : | <i>Circuit équivalent pour T_{ON}.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figure 4.3</i> : | <i>Circuit équivalent pour T_{OFF}.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figure 4.4</i> : | <i>Organigramme de l'algorithme P&O (ΔD est le pas de perturbation).....</i> | <i>61</i> |
| <i>Figure 4.5</i> : | <i>Principe de fonctionnement d'un algorithme MPPT.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Figure 4.6</i> : | <i>Organigramme de l'algorithme P&O amélioré avec fonction MLI.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Figure 4.7</i> : | <i>Circuit d'un étage d'adaptation Boost contrôlé par commande MPPT.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figure 4.8</i> : | <i>Allures de puissance maximum du module et de puissance de sortie avec éclaircissement variable.....</i> | <i>65</i> |

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| <i>Figure 4.9</i> | <i>: Allures de puissance maximum du module et de puissance de sortie avec température variable</i> | <i>65</i> |
| <i>Figure 4.10</i> | <i>: Rendement de l'étage d'adaptation DC-DC.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Figure 4.11</i> | <i>: Circuit de puissance et de commande de l'onduleur PV raccordé au réseau.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Figure 4.12</i> | <i>: Principe d'une PLL.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figure 4.13</i> | <i>: Structure de la PLL.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figure B.1</i> | <i>: Classification des composants de puissance en fonction de tension, courant et fréquence de commutation.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Figure C.1</i> | <i>: Schéma de l'architecture globale d'Arduino Mega 2560.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Figure C.2</i> | <i>: Schéma technique de la carte Arduino Mega 2560.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Figure E.1</i> | <i>: Circuit imprimé globale des quatre bras de l'onduleur cascade à cinq niveaux.....</i> | <i>74</i> |

Liste des tableaux

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| <i>Tableau 2.1</i> | <i>: Classification des filtres actifs.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Tableau 2.2</i> | <i>: Comparaisons entre le filtre passif, le filtre actif et le filtre hybride.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Tableau 3.1</i> | <i>: Grandeur connue pour chacune des configurations de l'onduleur cascade à cinq niveaux.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Tableau A.1</i> | <i>: Limites de distorsion de tension pour les fournisseurs.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Tableau A.2</i> | <i>: Limites de distorsion de courant pour les systèmes généraux de distribution (120 V à 69 000 V).....</i> | <i>70</i> |

Laboratoire d'accueil

Ce stage a été effectué au Laboratoire Energies Renouvelables et Systèmes Intelligents (L.E.R.S.I) de la FST de Fès. Ce dernier est constitué de 34 personnes réparties en trois équipes de recherche comme le montre l'organigramme suivant :

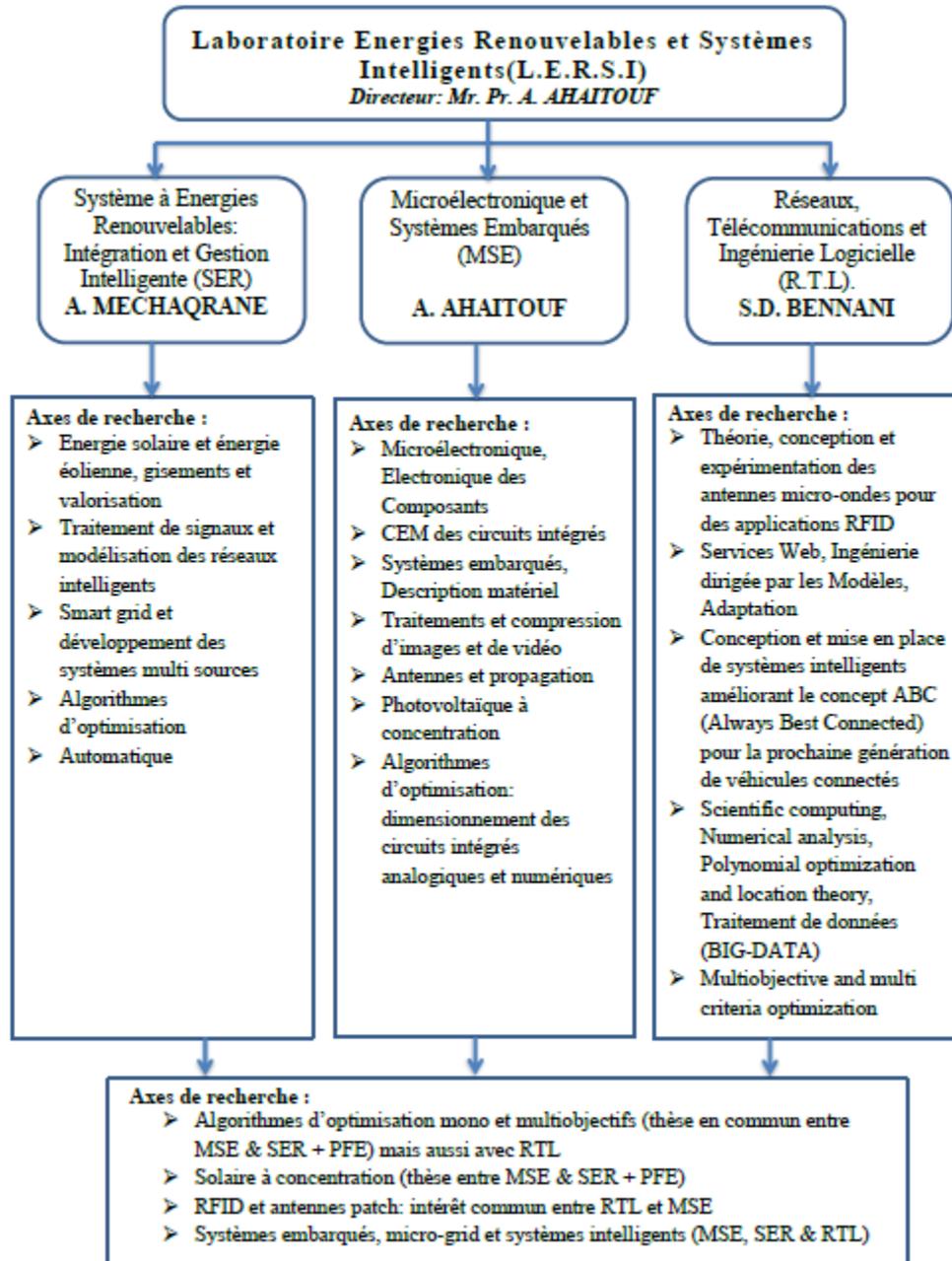


Figure 1 : Organigramme du Laboratoire Energies Renouvelables et Systèmes Intelligents (L.E.R.S.I)

Introduction générale

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée qui regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années, car c'est une source inépuisable et non polluante pour l'environnement. Le développement rapide de l'énergie solaire est apparu progressivement sous forme d'installations de petites puissances raccordées au réseau Basse Tension (BT) [1].

Cependant, le raccordement des systèmes PV au réseau de distribution via l'onduleur photovoltaïque peut avoir quelques impacts sur les réseaux électriques : impacts sur le changement des flux de puissance, sur la qualité de l'énergie ou sur la planification du réseau. La connexion directement des charges aux systèmes PV peut aussi provoquer des perturbations et un mauvais fonctionnement du réseau.

Lors du fonctionnement d'un générateur PV adapté par des convertisseurs d'énergie, le point de puissance maximale (PPM) peut être dégradé suite aux variations des conditions météorologiques ou de la charge. L'adaptation entre la source et la charge a lieu en variant le rapport cyclique. En réalité, la recherche de ce point de puissance maximale doit être réalisée automatiquement. Ceci est tout à fait possible en adoptant l'une des approches d'adaptation connues sous le nom des commandes MPPT (Maximum Power Point Tracking) [2].

L'objectif de ce travail, réalisé au sein du laboratoire LERSI, est de concevoir un onduleur pour les applications photovoltaïques. Après l'étude des différentes topologies d'onduleurs, nous choisirons la topologie la plus convenable. Ensuite nous présenterons les différentes commandes et précisons la commande basée sur la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour l'implémentation dans un système embarqué, tout en assurant un fonctionnement optimal de la source PV.

Ce rapport est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre consiste à présenter les onduleurs photovoltaïques et les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.

- Le deuxième chapitre décrit l'influence des charges connectées à l'onduleur sur la forme d'onde de sortie. Afin de réduire le taux de distorsion des harmoniques, des filtres seront ainsi proposés. Par la suite, différentes stratégies de commande des onduleurs de tension seront abordées.
- Le troisième chapitre est dédié à l'étude et à la conception d'un onduleur multi-niveaux et précisément l'onduleur à structure cascade à cinq niveaux.
- Le dernier chapitre est consacré à l'étude d'un convertisseur DC-DC, sa commande est basée sur l'algorithme de maximisation de puissance MPPT. Nous proposons aussi une solution adaptative de raccordement des onduleurs PV aux réseaux électriques.

Chapitre 1

Les onduleurs photovoltaïques

1.1. Introduction

Depuis plus de dix ans, le marché mondial des systèmes photovoltaïques connaît un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30% à 40% par an, dû en particulier aux installations raccordées au réseau électrique de distribution. Cette croissance exceptionnelle passe nécessairement par des innovations technologiques et une baisse des coûts des modules photovoltaïques, mais également par des efforts significatifs de recherche et de développement, notamment dans le domaine de l'électronique de puissance.

Les performances techniques et la robustesse des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité sont des éléments-clés qui peuvent fortement impacter la production d'énergie électrique et par conséquent, la rentabilité financière d'un système.

On s'intéresse dans ce chapitre, aux onduleurs photovoltaïques, suivi des différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.

1.2. Généralités

1.2.1. Description

L'onduleur photovoltaïque joue le rôle d'interface entre le champ photovoltaïque et le réseau électrique.

L'onduleur convertit le courant continu du champ photovoltaïque en courant alternatif compatible avec le réseau électrique. Le courant produit est injecté sur le réseau (via l'habitation) au fil du soleil.

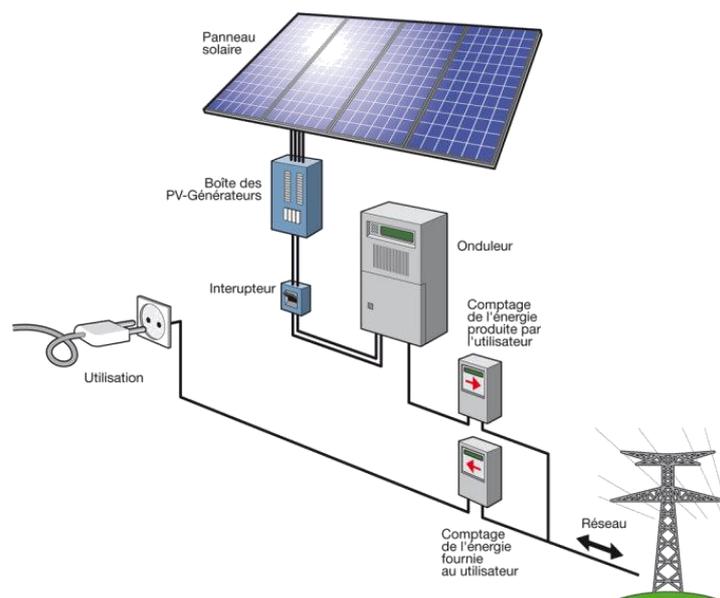


Figure 1.1 : Schéma d'installation d'un onduleur photovoltaïque [w1]

L'installation photovoltaïque est constituée de modules solaires, composés de cellules photovoltaïques, qui transforment l'énergie solaire en électricité. Le courant continu est converti en courant alternatif par un onduleur. Ce courant produit peut être revendu au réseau.

1.2.2. Fonctionnement

L'onduleur intègre trois fonctions principales : la conversion du courant continu en courant alternatif, le couplage et découplage du réseau électrique et le suivi de la puissance maximale (P_{max}) du champ photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement et de la température.

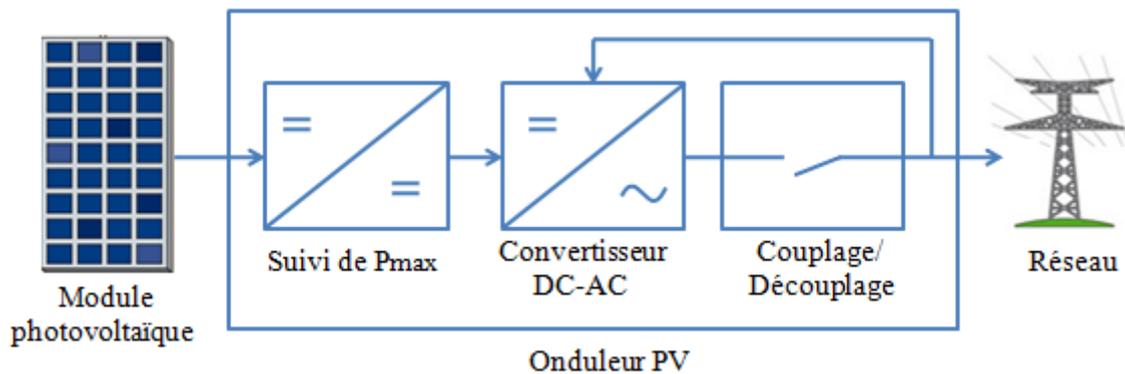


Figure 1.2 : Fonctions principales d'un onduleur PV

Pour que l'onduleur soit couplé avec le réseau électrique, il faut que la puissance et la tension du côté continu (DC) soient suffisantes (début de journée). En outre, il faut qu'il y ait de la tension sur le réseau électrique et qu'il n'y ait pas de défaut d'isolement au niveau du champ photovoltaïque (par exemple une fuite de courant sur un câble DC). Si l'une de ces conditions n'est pas remplie, l'onduleur se découple du réseau électrique.

La recherche du meilleur point de fonctionnement du système est la principale caractéristique de l'onduleur PV. En effet, le générateur PV a une courbe caractéristique non-linéaire (figure 1.3). 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, il augmente si l'éclairement augmente.

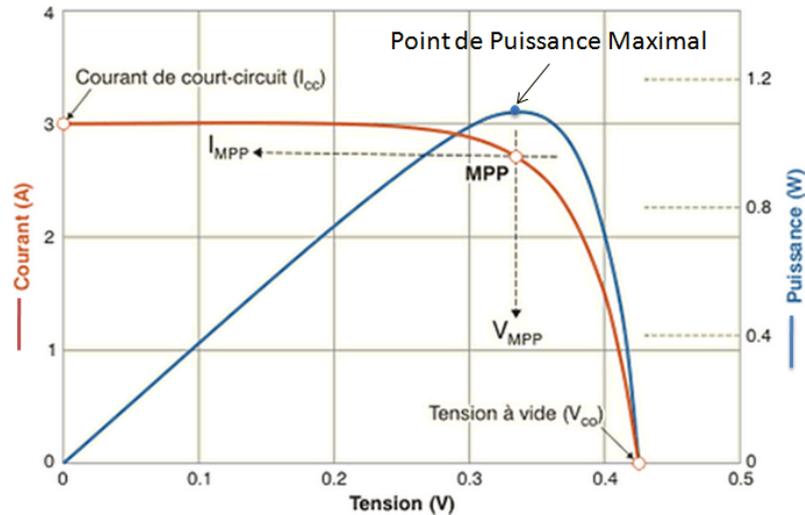


Figure 1.3 : Caractéristiques d'un module photovoltaïque (à 25°C) [w2]

Le meilleur point de fonctionnement du système (PPM ou MPP en anglais) correspond au point de cette courbe où la puissance est maximisée.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du module PV et de la transférer à la charge la technique classique consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le module PV et la charge comme décrit dans la figure 1.4.

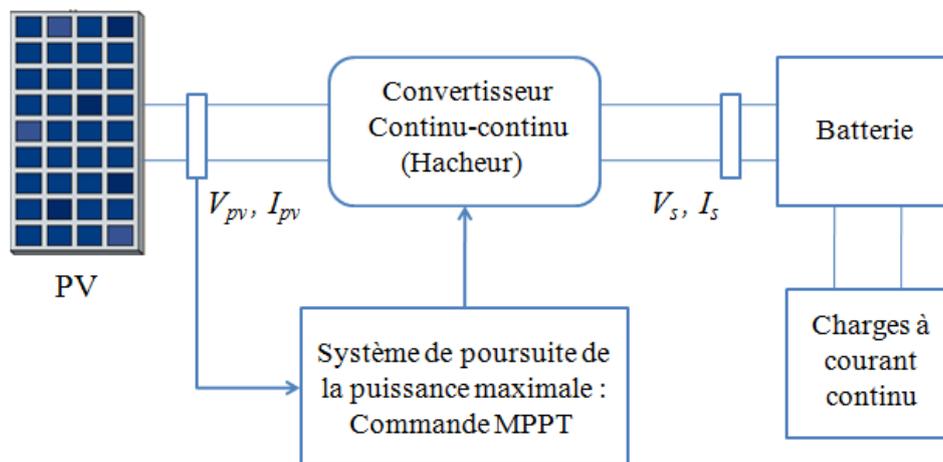


Figure 1.4 : Schéma synoptique d'un étage DC-DC de l'onduleur PV

L'onduleur de tension impose à sa sortie une tension sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsions (MLI ou PWM en anglais). Ces créneaux ne posent aucun problème pour l'alimentation d'un moteur, mais sont incompatibles avec les tensions sinusoïdales du réseau. On place alors à la sortie de l'onduleur un filtre qui permet de fournir à la charge un signal alternatif sinusoïdal de même fréquence qu'un réseau électrique.

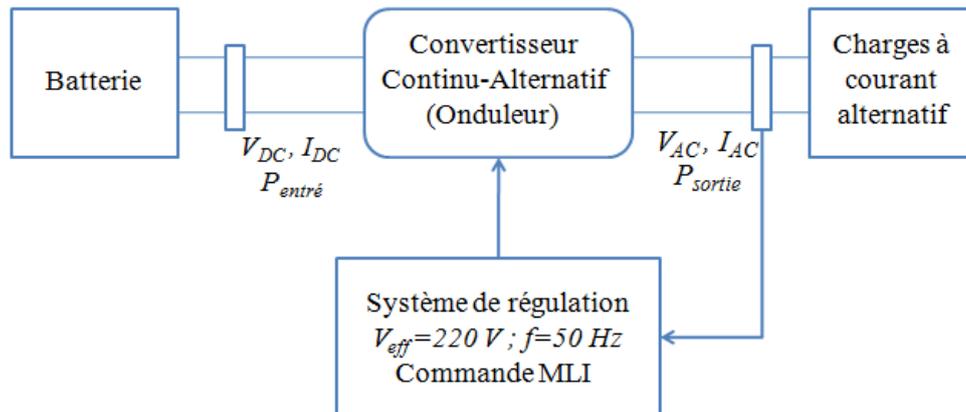


Figure 1.5 : Schéma synoptique d'un étage DC-AC de l'onduleur PV

1.2.3. Rendement

Le rendement des onduleurs correspond au rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée, il est exprimé en pourcentage. Le rendement total d'un onduleur est le produit du rendement du MPPT et du convertisseur DC-AC. Il dépend de plusieurs facteurs :

- La puissance de l'onduleur
- Le niveau de tension d'entrée DC
- Les performances de recherche de P_{max} (MPPT)
- De la technologie utilisée pour la conversion DC/AC (BF, HF, composants,...)
- De la présence ou non d'un transformateur

$$\eta = \frac{P_{sortie}}{P_{PV}} = \frac{P_{MPPT}}{P_{PV}} \times \frac{P_{sortie}}{P_{MPPT}} \quad (1.4)$$

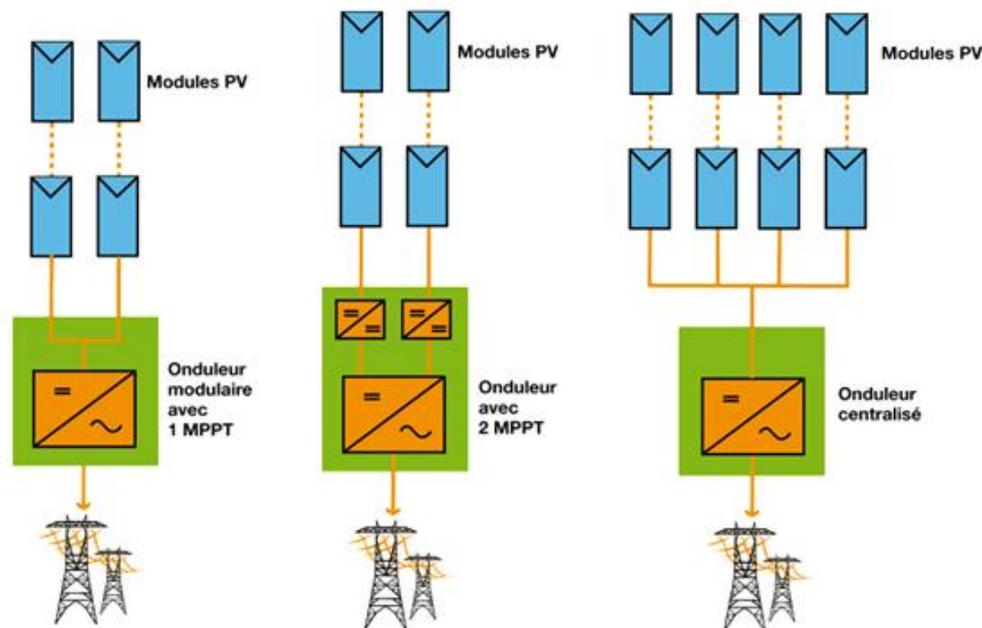
$$P_{sortie} = V_{AC,eff} \times I_{AC,eff} \times \cos(\varphi) \quad (1.6)$$

Où P_{PV} est la puissance délivrée par le module PV, P_{sortie} est la puissance de sortie de l'onduleur et $\cos(\varphi)$ est le facteur de puissance ($\cos(\varphi) = \text{puissance active} / \text{puissance apparente}$).

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 15 ans, 90% était considéré comme un très bon rendement des onduleurs. Aujourd'hui, les meilleurs onduleurs atteignent des pics de rendement de 98% et la moyenne des pics de rendement est de 95,2% [w3].

1.3. Types d'onduleurs photovoltaïques

Parmi les types d'onduleurs PV on trouve: les onduleurs modulaires avec un suiveur PPM, les onduleurs modulaires avec plusieurs suiveurs PPM et les onduleurs centralisés (figure 1.2) :



a) Onduleur avec 1 MPPT b) Onduleur avec 2 MPPT c) Onduleur centralisé

Figure 1.6 : Schémas de principe des différents types d'onduleurs PV [w4]

1.3.1. Les onduleurs modulaires avec un suiveur PPM

Les onduleurs modulaires mono MPPT (figure 1.6.a) sont les plus utilisés pour les installations électriques pour les particuliers. Ils ont des puissances de quelques kW. Chaque string de modules est raccordé directement à l'onduleur, ce qui nécessite peu d'appareillage au niveau continu. Les tensions d'entrée varient entre 150V et 800V et l'injection se fait dans la majorité des cas en monophasé.

Ces onduleurs permettent une grande flexibilité dans la conception des installations photovoltaïque. Leur installation est relativement simple et ils demandent peu de maintenance.

1.3.2. Les onduleurs modulaires avec plusieurs suiveurs PPM

Les onduleurs modulaires multi-suiveurs (figure 1.6.b) sont plus rares pour les installations électriques pour les particuliers. Ils comprennent un convertisseur DC/DC sous champ photovoltaïque (une partie des strings) qui permet un bon suivi de la puissance maximale P_{max} . Le convertisseur DC/AC est par contre unique à l'ensemble du champ.

Ce type d'onduleurs permet une très grande flexibilité dans le dimensionnement des systèmes (technologie, taille, orientation, inclinaison, ombrage) avec un suiveur pour chaque cas spécifique.

Ils sont particulièrement utilisés dans le cas de bâtiments avec des pans de toiture d'orientation et/ou d'inclinaison différentes.

1.3.3. Les onduleurs centralisés

Les onduleurs centralisés (figure 1.6.c) sont exclusivement utilisés pour des systèmes photovoltaïques de grande taille (>100 kW). Ils disposent d'un seul onduleur pour tout le système. Leur puissance unitaire varie de quelques kW à quelques MW.

Les différents strings sont mis en parallèle dans des boîtes de jonction avant d'être connectés à l'onduleur centralisé. Cette mise en place nécessite un câblage et un appareillage DC spécifique et plus élaboré.

La tension d'entrée de ces onduleurs varie entre 300 et 900 V et l'injection se fait principalement en triphasé.

1.4. Onduleurs multi-niveaux

Un onduleur est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension continue que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales [3].

Les onduleurs de tension multi niveaux peuvent être implantés de différentes manières, dans lesquelles la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux.

Les principales topologies de la conversion multi-niveaux sont:

- La topologie à diode de bouclage (NPC) ;
- La topologie au condensateur flotteur (à cellule imbriquées) ;
- La topologie en cascade.

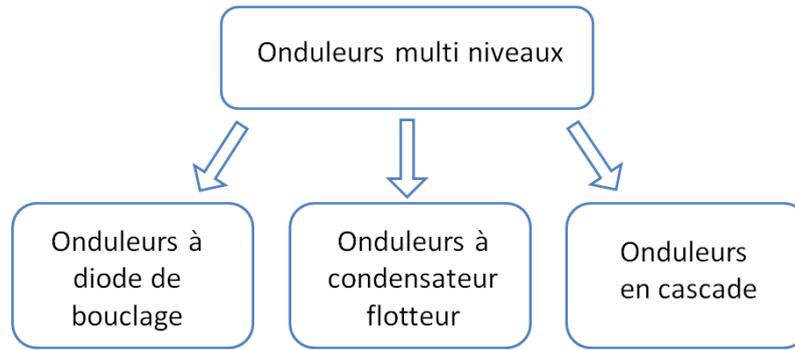


Figure 1.7 : Les différentes topologies des onduleurs multi niveaux

1.4.1. Onduleur multi-niveaux à diode de bouclage

La première topologie d'onduleur de tension multi-niveaux est la structure NPC (Neutral Point Clamped) [4]. Les onduleurs NPC à trois et à cinq niveaux sont donnés par la figure 1.8. Les diodes sont utilisées pour réaliser la connexion avec le point de référence o . Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, $N-1$ capacités sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à $V_{dc} / (N-1)$, V_{dc} étant la tension d'entrée totale appliquée. Les deux interrupteurs dans un même bras sont commandés de façon complémentaire.

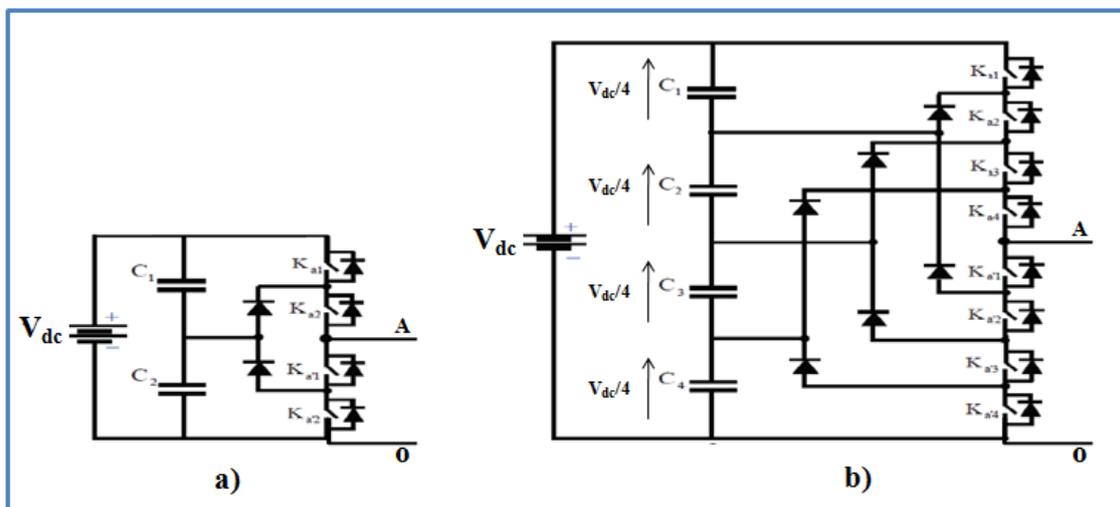


Figure 1.8 : Structures NPC à trois niveaux a) et à cinq niveaux b)

Parmi les avantages de ces structures, il y a :

- Elle est configurable de façon à obtenir un nombre élevé de niveaux, permettant de réduire la tension bloquée par chaque interrupteur ; celle-ci est donnée par $V_{dc} / (N-1)$.
- Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée capable de supporter le courant de la pleine charge [5].

Ces structures présentent aussi un inconvénient, en effet les diodes de bouclage peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à $V_{dc} (N-1)/N$. Donc les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela complique la conception [6].

1.4.2. Onduleur multi-niveaux à condensateurs flottants

La topologie de l'onduleur multi-niveaux à condensateur flotteur (Flying Capacitor Multilevel Inverter) est donnée par la figure 1.9. Cette structure permet de résoudre d'une part le problème de l'équilibre des tensions, et d'autre part pour réduire le nombre excessif de diodes.

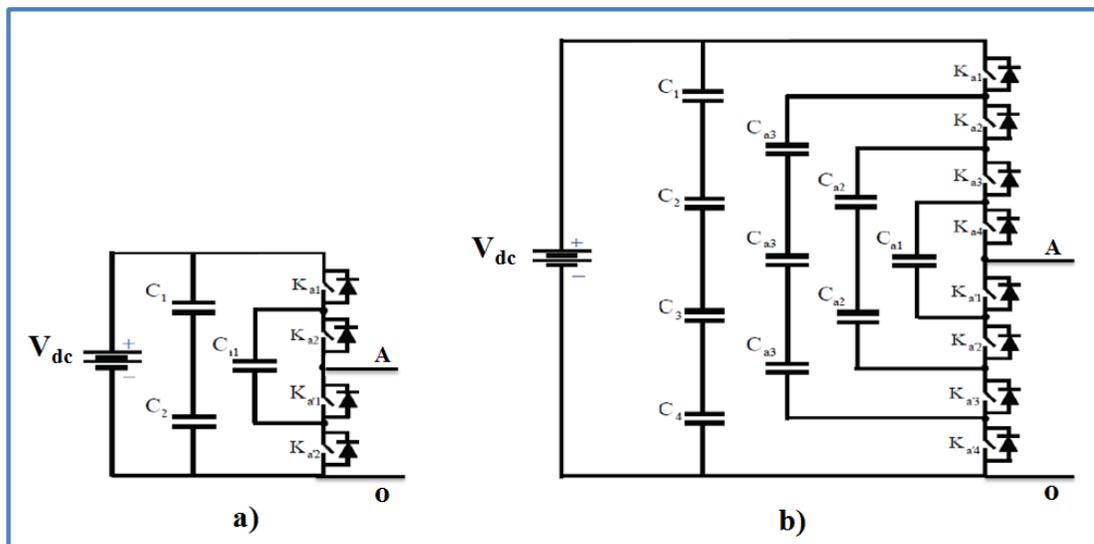


Figure 1.9 : Structures à condensateurs flottants à trois niveaux a) et à cinq niveaux b)

Parmi les avantages de ces structures, il y a :

- La modularité de ces structures permet une extension et une adaptation aisées des stratégies de commande à un nombre élevé de niveaux,
- Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.

Ces structures présentent aussi des inconvénients tels que:

- Le nombre important requis de condensateurs, ce qui peut représenter un volume prohibitif,
- La circulation de courants de grandes valeurs efficaces à travers ces condensateurs,
- La présence d'un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés [7].

1.4.3. Onduleur multi-niveaux à alimentation séparée (en cascade)

Les onduleurs multi-niveaux en cascade est une structure relativement nouvelle. Un onduleur multi-niveaux en cascade est tout simplement une connexion en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasés; ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. La figure 1.10 montre le schéma de base d'un convertisseur N niveaux en cascade formé par l'association en série de $(N-1)/2$ ponts à deux niveaux. La tension de sortie V_s d'une telle structure est donnée par la somme des $(N-1)/2$ tensions en sortie de ces ponts. Chaque onduleur monophasé en pont est connecté à sa propre source en courant continu.

Le nombre de niveaux de tension de sortie dans un onduleur en cascade est définie par :

$N = 2S + 1$, Où S est le nombre des sources des tensions continues.

L'avantage principal de cette approche est que la topologie de ce type d'onduleur facilite la maintenance, en plus elle permet de donner une façon très pratique pour augmenter le nombre de niveaux dans le système. Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire. Mais il est nécessaire d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.

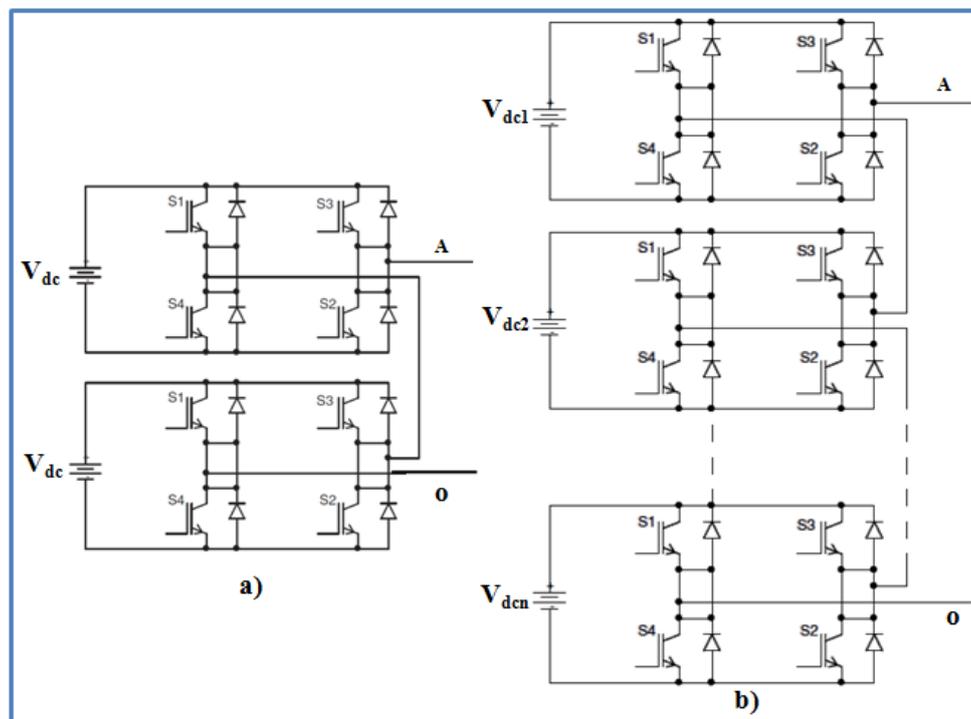


Figure 1.10 : Onduleur en cascade à cinq niveaux a) et à N niveaux b)

Cette topologie est adaptée facilement à l'alimentation photovoltaïque [8]. En effet, les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur

tension d'alimentation, la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique. Au contraire, les structures des onduleurs en cascade élèvent leur tension d'alimentation, la tension maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation ; elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation.

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les onduleurs photovoltaïques, ainsi que les différents types d'onduleur multi-niveaux. La topologie cascade s'est avérée la plus adaptée à une installation photovoltaïque.

Chapitre 2

Pollution harmonique & Stratégies de commandes

2.1. Introduction

Ce chapitre met en évidence les effets nocifs engendrés par les charges, ainsi que les effets des harmoniques et leurs caractéristiques.

Diverses méthodes sont utilisées afin de réduire la pollution harmonique. Parmi ces méthodes le filtrage passif et le filtrage actif. Les caractéristiques de ces deux filtres et leurs effets sur les harmoniques seront présentés, et les différentes stratégies de commandes des onduleurs de tension seront aussi étalées.

2.2. L'influence des charges sur la sortie de l'onduleur

L'onduleur photovoltaïque fournit aux charges une tension sinusoïdale de 50 Hz (fréquence du réseau). La forme d'onde du courant fourni par la source en réponse aux besoins de la charge dépend du type de charge.

2.2.1. Charges linéaires

Le courant absorbé par les charges linéaires est sinusoïdal avec la même fréquence que la tension. La loi d'Ohm définit une relation linéaire entre la tension et le courant ($v = Z \cdot i$) avec un coefficient constant, l'impédance de charge. Il s'agit, par exemple, des ampoules classiques, des systèmes de chauffage, des moteurs, des transformateurs, ...etc. Elles ne contiennent aucun composant électronique actif, seulement des résistances (R), des bobines (L) et des condensateurs (C).

2.2.2. Charges non-linéaires

Le courant absorbé par les charges non-linéaires est périodique, mais pas sinusoïdal : la forme d'onde du courant est déformée par les courants harmoniques.

La loi d'Ohm définissant le rapport entre la tension totale et le courant, n'est plus valide car l'impédance de la charge varie au cours d'une période [9]. Elle s'applique à chaque tension et courant du même rang d'harmoniques h , $v_h = Z_h \cdot i_h$, où Z_h est l'impédance de charge pour le rang h donné.

Toutes les charges qui provoquent une distorsion du courant sinusoïdal normal créent des harmoniques, et sont appelées des charges non linéaires. Il s'agit, par exemple, des lampes fluorescentes, des lampes à décharge, d'ordinateurs, de variateurs de vitesse, ...etc.

Ces charges non linéaires génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive, ce qui conduit à des conséquences directes sur la forme d'ondes de

tensions et de courants qui deviennent non sinusoïdale et donc un dysfonctionnement de plusieurs appareils sensibles à ce genre de problèmes.

Par conséquent, il est nécessaire de réduire les harmoniques dominants en dessous de 5% comme spécifié dans la norme harmonique IEEE (voir Annexe A).

2.2.3. Les harmoniques

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier (h) de la fréquence du réseau, appelée fréquence fondamentale (50 Hz). Lorsqu'elles sont combinées à la tension ou au courant fondamental sinusoïdal, les harmoniques provoquent la distorsion de la forme d'onde de la tension ou du courant. Un exemple de la distorsion de la fondamentale par des harmoniques de rang 3 et 7 est donné sur la figure 2.1. Comme conséquences de cette distorsion, il y a : les surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), les déclenchements intempestifs, le vieillissement accéléré et la dégradation du rendement [10].

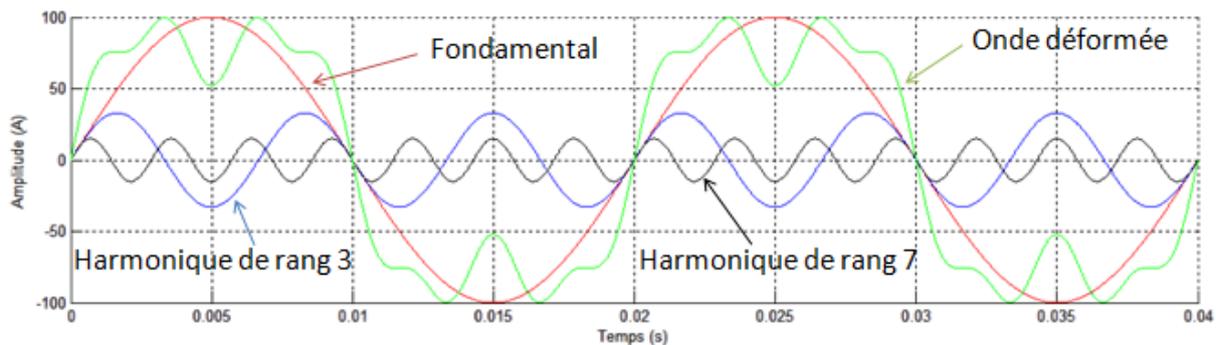


Figure 2.1 : Déformation de la fondamentale par des harmoniques de rang 3 et de rang 7

La caractérisation des harmoniques peut être définie à l'aide du taux de distorsion harmonique THD. Ce dernier, donnant une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques, est défini comme étant le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental. Deux taux de distorsion harmonique sont distingués :

Le taux de distorsion harmonique en courant THD_i et en tension THD_v [11], il s'exprime par :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{+\infty} \left(\frac{I_{Lh}}{I_{L1}}\right)^2} \quad ; \quad THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{+\infty} \left(\frac{V_{Lh}}{V_{L1}}\right)^2} \quad (1.12)$$

Où I_{L1} et V_{L1} désignent respectivement les valeurs efficaces de courant et de tension fondamentale, I_{Lh} et V_{Lh} désignent respectivement les valeurs efficaces de courant et de tension harmonique.

2.3. Les solutions pour éliminer les harmoniques

Parmi les solutions qui permettent d'éliminer ou d'atténuer les harmoniques, il y a le filtrage. Deux types de filtres sont utilisés à savoir les filtres passifs et les filtres actifs.

2.3.1. Filtrage passif

Le principe du filtrage passif est de modifier localement l'impédance du réseau afin de faire dévier les courants harmoniques et éliminer les tensions harmoniques résultantes. Ces filtres sont composés d'éléments capacitifs et inductifs qui sont disposés de manière à obtenir une résonance série sur une fréquence déterminée.

Il est possible de classifier les filtres passifs selon leur emplacement, leur mode de connexion, leur degré d'amortissement et leur fréquence de résonance.

Les filtres passifs peuvent se diviser en deux familles, soit les filtres séries et les filtres parallèles. Selon le type choisi, les harmoniques peuvent être littéralement bloqués par une impédance série élevée (figure 2.2.a) entre l'onduleur et la charge, déviés par une faible impédance en parallèle (figure 2.2.b) ou une combinaison des deux.

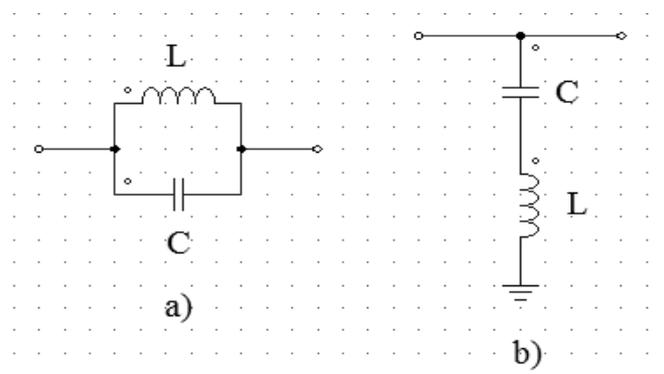


Figure 2.2 : a) Filtre série et b) Filtre parallèle

Le filtre parallèle est utilisé exclusivement du côté alternatif pour deux raisons :

- Il porte uniquement le courant harmonique et est lié à la terre.
- À la fréquence fondamentale, il possède l'avantage de fournir de la puissance réactive.

Pour une efficacité équivalente au filtre série, le filtre parallèle est beaucoup moins cher. Le filtre parallèle est surtout utilisé dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques, alors que le filtre série l'est pour les charges génératrices de tensions harmoniques [12].

Il y a deux types de filtres parallèles: résonnant et amorti. Le filtre résonnant ne compense qu'un rang harmonique à la fois alors que le filtre amorti compense les harmoniques dans la limite de sa bande passante.

Les filtres passe-bas sont largement utilisés pour l'atténuation de tout type de fréquences harmoniques au dessus de la fréquence de seuil. Ils peuvent être utilisés sur les charges non linéaires. Ils ne posent pas de menaces pour le système en créant les conditions de résonance. Ils améliorent le facteur de puissance, mais ils doivent être conçus de telle sorte qu'ils soient capables de transporter un courant à pleine charge. Ces filtres bloquent les harmoniques indésirables et permettent une certaine plage de fréquences à transmettre.

Sur la figure 2.3, nous donnons deux types de filtres passe-bas :

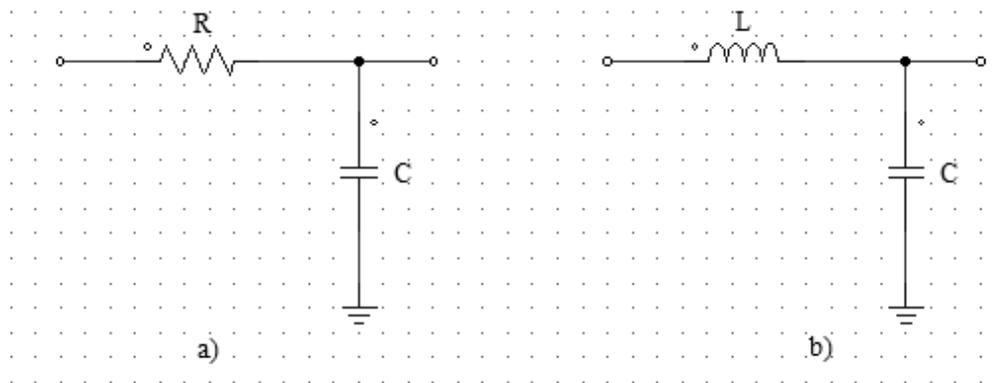


Figure 2.3 : a) Filtre passe-bas RC, b) Filtre passe-bas LC

Dans le premier cas (figure 2.3.a), c'est un filtre passe bas RC de premier ordre dont la fonction de transfert est donnée par :

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}} \quad (2.1)$$

avec $\omega_c = \frac{1}{RC}$

Dans le second cas (figure 2.3.b), c'est un filtre passe bas LC de deuxième ordre dont la fonction de transfert est donnée par :

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + \left(j \frac{\omega}{\omega_c}\right)^2} \quad (2.2)$$

avec $\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Où ω_c : est la pulsation de coupure.

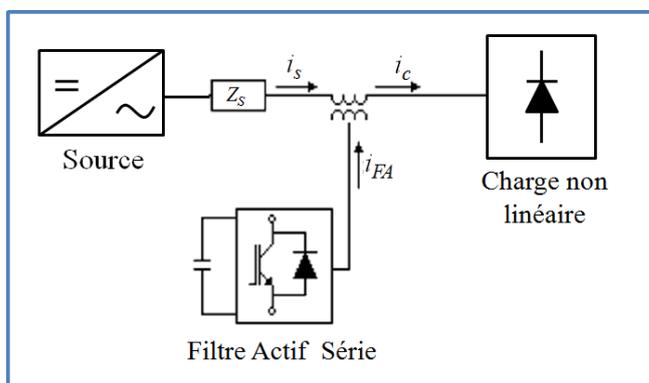
2.3.2. Filtrage actif

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance. Alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs [13]. Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux de l'onduleur PV afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal.

Le filtre actif peut être en série ou en parallèle, suivant qu'il est conçu pour compenser les tensions ou les courants harmoniques.

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies. En effet, les filtres actifs peuvent être en série, en parallèle ou hybride [14].

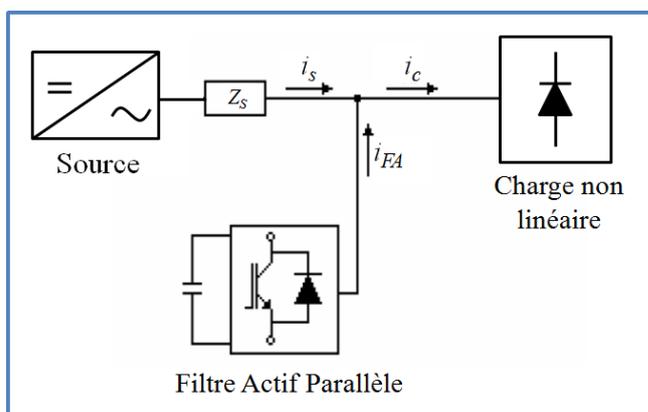
Filtre actif série [15]



Avantages : Isolation et absorption des tensions harmoniques, rééquilibrage et régulation des tensions alimentant la charge non-linéaire.

Inconvénients : Coût et pertes élevés, difficulté de protéger le filtre actif contre les surintensités, incapacité à contrôler l'énergie réactive.

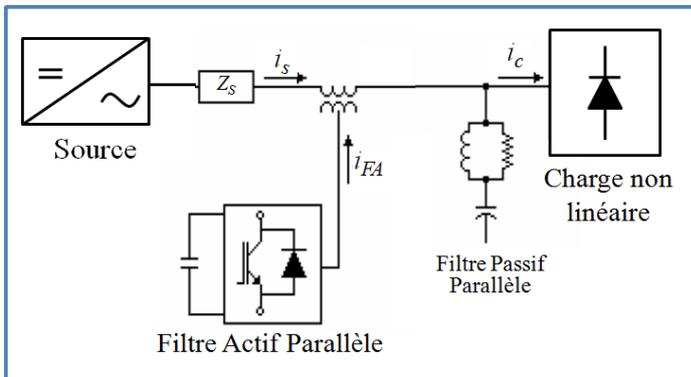
Filtre actif parallèle [15,16]



Avantages : Elimination des courants harmoniques, compensation de l'énergie réactive, correction du facteur de puissance, rééquilibrage des courants de la charge non-linéaire.

Inconvénients : Coût et pertes élevés, limité aux charges de faible et moyenne puissance, risque d'écoulement des courants de compensation dans les filtres passifs raccordés au même réseau.

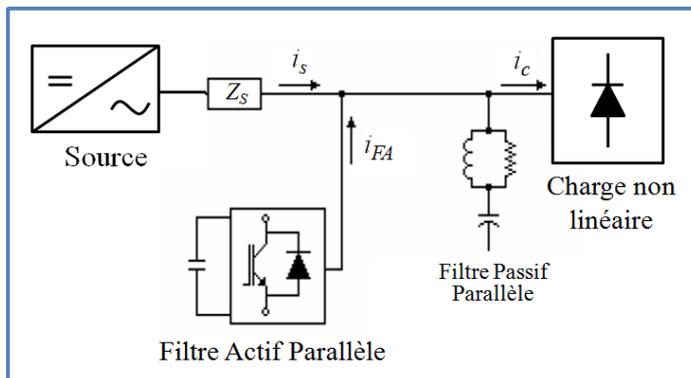
Filtre actif série - passif Parallèle [17]



Avantages : Taux plus réduit du filtre actif destiné seulement à améliorer les caractéristiques de compensation du filtre passif, aucun risque de circulation d'harmoniques dans le filtre actif.

Inconvénients : Difficulté à protéger le filtre actif contre les surintensités, incapacité à contrôler l'énergie réactive

Filtre actif Parallèle - passif Parallèle [18]



Avantages : Dimensionnement réduit du filtre actif destiné seulement aux basses fréquences harmoniques, applicabilité aux fortes puissances, régulation de l'énergie réactive.

Inconvénients : Les courants de compensation peuvent circuler dans les filtres passifs, les courants harmoniques peuvent transiter dans le filtre actif.

Tableau 2.1 : Classification des filtres actifs

Le rôle du filtre actif est de maintenir et d'améliorer les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et de la tension de sortie de l'onduleur, tandis que le filtre passif s'occupe de la compensation d'une bonne partie des harmoniques.

Le tableau ci-dessous donne une comparaison entre le filtre passif, le filtre actif et le filtre hybride de point de vue performance, fiabilité, coût et pertes :

| | Filtres Passifs | Filtres Actifs | Filtres Hybrides |
|--------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Performance | Pauvre | Bonne | Bonne |
| Fiabilité | Pauvre | Pauvre | Moyenne |
| Coût | Réduit | Elevé | Moyen |
| Pertes | Réduites | Elevées | Moyennes |

Tableau 2.2 : Comparaisons entre le filtre passif, le filtre actif et le filtre hybride

D'après ce tableau, nous constatons que l'association d'un filtre actif avec un filtre passif que l'on appelle filtre hybride présente les avantages des deux filtres : l'amélioration des performances et la réduction des coûts et pertes. Cette association permet de profiter des performances de chacun de ces filtres.

2.4. Les différentes stratégies de Commande des onduleurs de tension

Pour assurer la détermination en temps réel des instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, il existe plusieurs techniques de modulation (figure 2.4) telles que : La modulation sinus-triangle, la modulation en pleine onde, et la MLI vectorielle (SVM : Space Vector Modulation) [19].

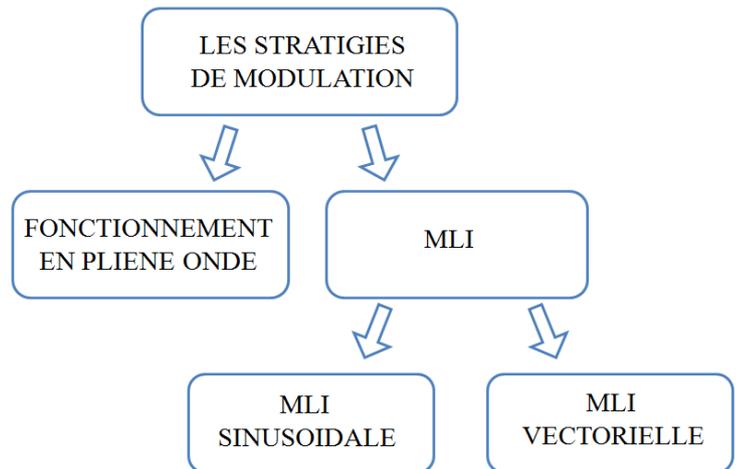


Figure 2.4 : Les différentes techniques de commandes

2.4.1. La commande en pleine onde

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 [20].

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 [21].

$$V_{ab} = \sum_{n=1,3,5\dots}^a \frac{4V_s}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} \sin \left(n \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \right) \quad (2.3)$$

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

2.4.2. Modulation de largeur d'impulsion

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.

2.4.2.1. La modulation sinus-triangle (MLI sinusoïdale)

Le principe de cette stratégie de commande, est de comparer le signal de référence ou modulante V_{ref} de forme sinusoïdale d'amplitude variable et de fréquence f_{ref} appelée référence, avec le signal de n porteuses de forme triangulaire. L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

La technique à MLI sinusoïdale est la plus utilisée pour la commande des onduleurs multi-niveaux [22], qui utilise la technique du décalage de phase pour réduire les harmoniques de la tension de charge.

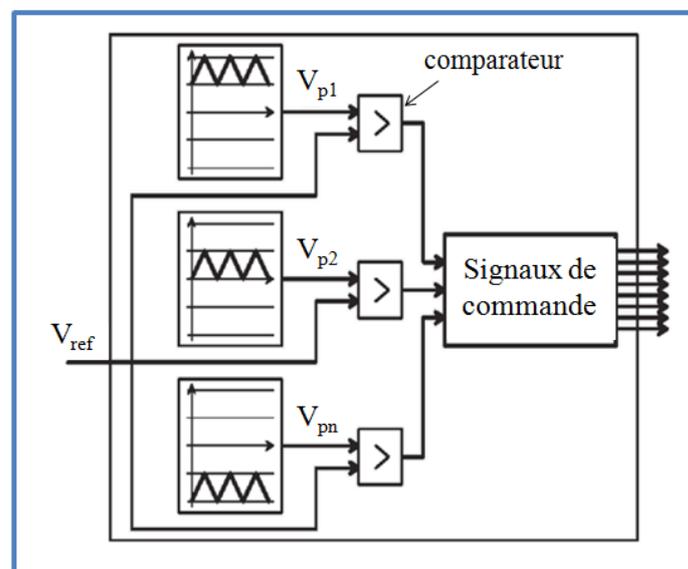


Figure 2.5 : Schéma de principe de la technique sinus-triangle

Cette technique nécessite $(N-1)$ signaux triangulaires de même fréquence et de même amplitude [23]. La figure 2.6 représente le principe de la modulation sinusoïdale à triangle multiple pour un onduleur de cinq niveaux. Et la figure 2.7 illustre l'évolution des états de chaque cellule (V_{pi}) d'un onduleur à cinq niveaux sur une période du réseau (50 Hz).

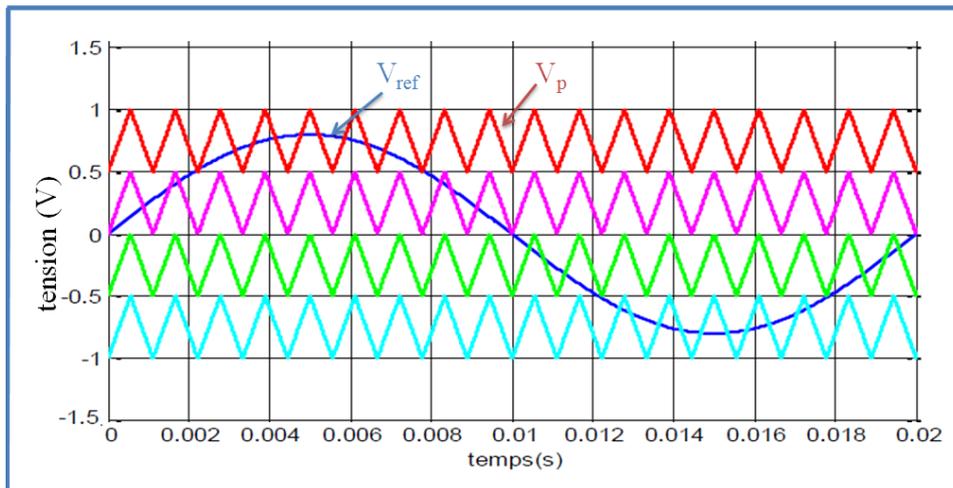


Figure 2.6 : Principe de la MLI sinusoidale à triangle multiple

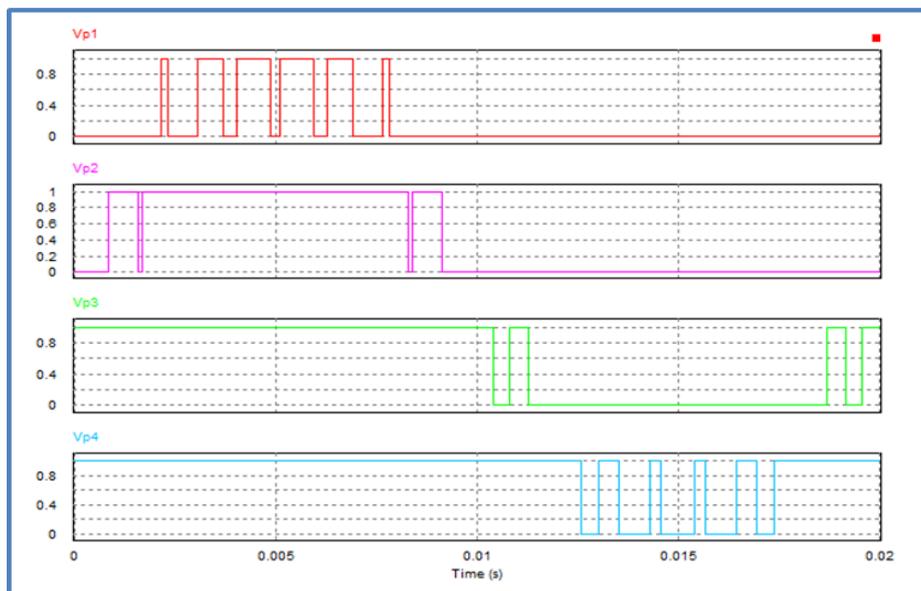


Figure 2.7 : Commande MLI pour un onduleur à cinq niveaux

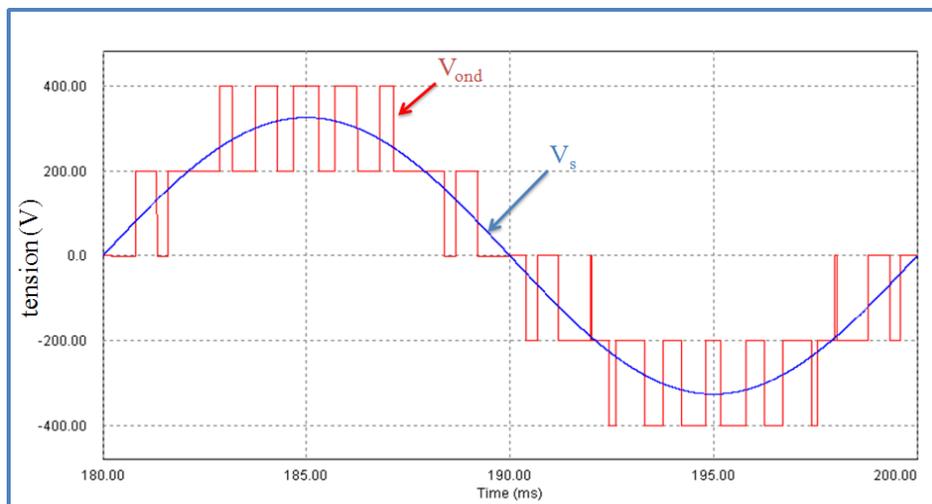


Figure 2.8 : Tension de sortie de l'onduleur à cinq niveaux avant et après filtrage

Comme l'illustre les figure 2.6 et 2.7, la commande est basée sur une comparaison entre le signal référence et les porteuses triangulaires. Ces dernières sont toutes en phases et équitablement réparties au long de la tension DC. A chaque porteuse est associée une cellule de commutation, dont l'état est défini par l'intersection entre la référence et cette porteuse ('haut' si la référence est au-dessus de la porteuse, 'bas' si elle est au-dessous).

La surface occupée par la tension V_{ond} (figure 2.8), donne une idée de l'importance des composantes à haute fréquence (HF) de son spectre suivant le nombre de niveaux. Pour obtenir la même qualité de l'onde en sortie, le besoin de filtrage est donc réduit par l'augmentation du nombre de niveaux.

2.4.2.2. La modulation vectorielle (SVM) :

La stratégie de la modulation vectorielle consiste à générer une séquence spécifiée des états de l'onduleur. Elle est utilisée par les commandes modernes des machines à courant alternatif, Le principe de la modélisation vectorielle (SVM) consiste à reconstruire le vecteur tension V_{ref} à partir des vecteurs tensions v_i . Chacun de ces vecteurs correspond à une combinaison de l'état des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasé, [24].

La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones contrairement à d'autres méthodes.

Elle consiste à considérer globalement le système triphasé, et à lui appliquer une transformée de Concordia pour se ramener dans le plan (V_α, V_β) . Le système triphasé des tensions à générer pour la durée d'échantillonnage en cours peut alors être représenté comme un unique vecteur dans ce plan. Ce vecteur n'est pas directement réalisable, mais on peut chercher les trois configurations les plus proches (situées sur les sommets et au centre de l'hexagone), et les appliquer successivement pendant une fraction adéquate de la période d'échantillonnage, de façon à obtenir en valeur moyenne le vecteur recherché.

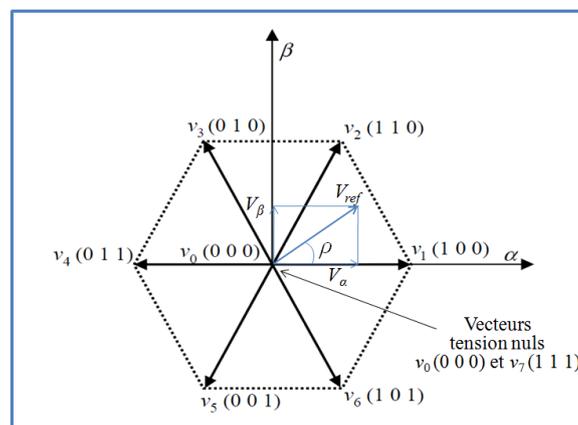


Figure 2.9 : Approximation du vecteur de référence par les tensions d'alimentation

La meilleure manière de synthétiser le vecteur de référence de tension [25] est d'employer les trois vecteurs les plus proches (V_1 , V_2 et V_0) affectés des temps (T_A , T_B et $T_{0/2}$) :

$$V_{ref} = T_A \cdot V_1 + T_B \cdot V_2 + T_{0/2} \cdot V_0 \tag{2.4}$$

Avec la contrainte additionnelle suivante sur les temps de conduction :

$$T_A + T_B + T_{0/2} = 1 \tag{2.5}$$

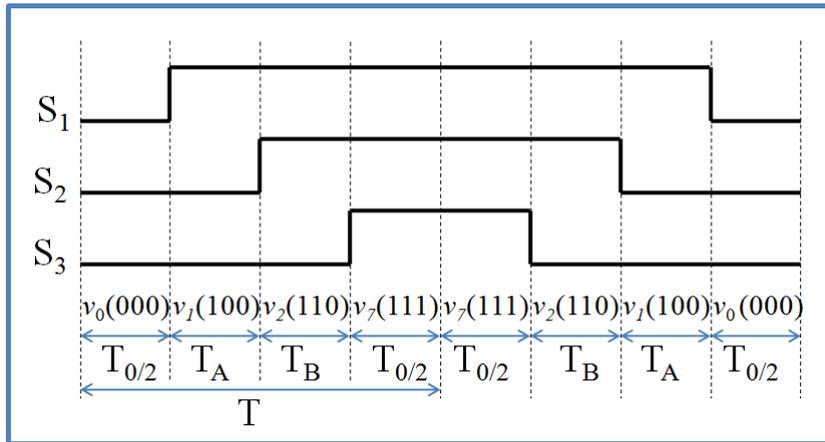


Figure 2.10 : Principe de la génération de la MLI vectorielle à partir des vecteurs d'états.

La modulation vectorielle traite donc, les signaux triphasés comme un tout. L'onduleur triphasé à cinq niveaux de tension ayant trois bras et cinq configurations possède $5^3 = 125$ modes de commutations possibles. Il peut générer 125 vecteurs différents de tension de sortie. La représentation sur le plan (α , β) de ces vecteurs est donnée par la figure 2.11, [25].

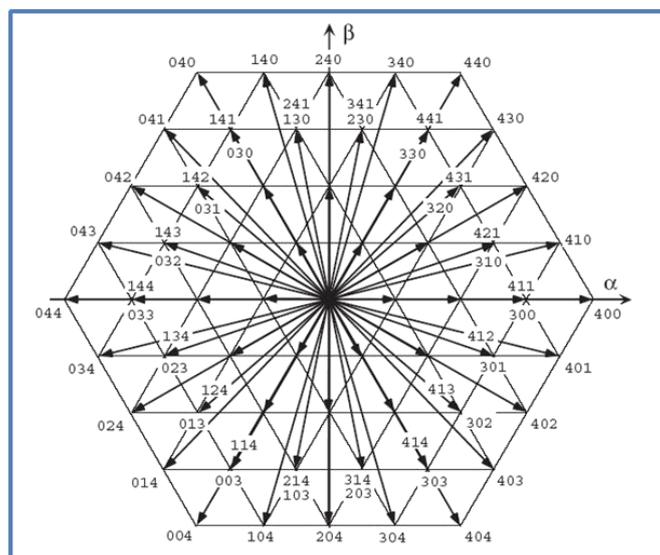


Figure 2.11 : Configuration correspondant aux vecteurs de sortie pour un onduleur à 5 niveaux.

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence des charges non linéaires et leurs perturbations harmoniques sur certain appareillage. Ensuite, nous avons présenté les différentes solutions pour éliminer ces harmoniques par le filtrage passif et le filtrage actif.

Nous avons aussi exposé les différentes stratégies de commande des onduleurs de tension, telle que la modulation en pleine onde, la modulation vectorielle et la modulation sinus-triangle. Cette dernière est la plus adaptée aux onduleurs multi-niveaux.

Chapitre 3

Conception d'un onduleur cascade à cinq niveaux

3.1. Introduction

Après avoir étudié les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux, nous avons déduit que la topologie cascade est la plus adaptée à une installation PV. Dans ce chapitre nous allons concevoir un onduleur cascade à cinq niveaux commandé par un microcontrôleur Arduino en utilisant la technique de modulation sinus-triangle.

3.2. Modélisation de l'onduleur cascade à cinq niveaux

3.2.1. Structure de l'onduleur à cinq niveaux

L'idée de base de l'onduleur cascade à cinq niveaux est de mettre en série deux onduleurs monophasés en ponts à 3 niveaux (pont en H), alimenté chacun par une source de tension continue distincte. Sur la figure 3.1 nous donnons la structure d'un onduleur cascade à cinq niveaux.

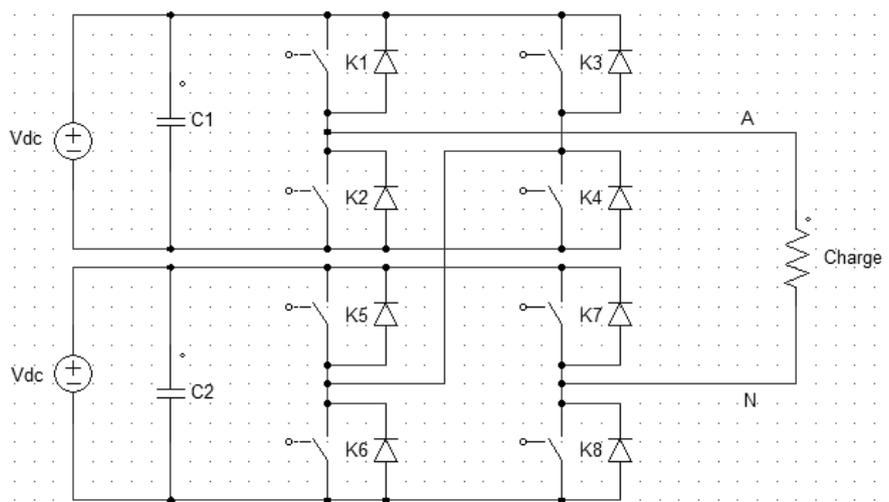


Figure 3.1 : Structure de l'onduleur cascade à cinq niveaux

Ce montage constitué de deux sources de tension continues délivrant chacune une tension V_{dc} , et deux condensateurs de filtrage $C1$ et $C2$ de même capacité. Ces derniers sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge.

L'onduleur monophasé à cinq niveaux utilisé est constitué aussi de huit interrupteurs, Chaque interrupteur est composé d'un transistor et une diode montée en tête bêche, [26].

Chaque couple d'interrupteurs ($K1, K2$), ($K3, K4$), ($K5, K6$) et ($K7, K8$) forme une cellule de commutation, ces deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire.

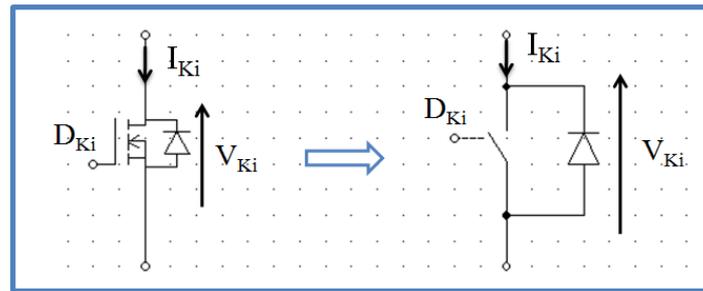


Figure 3.2 : Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent de la commande externe D_{Ki} (l'ordre d'amorçage ou de blocage du semi-conducteur bidirectionnel).

3.2.2. Principe de fonctionnement

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{AN} entre la borne (A) de la charge et le point neutre (N). Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des huit interrupteurs $K1, K2, \dots, K8$.

Sur les $2^8 = 256$ configurations possibles, seules cinq configurations sont mises en œuvre. Toutes les autres séquences ne sont pas fonctionnelles et sont donc à éviter. En effet, elles provoquent soit des courts-circuits des sources de tension continue, soit elles provoquent la déconnexion de la charge.

Le tableau 3.1 représente la tension de sortie V_{AN} d'un onduleur cascade à cinq niveaux en fonction de l'état des interrupteurs.

| K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | K6 | K7 | K8 | V_{AN} |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | $2V_{dc}$ |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | V_{dc} |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | $-V_{dc}$ |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | $-2V_{dc}$ |

Tableau 3.1 : Grandeur connue pour chacune des configurations de l'onduleur cascade à cinq niveaux

Pour visualiser l'enchaînement des configurations décrites ci-dessus, la figure 3.3 représente les signaux de commande de chaque interrupteur, ainsi que la forme d'onde de la tension de sortie V_{AN} .

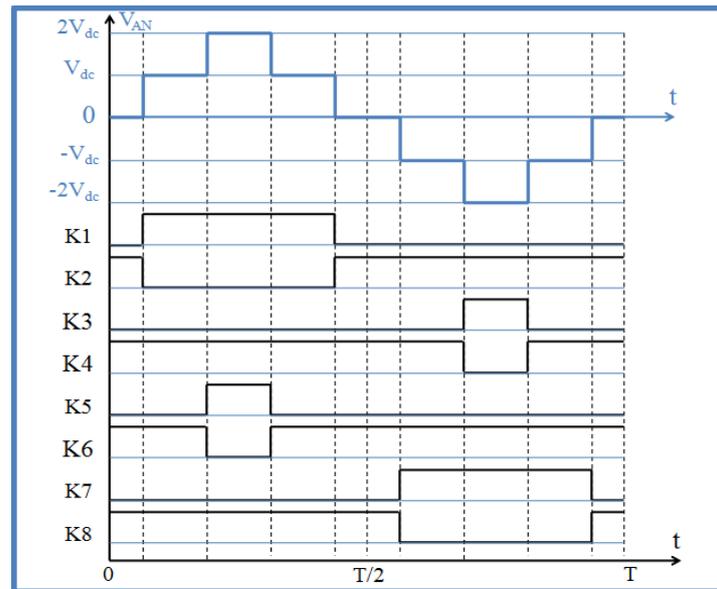


Figure 3.3 : Les états des interrupteurs et la forme de tension de sortie

3.2.3. Choix des composants de puissance

Tout d'abord, le choix du composant actif impacte les pertes générées (perte en conduction et en commutation), l'efficacité de conversion et le coût.

Parmi les composants de puissance à semi-conducteurs [27] on trouve : les transistors bipolaires, les transistors à effet de champ (JFET et MOSFET), les thyristors, les GTO, les triacs et les IGBT...

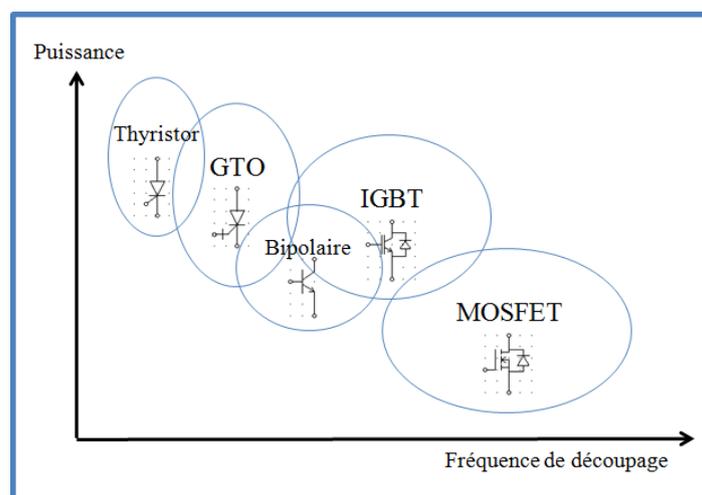


Figure 3.4 : Classification des composants de puissance en fonction de la fréquence de découpage

L'onduleur multi niveaux que nous avons utilisé, comporte des composants de puissances de type MOSFET. En effet, la surface occupée par la tension V_{AN} (figure 3.3), donne une idée de l'importance des composants à haute fréquence (HF). D'après la figure 3.4 nous avons le choix entre les IGBT et les MOSFET (voir Annexe B).

La différence entre MOSFET et IGBT est dans les taux de pertes. En effet, les MOSFET sont plus rapides que les IGBT, donc moins de pertes aux fréquences élevées pour des applications à basse tension.

Finalement, l'utilisation de MOSFET, est un bon compromis entre le coût et le rendement, permettant d'augmenter le rendement de la conversion de sortie.

3.3. Commande des interrupteurs

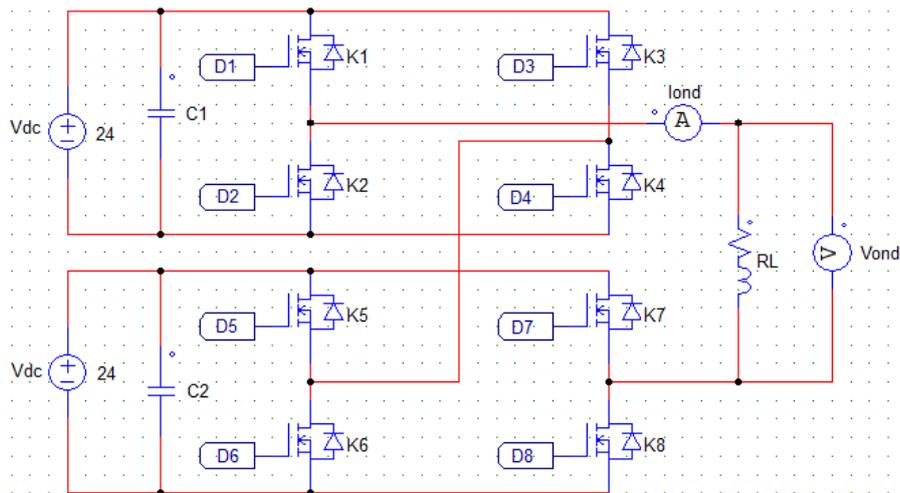


Figure 3.5 : Schéma de puissance de l'onduleur cascade à cinq niveaux

L'onduleur cascade monophasé à cinq niveaux est donné sur la figure 3.5, il est constitué de huit interrupteurs (MOSFET) et deux source de tension de 24 V (assimilable à deux batteries photovoltaïques de 24 V). La charge est linéaire de type inductif ($L = 10 \text{ mH}$ et $r = 10 \Omega$) (assimilable à un moteur à courant alternatif), afin de visualiser la tension et le courant aux bornes de la charge.

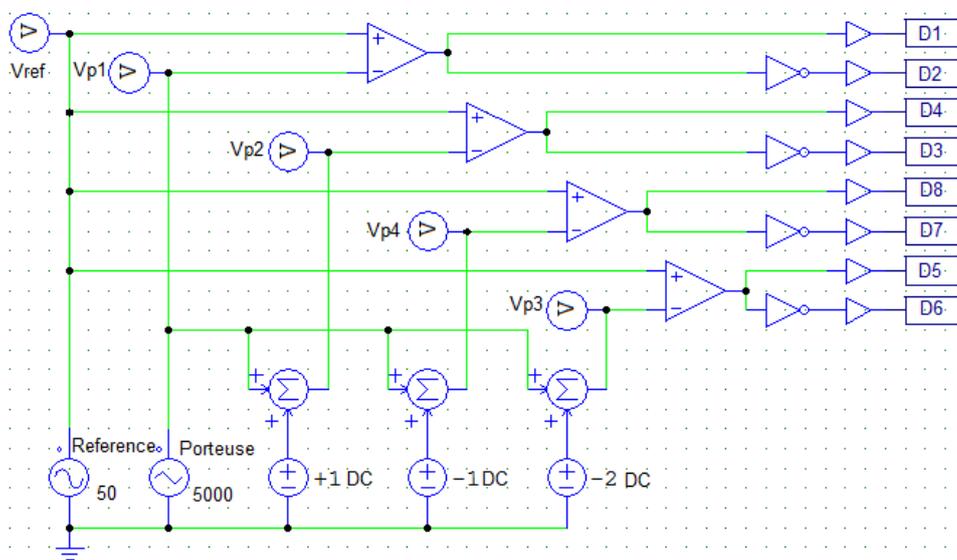


Figure 3.6 : Schéma de commande

Le circuit de commande de la figure 3.6 comprend un générateur sinusoïdal fournissant le signal référence 'Vref' de fréquence 50 Hz et d'amplitude 1.95 V, et quatre générateurs triangulaires fournissant des signaux porteuses de fréquence 5000 Hz et d'amplitude 1V, avec DC offset pour Vp1 : 0V, Vp2 : +1V, Vp3 : -1V et Vp4 : -2V. Ainsi que des comparateurs qui génèrent les signaux de commande.

La figure 3.7 illustre les signaux de commandes des interrupteurs de puissance :

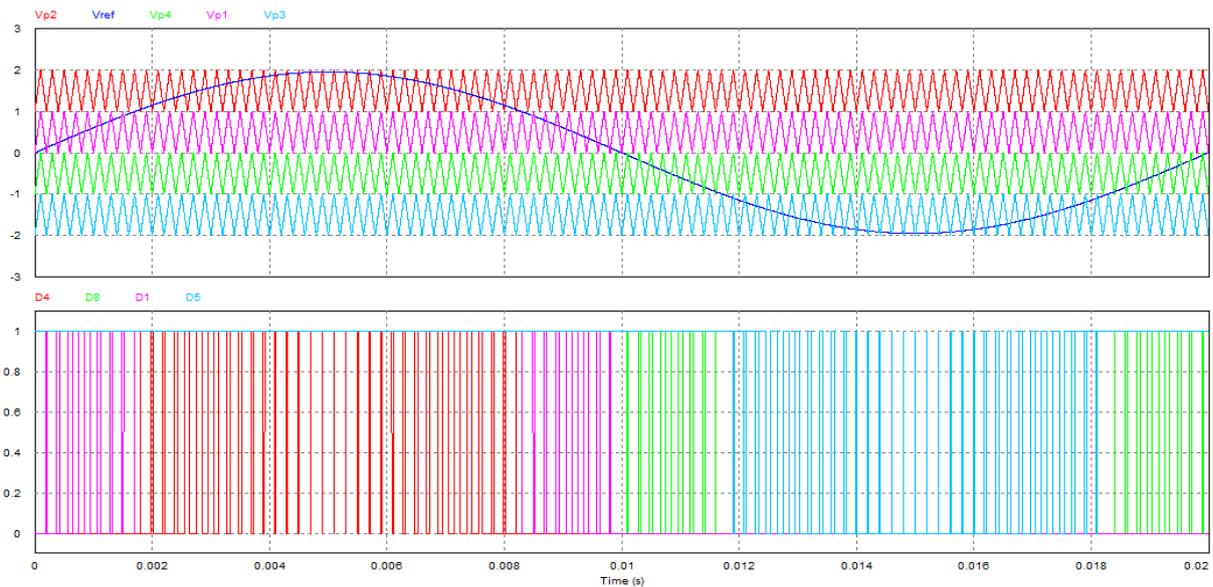


Figure 3.7 : Les signaux de commande

Les signaux 'Vref' et 'Vpi' sont comparés, et le résultat de la comparaison est utilisé pour commander en fermeture ou en ouverture les interrupteurs du circuit de puissance.

La figure 3.8 illustre la tension et le courant aux bornes de la charge :

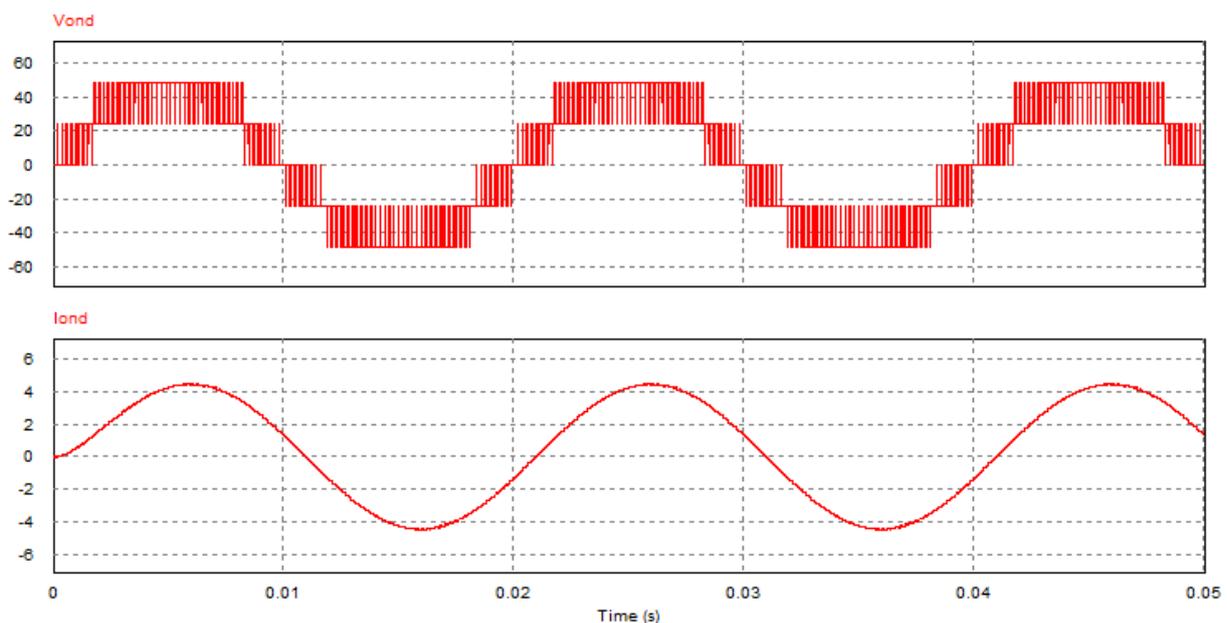


Figure 3.8 : Allures de la tension et du courant aux bornes de la charge

La tension de sortie est la superposition des deux sources d'entrées. Elle est découpée à la fréquence de la porteuse, comporte cinq niveaux +48, +24, 0, -24 et -48 V.

Le courant est quasi-sinusoïdal, comporte des ondulations à la fréquence de la porteuse 5 kHz.

Les spectres de fréquences de la tension et du courant sont présentés sur la figure suivante :

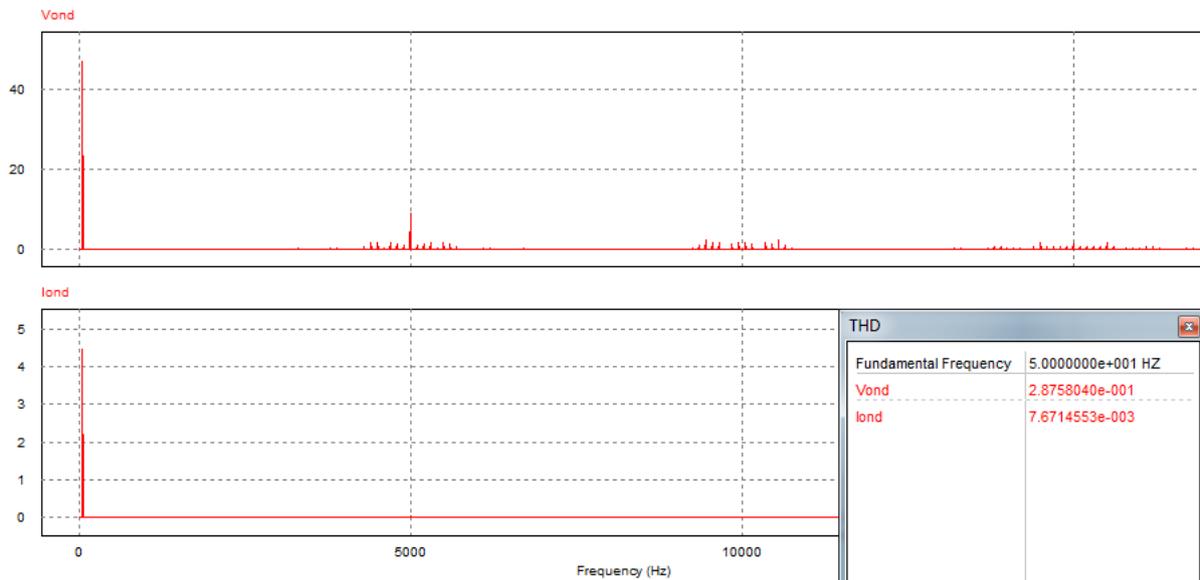


Figure 3.9 : Spectre de fréquence de la tension et du courant de la charge

Le spectre de fréquence de la tension comprend un pic fondamental correspondant à la fréquence de référence (50 Hz), et des harmoniques de fréquence multiple entier de la fréquence de la porteuse (5 kHz), avec un taux de distorsion harmonique élevé : $THD_v = 28.75 \%$.

Le spectre de fréquence du courant comprend aussi un pic fondamental de fréquence 50 Hz et des harmoniques très faibles proche de celle de la porteuse, avec un taux de distorsion harmonique : $THD_i = 0.76 \%$.

Nous appliquons le filtrage, et on visualise la tension et le courant aux bornes de la charge :

3.3.1. Cas d'une charge linéaire

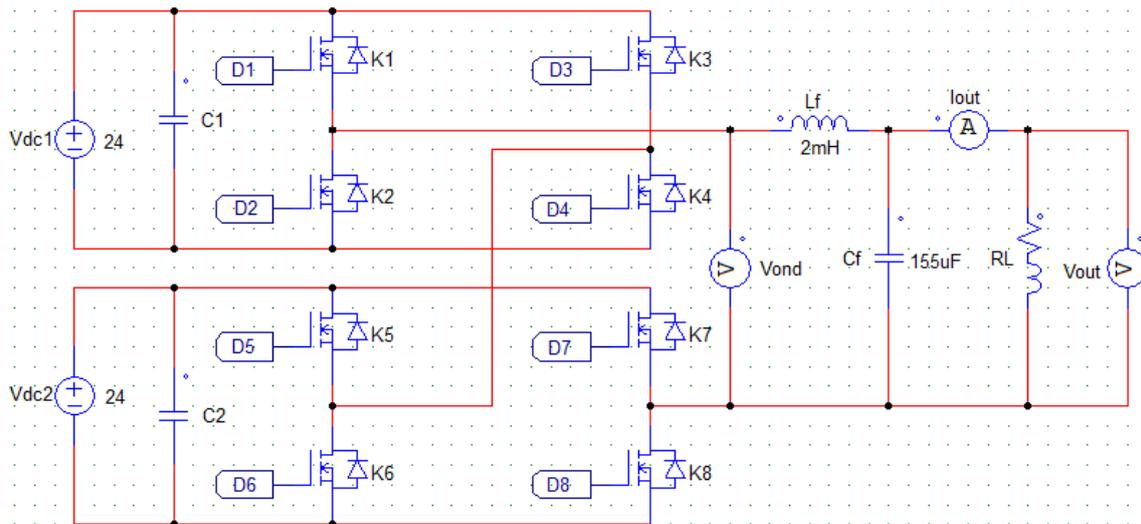


Figure 3.10 : Onduleur cascade avec un filtre passe-bas LC de deuxième ordre et une charge linéaire

La fonction de transfert du filtre passe-bas LC de deuxième ordre est :

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + \left(j\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (3.1)$$

La fréquence de coupure du filtre : $f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_f \cdot C_f}}$

Pour $f_c = 100$ Hz, On prend $L_f = 2$ mH on trouve $C_f = 1.26$ mF ; avec l'influence de la charge on prend $C_f = 0.155$ mF.

La figure suivante illustre le résultat de filtrage :

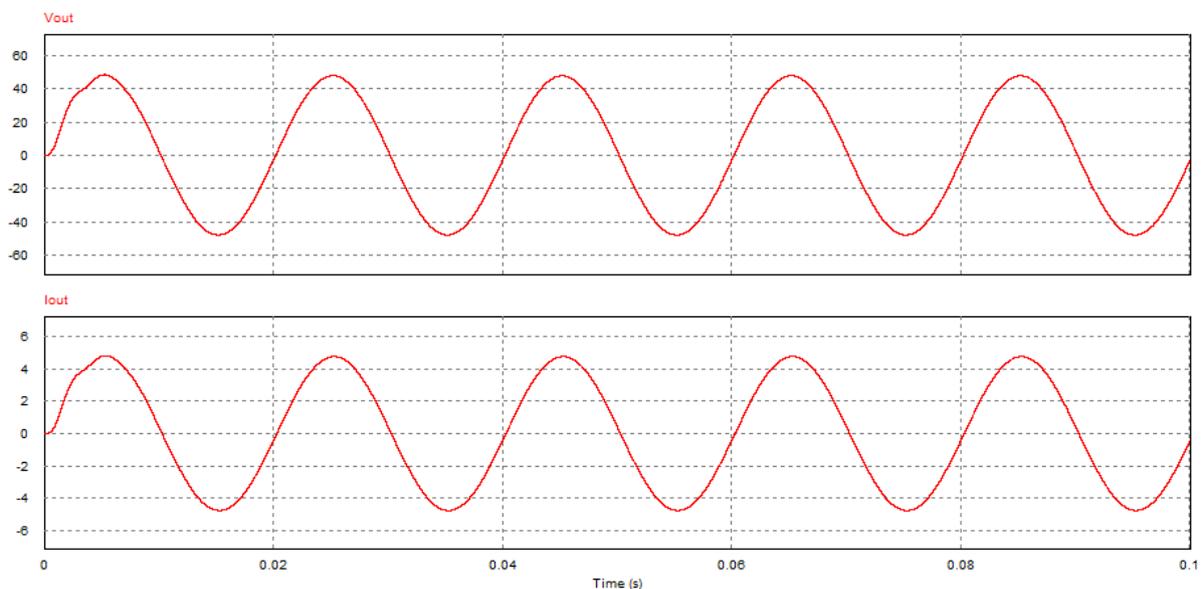


Figure 3.11 : Allures de la tension et du courant de la charge après filtrage

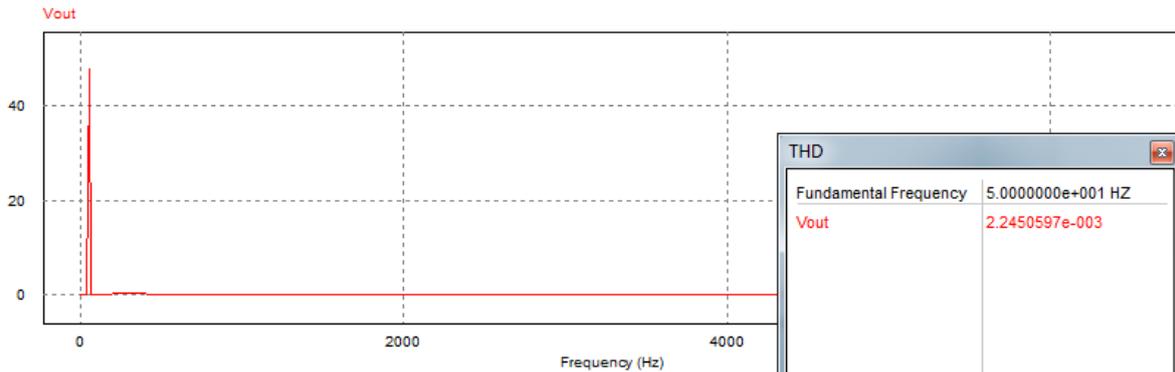


Figure 3.12 : Spectre de fréquence de la tension de la charge après filtrage

On remarque que le filtre passe-bas LC de deuxième ordre à éliminer toutes les harmoniques de fréquence supérieure au fondamental (50 Hz).

Le taux de distorsion harmonique : $THD_v = 0.22 \%$.

3.3.2. Cas d'une charge non-linéaire

On va modéliser la charge non-linéaire par deux diodes zener en parallèle avec une charge inductive.

La figure suivante présente l'onduleur avec une charge non-linéaire :

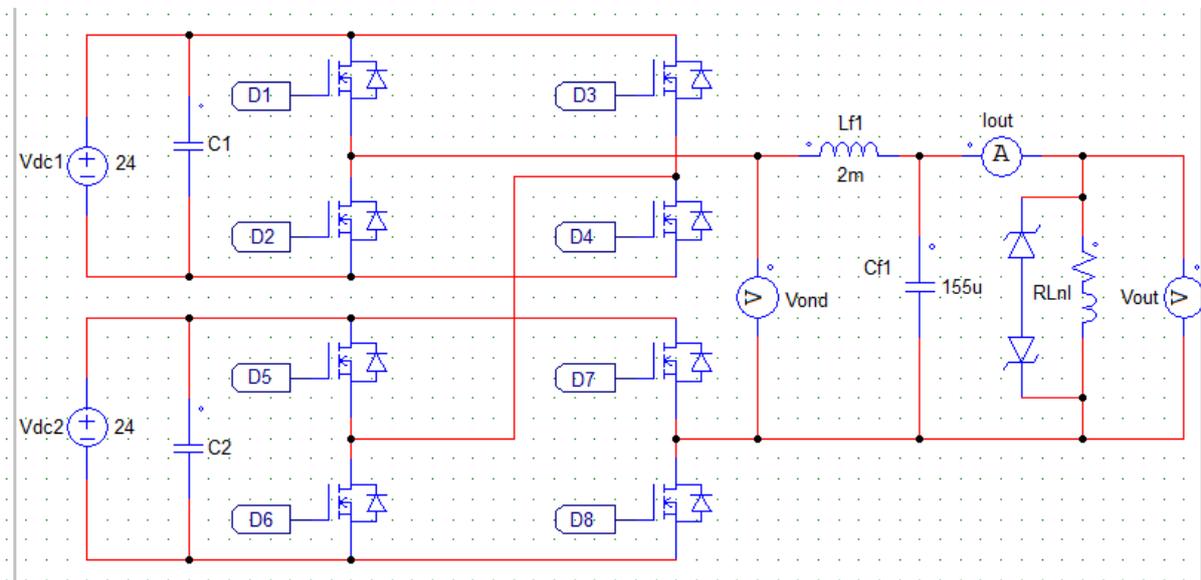


Figure 3.13 : Onduleur cascade avec un filtre passe-bas LC de deuxième ordre et une charge non-linéaire

Sur les figures 3.14 et 3.15 nous donnons les résultats de simulation :

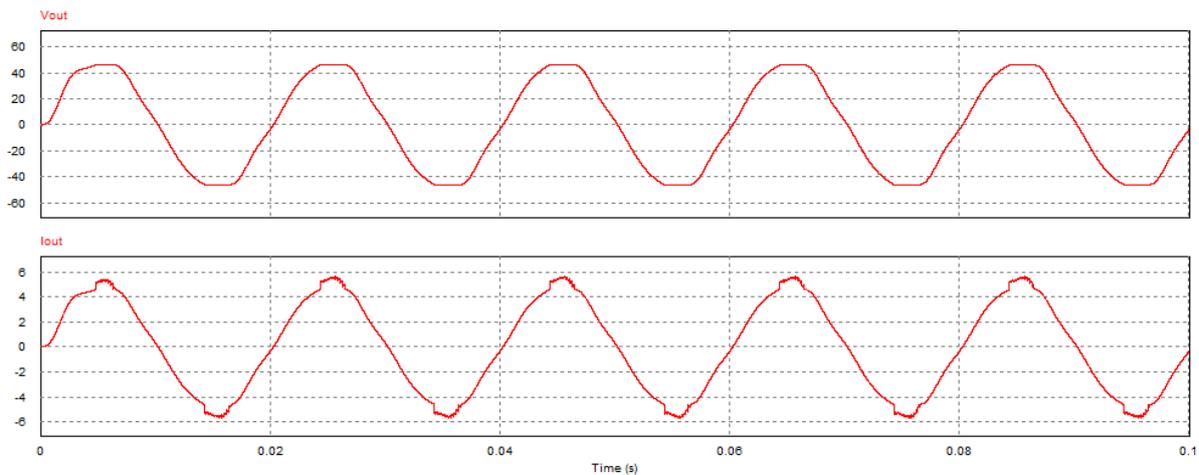


Figure 3.14 : Allures de la tension et du courant de la charge non-linéaire après filtrage

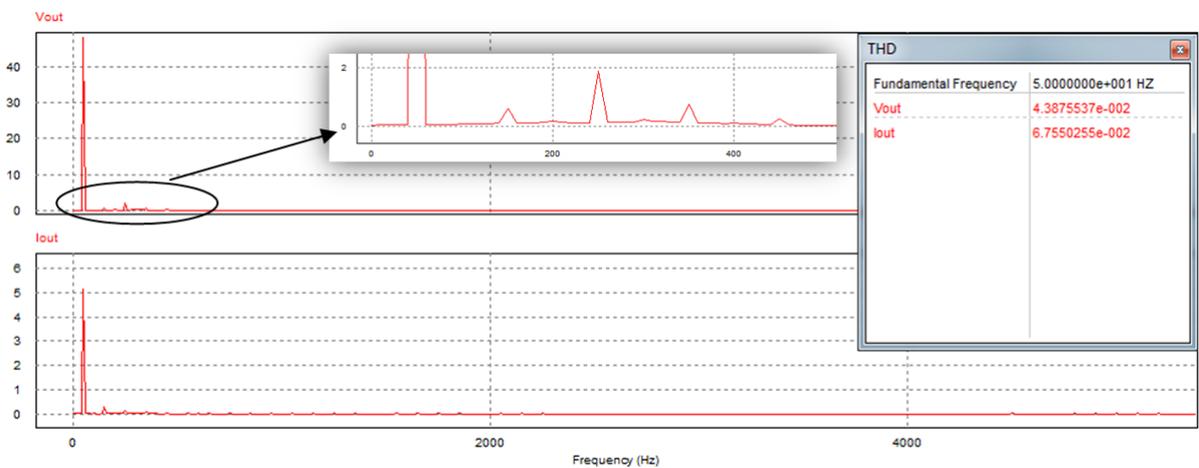


Figure 3.15 : Spectres de fréquences de la tension et du courant de la charge non-linéaire

On remarque que la charge non-linéaire génère des harmoniques de fréquences multiples entiers impairs de celle du fondamental 50 Hz (150 Hz, 250 Hz...). Donc le THD augmente, pour la tension de 4.38 %, et le courant de 6.75 %.

Pour résoudre ce problème on va augmenter l'ordre du filtre. En effet, plus on augmente l'ordre du filtre, plus les harmoniques proches du fondamental sont éliminés.

Nous mettons deux filtres passe-bas LC de deuxième ordre en cascade (figure 3.16).

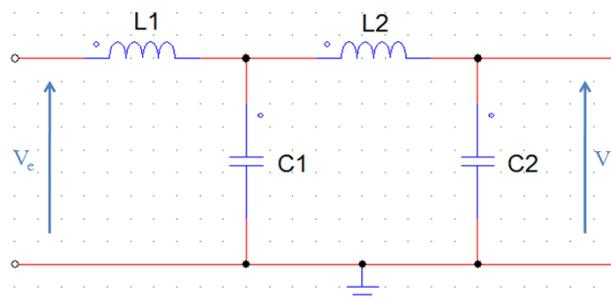


Figure 3.16 : Filtre passe-bas LC d'ordre 4

La fonction de transfert devient :

$$H(j\omega) = \frac{V_s}{V_e} = H_1(j\omega) \times H_2(j\omega) = \frac{1}{\left(1 + \left(j\frac{f}{f_{c1}}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(j\frac{f}{f_{c2}}\right)^2\right)} \quad (3.2)$$

Avec : $f_{c1} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} = \frac{\omega_{c1}}{2\pi}$ et $f_{c2} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_2}} = \frac{\omega_{c2}}{2\pi}$

Alors, la fonction de transfert s'écrit : $H(j\omega) = \frac{1}{1 + 2m\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^4}$ (3.3)

Avec : $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{\omega_{c1} \cdot \omega_{c2}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_1 L_2 \cdot C_1 C_2}}$ et $m = \frac{\omega_{c1}^2 + \omega_{c2}^2}{2}$

Où f_c est la fréquence de coupure du filtre, ω_c la pulsation de coupure, et m le coefficient d'amortissement.

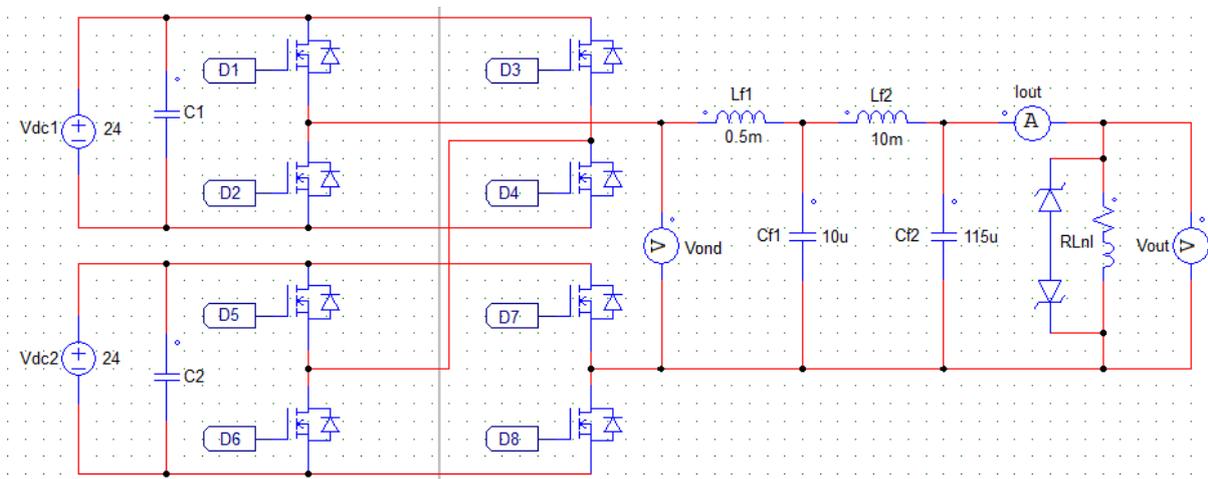


Figure 3.17 : Onduleur cascade avec un filtre passe-bas LC d'ordre 4 et une charge non-linéaire

La simulation nous donne les résultats suivants :

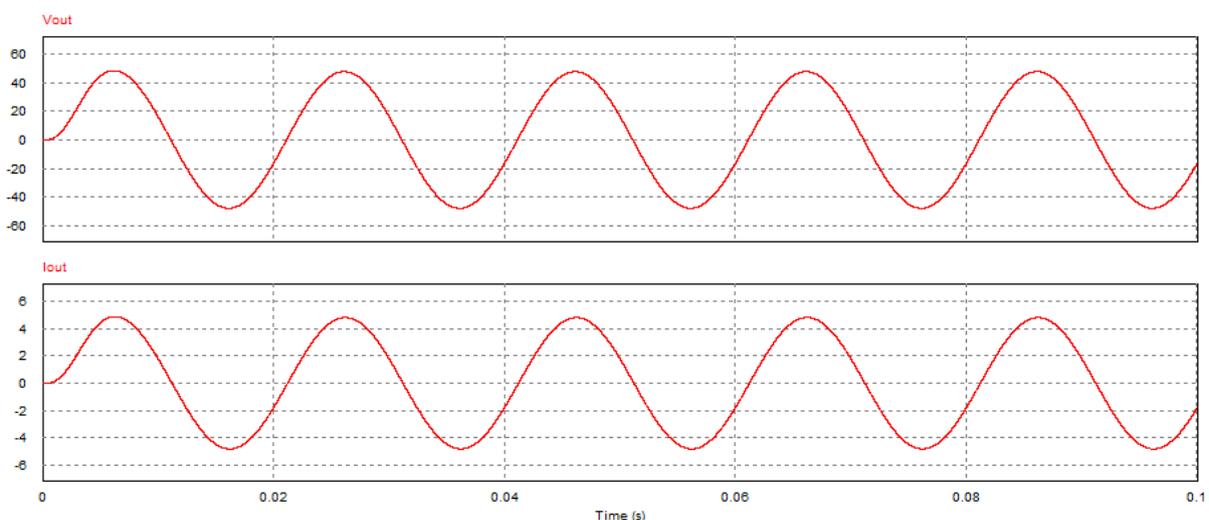


Figure 3.18 : Allures de la tension et du courant de la charge non-linéaire après le filtrage passe-bas d'ordre 4

D'après la figure 3.18, on remarque que la tension et le courant de sortie sont parfaitement sinusoïdaux.

Les spectres de fréquences de la tension et du courant de la charge sont présentés sur la figure suivante :

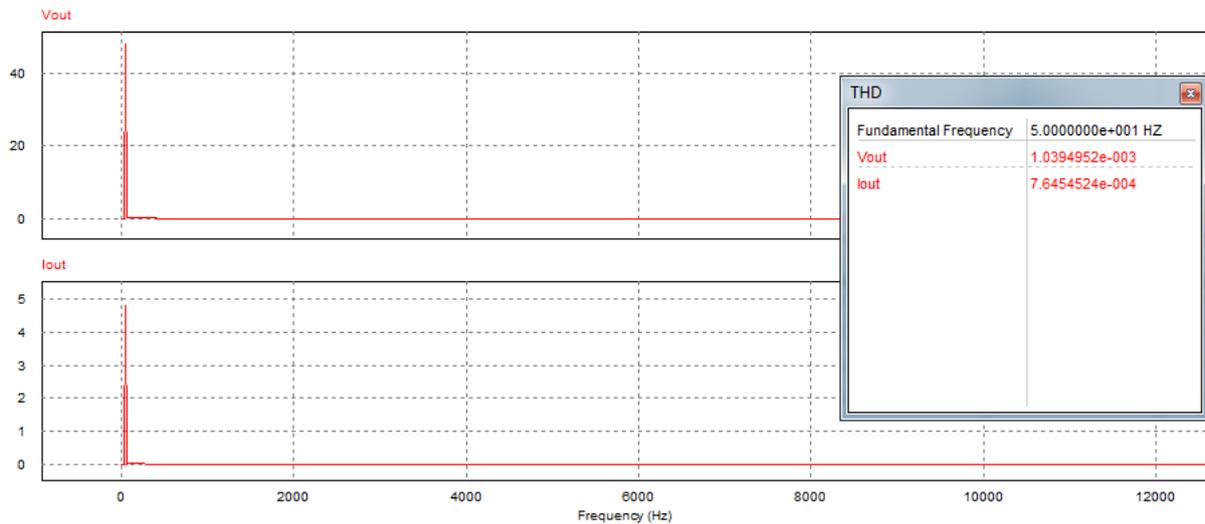


Figure 3.19 : Spectres de fréquences de la tension et du courant de la charge non-linéaire

On remarque que le filtre passe-bas LC d'ordre 4 à éliminer toutes les harmoniques de fréquence proche à celle du fondamental (50 Hz).

Le taux de distorsion harmonique de tension : $\text{THD}_v = 0.104 \%$.

Le taux de distorsion harmonique de courant : $\text{THD}_i = 0.076 \%$.

La figure suivante modélise l'onduleur cascade monophasé à cinq niveaux avec un filtre passe-bas et un transformateur :

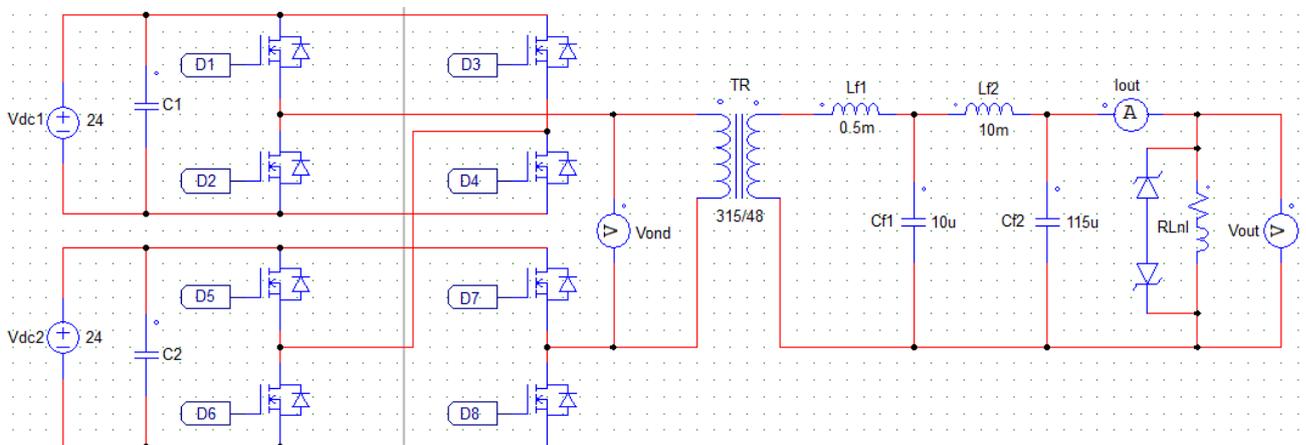


Figure 3.20 : Modélisation de l'onduleur cascade monophasé à cinq niveaux avec un filtre passe-bas et un transformateur

La tension et le courant aux bornes de la charge sont présentés comme suit :

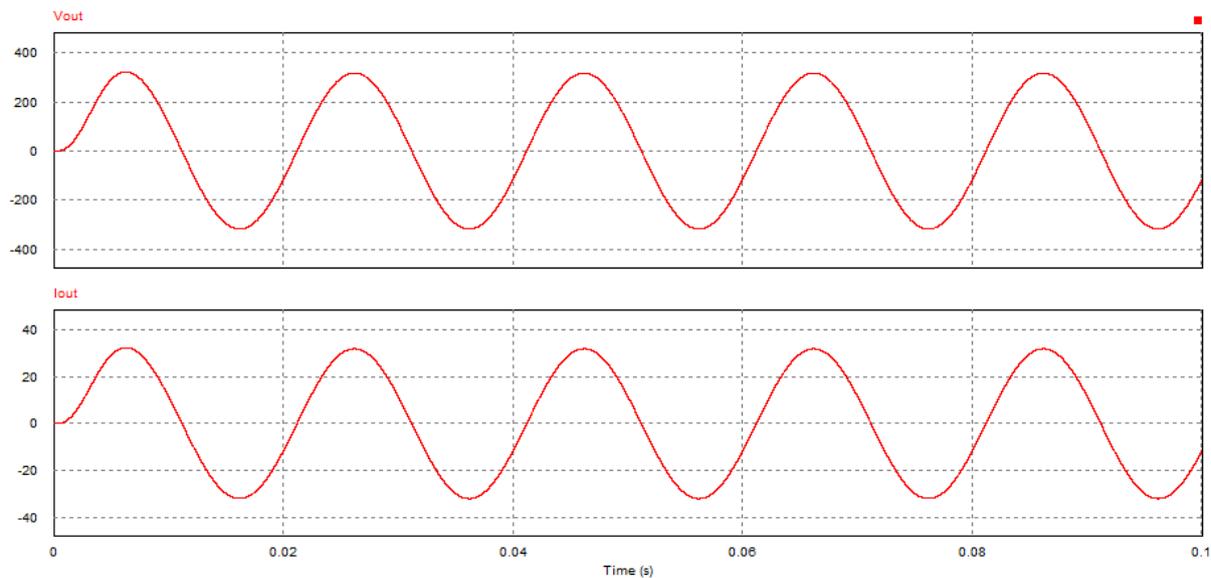


Figure 3.21 : Allures de la tension et du courant de sortie

L'amplitude de la tension de sortie est $V_{out, \max} = 318 \text{ V}$,

Donc la valeur efficace de la tension est $V_{out, \text{eff}} = 224.85 \text{ V}$.

3.4. Conception de l'onduleur cascade à cinq niveau

Cette partie est consacré à la conception de l'onduleur cascade à cinq niveaux commandé par un microcontrôleur Arduino. La figure suivante représente la méthodologie suivie pour la réalisation de la carte de commande.

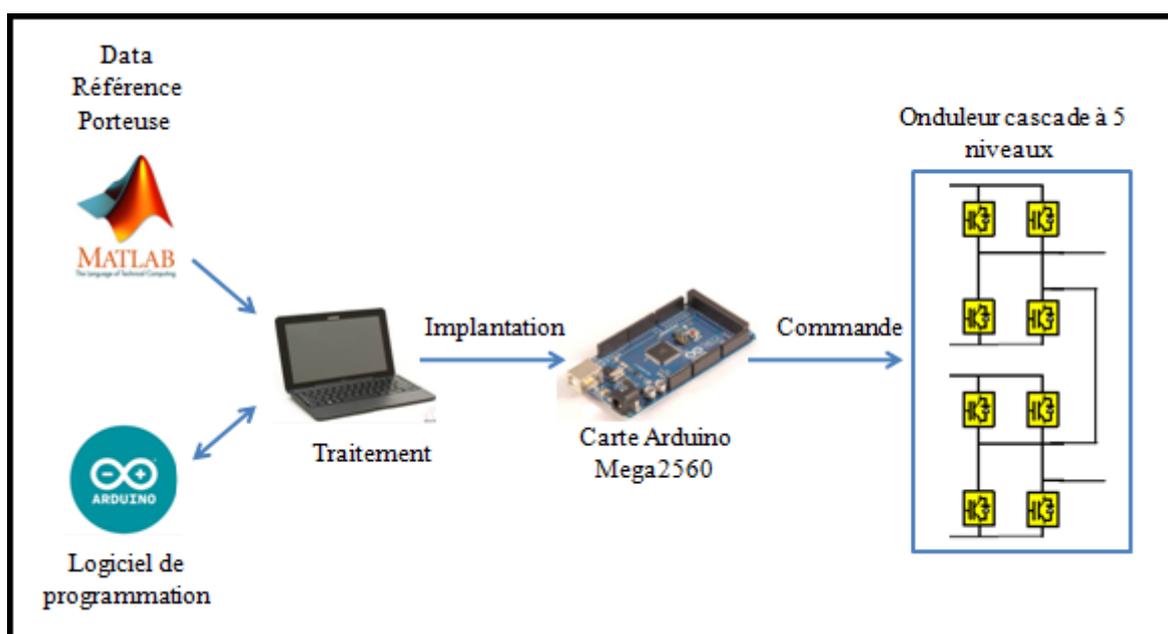


Figure 3.22 : Cheminement de la programmation et de l'implantation de la commande

Dans un premier temps, nous avons procédé par une programmation en langage C par le logiciel Arduino utilisant les données du signal référence et de la porteuse à l'aide du logiciel Matlab. En effet, ce dernier fait l'échantillonnage des deux signaux et les données ainsi extraites sont stockées dans le programme. Ensuite, le logiciel Arduino fait la comparaison entre les données de référence et de la porteuse pour chaque échantillon pour donner l'état haut et l'état bas de la commande MLI.

La compilation du programme en Arduino permet de générer le fichier ".hex" (codé en hexadécimal). C'est ce fichier qui contient le programme qui sera télé-versé sur le microcontrôleur Arduino, afin de commandé les interrupteurs de l'onduleur.



Figure 3.23 : La carte Arduino utilisée

Dans notre projet nous avons utilisé la carte Arduino Mega2560 (figure 3.23) pour les raisons suivantes :

- Elle offre décidément une capacité de mémoire et un nombre de broches numériques d'entrée/sortie impressionnants, à même de couvrir tous les besoins envisageables pour un développement complexe.
- Un environnement de programmation simple et facile.
- Elle est capable de supporter des programmes complexes qui contiennent les fonctions trigonométriques (cos, sin,...),

Cette carte dispose :

54 broches E/S numériques (dont 14 disposent d'une sortie PWM)

16 broches E/S analogiques (utilisables en broches E/S numériques)

256 Ko de mémoire flash, 8 Ko de SRAM, et 4 Ko d'EEPROM

Vitesse de l'horloge : 16 MHz

Convivialité du microcontrôleur Arduino programmable par USB

Conception en "Open Source" basée sur le très puissant ATMEGA2560

La figure suivante représente le circuit de puissance et de commande sous Proteus ISIS de l'onduleur cascade à cinq niveaux :

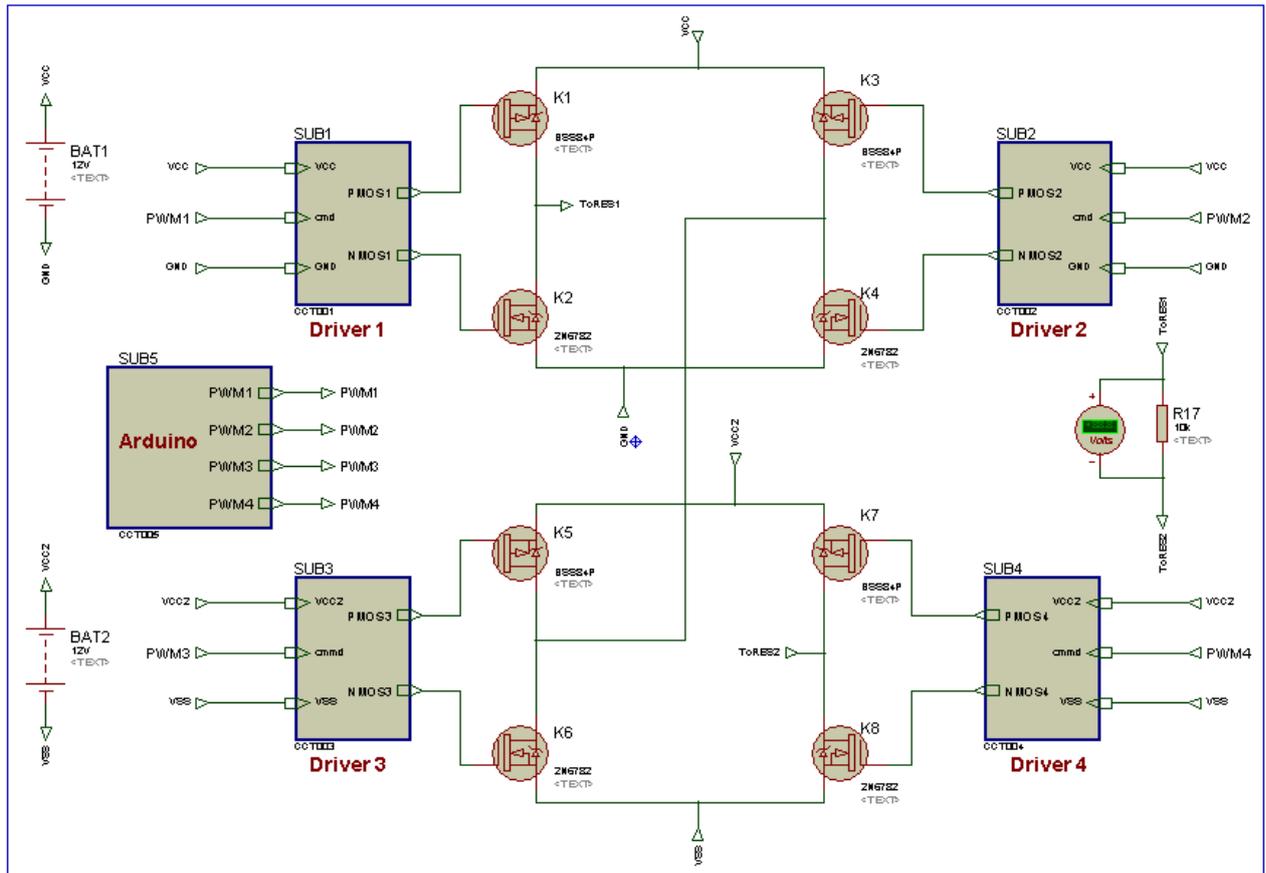


Figure 3.24 : Schéma de puissance et de commande de l'onduleur cascade à cinq niveaux

Chaque bras de l'onduleur comprend deux transistors N-MOSFET et P-MOSFET commandés par le microcontrôleur Arduino à l'aide des drivers. Ces derniers jouent le rôle d'interfaces entre le circuit de commande et le circuit de puissance.

La carte Arduino génère quatre signaux de commande pour les quatre bras de l'onduleur. Chaque driver doté d'un seul bras, permet la commande à la fois les deux transistors.

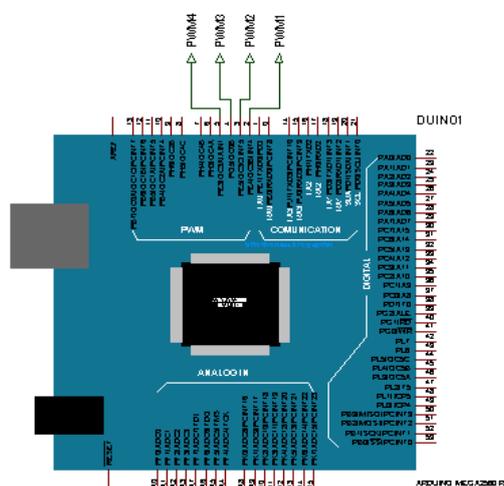


Figure 3.25 : Le bloqué "Arduino"

Le bloque “Driver” comporte le circuit suivant :

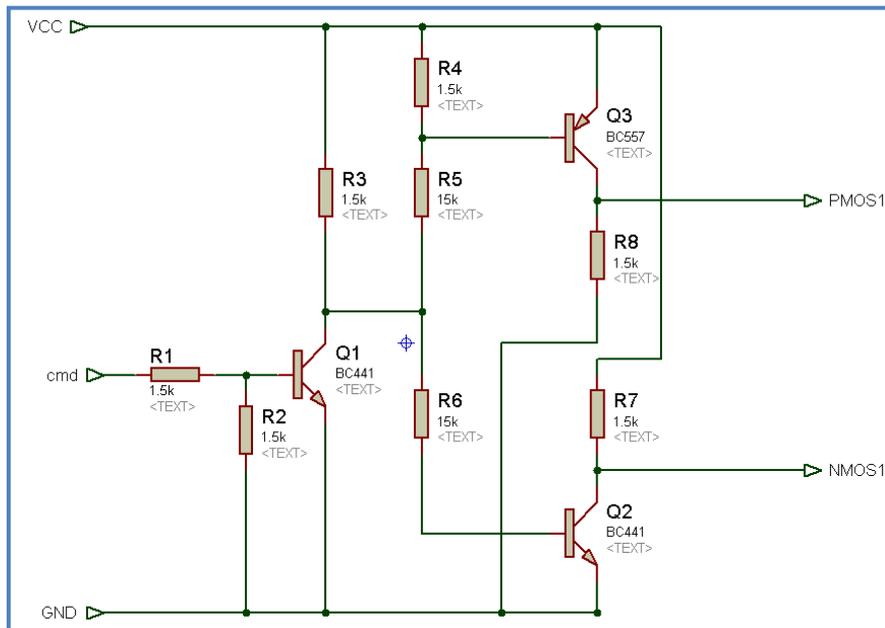


Figure 3.26 : Le circuit de Driver 1

Lorsque ‘cmd’ est à l’état bas (0V) les sorties ‘NMOS1’ et ‘PMOS1’ prennent la valeur de GND (la masse), alors le transistor N-MOSFET est ouvert et le transistor P-MOSFET est fermé. Et lorsqu’il est à l’état haut (5V) les sorties ‘NMOS1’ et ‘PMOS1’ prennent la valeur de VCC (12V), alors le transistor N-MOSFET est fermé et le transistor P-MOSFET est ouvert. La figure suivante donne la simulation sous ISIS des signaux de commande :

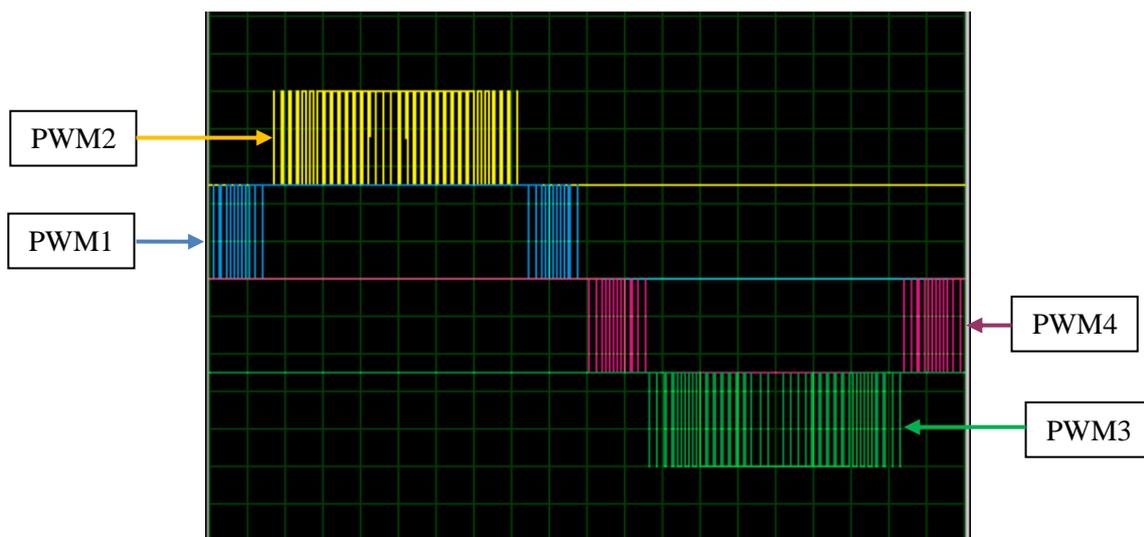


Figure 3.27 : Les signaux de commande

La figure suivante présente la tension de sortie aux bornes de la charge :

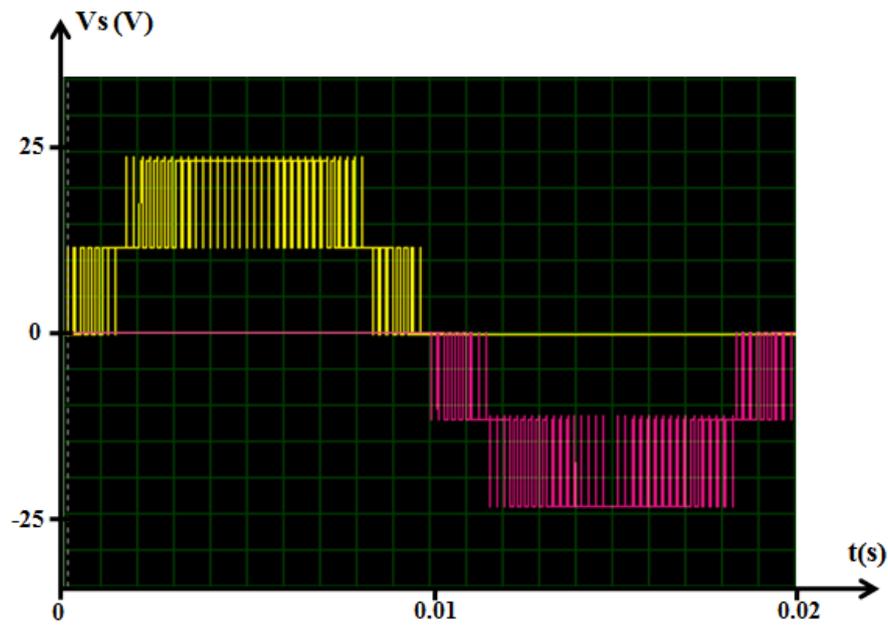


Figure 3.28 : La tension aux bornes de la charge

Le circuit suivant représente la connexion d'un bras de l'onduleur avec son driver :

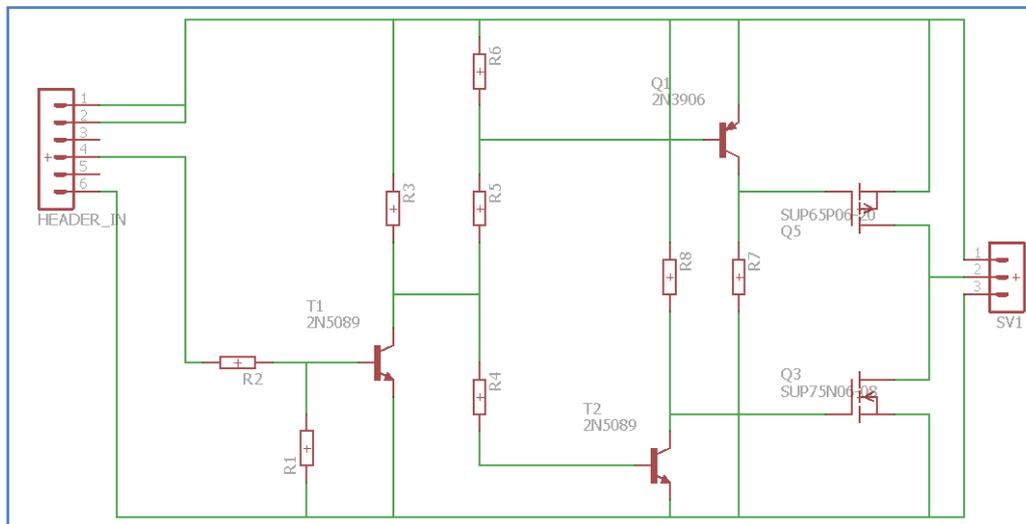


Figure 3.29 : Schéma d'un bras de l'onduleur avec son driver

La figure 3.30 montre l'emplacement et la connexion des composants du circuit de la figure 3.29. Cette carte électronique a été réalisée à l'aide de logiciel Eagle :

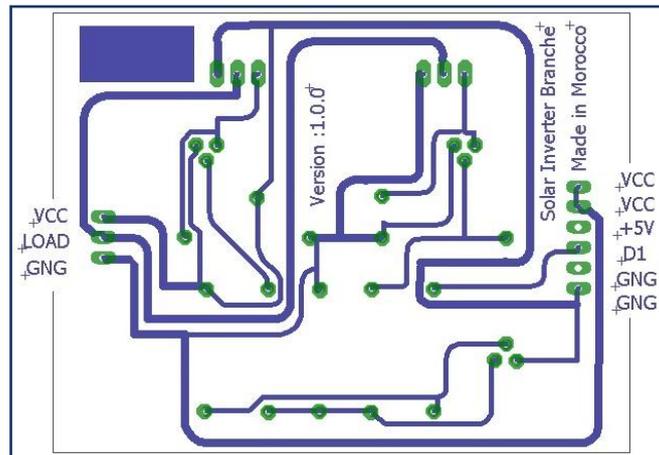


Figure 3.30 : Circuit imprimé d'un bras de l'onduleur

La figure suivante illustre le schéma global de l'onduleur cascade à cinq niveaux :

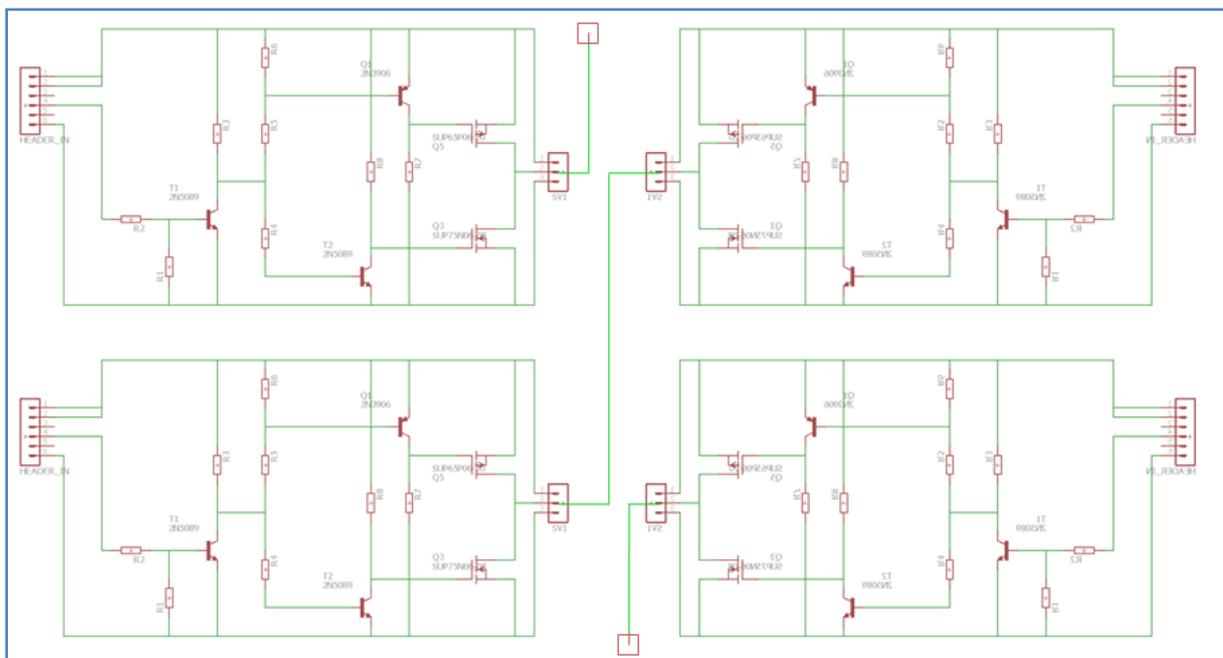


Figure 3.31 : Circuit globale de l'onduleur

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'onduleur cascade à cinq niveaux commandé par la technique MLI sinusoïdal. Les résultats de simulation via PSIM ont montré les performances de ce type d'onduleur. Finalement, un microcontrôleur Arduino nous a servis pour la conception de l'onduleur cascade à cinq niveaux.

Chapitre 4

Technique MPPT et raccordement au réseau

4.1. Introduction

Ce chapitre traite le convertisseur DC-DC (hacheur) survolteur avec commande MPPT, qui permet d'assurer une utilisation optimale de notre onduleur PV. Une solution adaptative de raccordement des systèmes PV aux réseaux électriques sera aussi développée.

4.2. Etage d'adaptation DC-DC du système PV avec fonction MPPT

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Dans les systèmes photovoltaïques les convertisseurs DC-DC permettent de poursuivre le point de fonctionnement optimum.

4.2.1. Les types des convertisseurs DC-DC

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage.

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- Abaisseurs (Buck);
- Elévateurs (Boost);
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost, le Cuk, et le Sepic. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC.

4.2.2. Etage d'adaptation de type BOOST

Le hacheur Boost est aussi appelé hacheur survolteur ou hacheur parallèle (figure 4.1). C'est un convertisseur élévateur de tension comme étage d'adaptation. La figure 4.1 montre que l'adaptation entre la source et la charge est réalisée par la variation du rapport cyclique D .

Dans le cas d'un convertisseur statique de type Boost, on peut exprimer sa tension et son courant de sortie comme suit :

$$V_s = \frac{V_{PV}}{1 - D} \quad \text{et} \quad I_s = (1 - D) \cdot I_{PV} \quad (4.1)$$

Où V_{PV} est la tension d'entrée, V_s la tension de sortie, I_{PV} le courant d'entrée, I_s le courant de sortie et D le rapport cyclique du convertisseur.

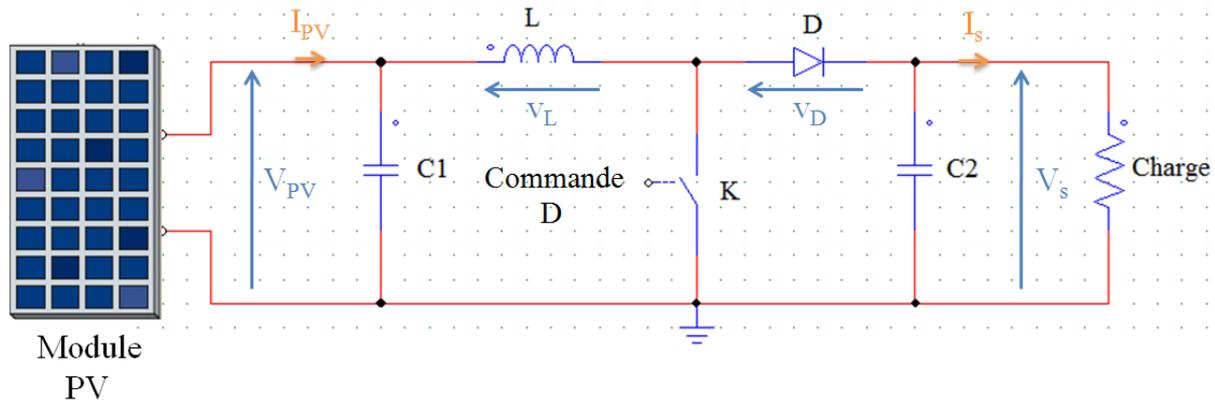


Figure 4.1 : Convertisseur élévateur de tension de type Boost

Pour une tension de sortie fixe de type batterie, l'incrément de D impliquera une diminution de la tension du panneau. Et inversement, pour une décrémentation de D , la tension V_{PV} augmentera. La commande MPPT, en agissant sur le rapport cyclique du convertisseur Boost, permet de contrôler la tension aux bornes du panneau et par conséquent, la puissance délivrée par celui-ci.

On distingue deux phases de fonctionnement, [28] :

- Lorsque l'interrupteur K est fermé, la diode est polarisée en inverse $v_D = -V_s$; la charge est donc isolée de la source. La source fournit de l'énergie à l'inductance L .
- Lorsque l'interrupteur K est ouvert, l'étage de sortie ($C2 + \text{Charge}$) reçoit de l'énergie de la source et de l'inductance L .

En mode de conduction continu, le fonctionnement du circuit peut se diviser en deux selon l'intervalle de commutation (T_{ON} , T_{OFF}). L'intervalle T_{ON} commence quand on ferme l'interrupteur K à $t = 0$. Le courant d'entrée traverse l'inductance L et l'interrupteur.

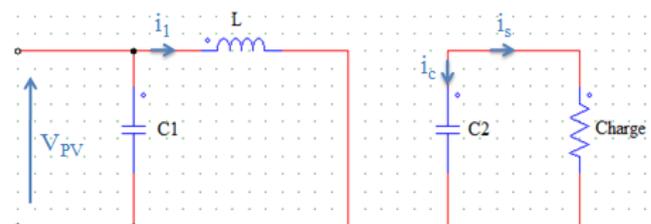


Figure 4.2 : Circuit équivalent pour T_{ON}

L'intervalle T_{OFF} commence quand on ouvre l'interrupteur K à $t = t_1$. Le courant de l'inductance L diminue, car l'énergie accumulée dans l'inductance L est transférée à la charge.

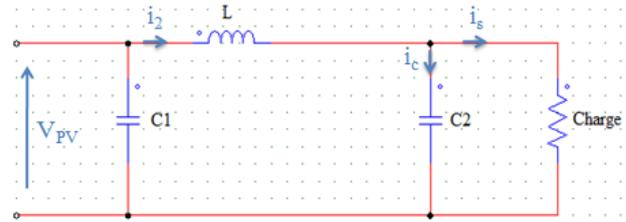


Figure 4.3 : Circuit équivalent pour T_{OFF}

En mode de conduction continue la période de commutation est $T = T_{ON} + T_{OFF}$ et le rapport cyclique est donné par :

$$D = \frac{T_{ON}}{T} \quad (4.2)$$

On peut faire varier la tension de sortie du convertisseur en changeant la valeur du rapport cyclique D .

4.2.3. Algorithme de Poursuite du point de puissance maximale P&O

Cet algorithme est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation du changement résultant sur la puissance de sortie du panneau. Si le ΔP est positif, on applique d'autres perturbations de la tension dans la même direction déplacent le point opérationnel vers le PPM. Si le ΔP est négatif, la direction de la perturbation doit être renversée pour faire retourner vers le PPM. La figure 4.4 donne l'organigramme de cet algorithme.

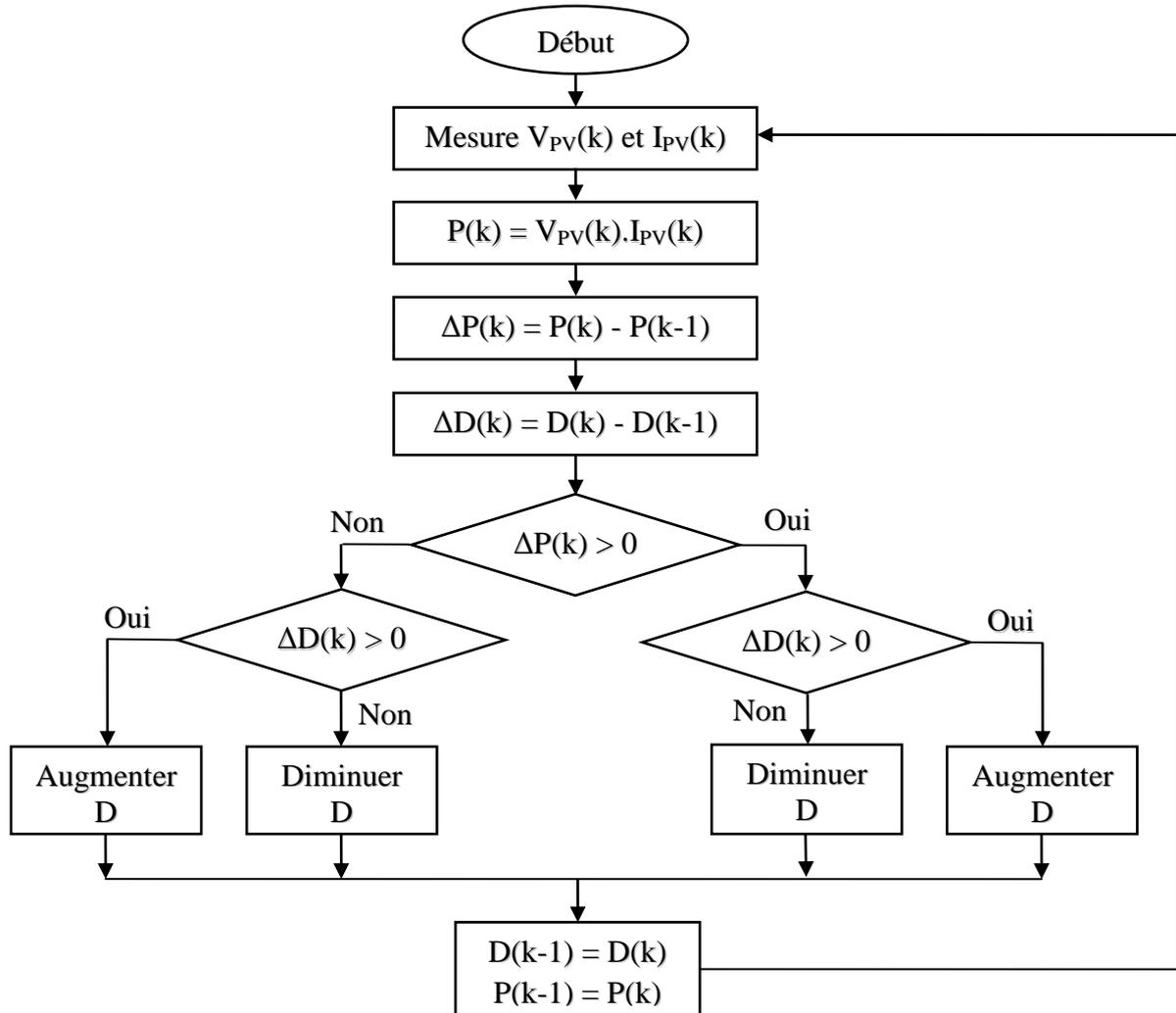


Figure 4.4 : Organigramme de l'algorithme P&O (ΔD est le pas de perturbation)

Pour chercher le point de puissance maximal, nous devons comparer un point de puissance (P_2) mesuré à l'instant (t) avec un point de puissance (P_1) mesuré à l'instant ($t-1$) (figure 4.5).

Si $P_1 < P_2$, la dérivée de puissance est positive ($\Delta P > 0$), cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximal.

Si la dérivée de puissance est négative ($\Delta P < 0$), cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximal.

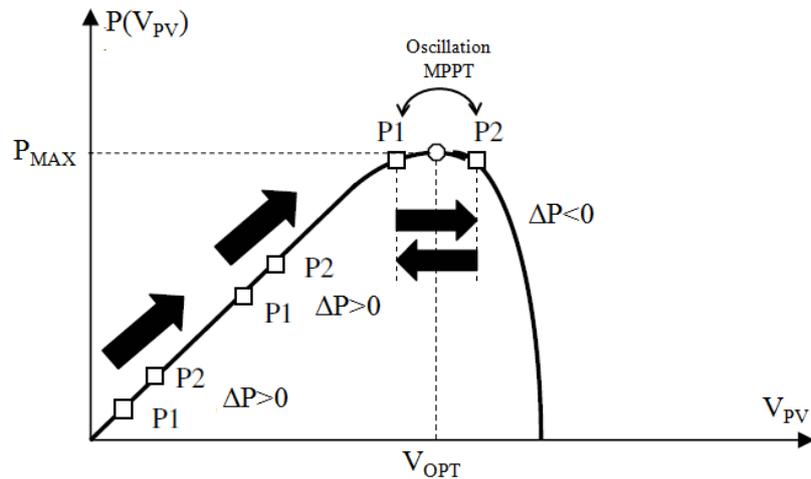


Figure 4.5 : Principe de fonctionnement d'un algorithme MPPT

L'inconvénient de la méthode P&O simple est lorsqu'une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale.

4.2.4. Amélioration de l'algorithme P&O

Pour remédier à l'inconvénient de la méthode P&O simple, on introduit une nouvelle condition sur la puissance.

La puissance est alors calculée en multipliant le courant et la tension, on effectue cette opération plusieurs fois pour obtenir une mesure plus précise de la puissance moyenne. Puis on observe le changement résultant de cette puissance (ΔP_{moy}). Si la puissance moyenne actuelle $P_{\text{moy}}(k)$ est supérieure à la précédente $P_{\text{moy}}(k-1)$ alors on garde la même direction de la perturbation précédente, sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure 4.6 donne l'algorithme de cette amélioration :

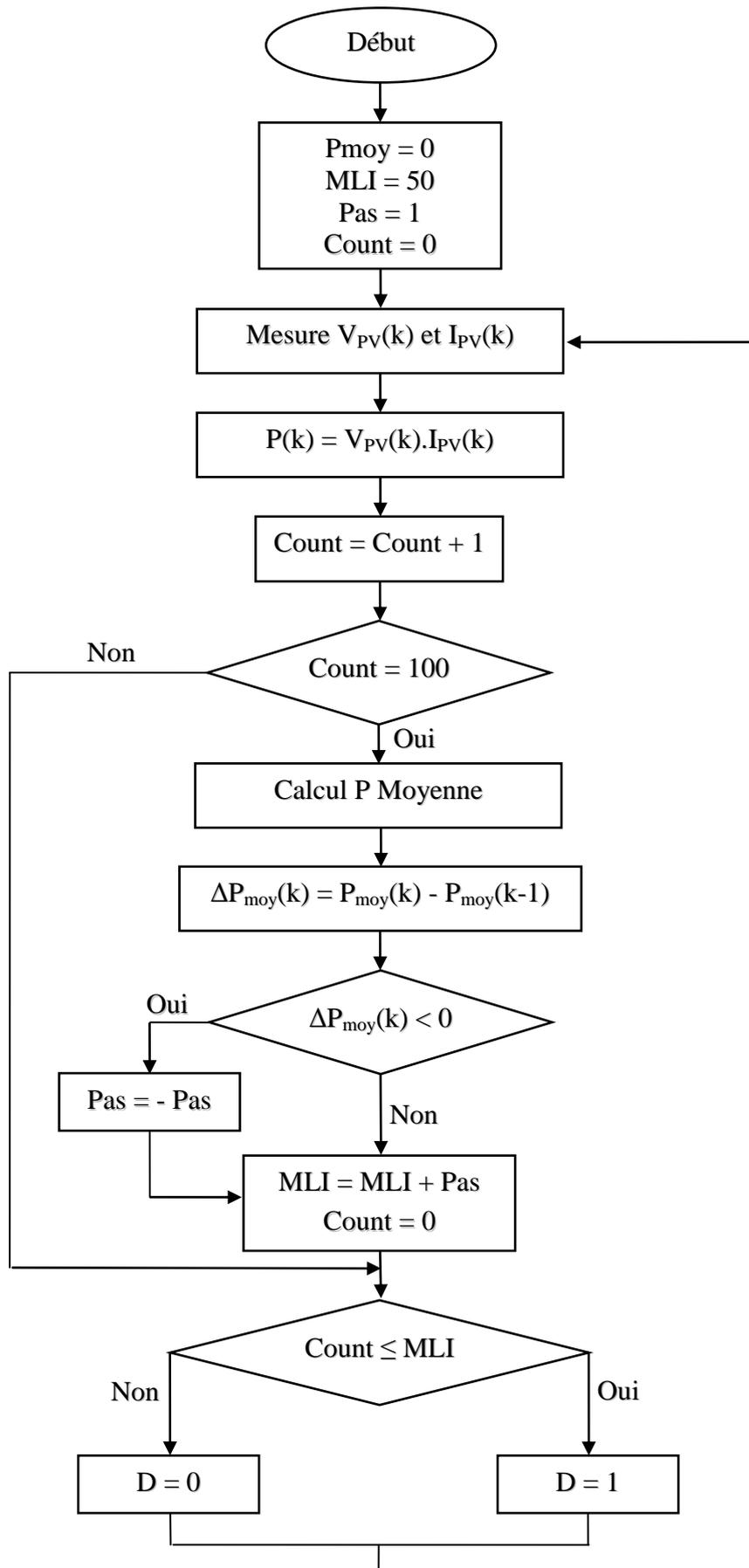


Figure 4.6 : Organigramme de l'algorithme P&O amélioré avec fonction MLI

Le diagramme de la figure 4.6 représente le principe de l'algorithme numérique de recherche de PPM, basé sur le calcul de la puissance moyenne. La commande D est au niveau haut (1), cette dernière reste inchangée tant que le comptage ne dépasse pas la valeur de 'MLI'. Où 'MLI' ici indique l'état T_{ON} de l'interrupteur. A l'inverse, si le comptage dépasse la valeur de 'MLI', la commande D passe à l'état bas (0), l'ouverture de l'interrupteur (T_{OFF}).

La commande MPPT effectue un suivi permanent du PPM, nécessaire pour connaître les variations de la puissance de sortie du générateur photovoltaïque (GPV). Elle permet de réajuster le rapport cyclique du convertisseur statique et ainsi d'assurer l'adaptation entre le GPV et la charge.

La figure 4.7 montre le schéma électrique, développé sous PSIM, d'un étage d'adaptation de type Boost contrôlé par la commande MPPT numérique avec fonction MLI, et inséré entre un GPV et une charge de type batterie.

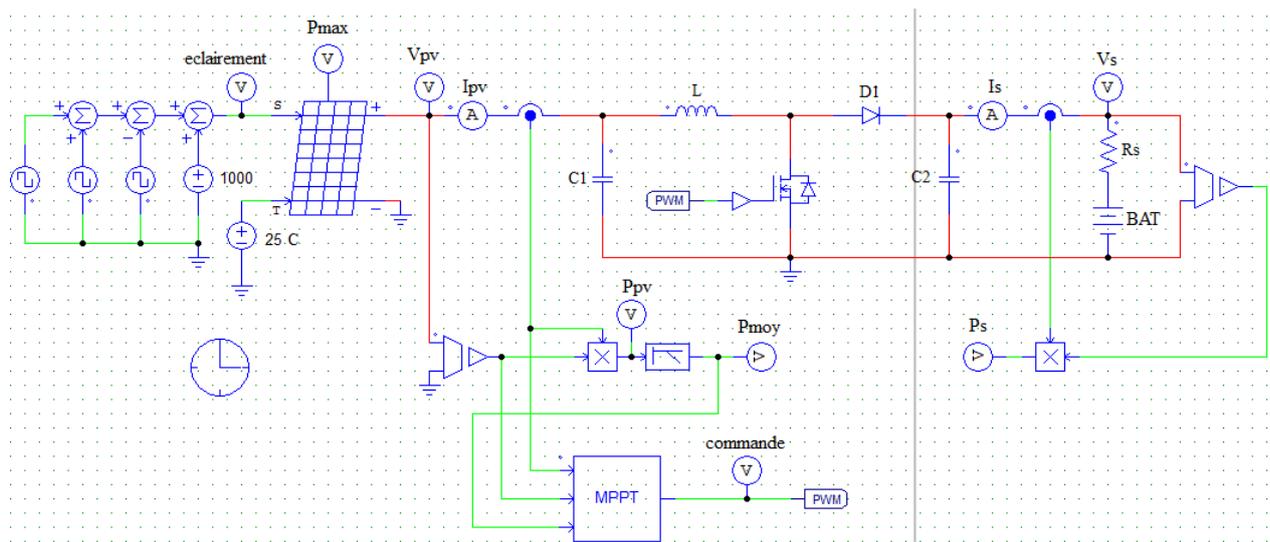


Figure 4.7 : Circuit d'un étage d'adaptation Boost contrôlé par commande MPPT

Le bloque « Simplified C bloc » représente la partie numérique de la commande MPPT. Pour cela, l'algorithme de la figure 4.6 a donc été conçu et converti en programme en langage C pour être intégré dans le logiciel de simulation (voir Annexe D).

Les résultats de simulation de ce circuit sont présentés en figure 4.8.

La simulation été réalisée en utilisant les paramètres suivants :

$$L = 50 \mu\text{H}$$

$$C1 = 150 \mu\text{F}$$

$$C2 = 470 \mu\text{F}$$

La figure suivante représente la simulation du schéma de la figure 4.7 avec un éclairage variable et une température de 25 °C :

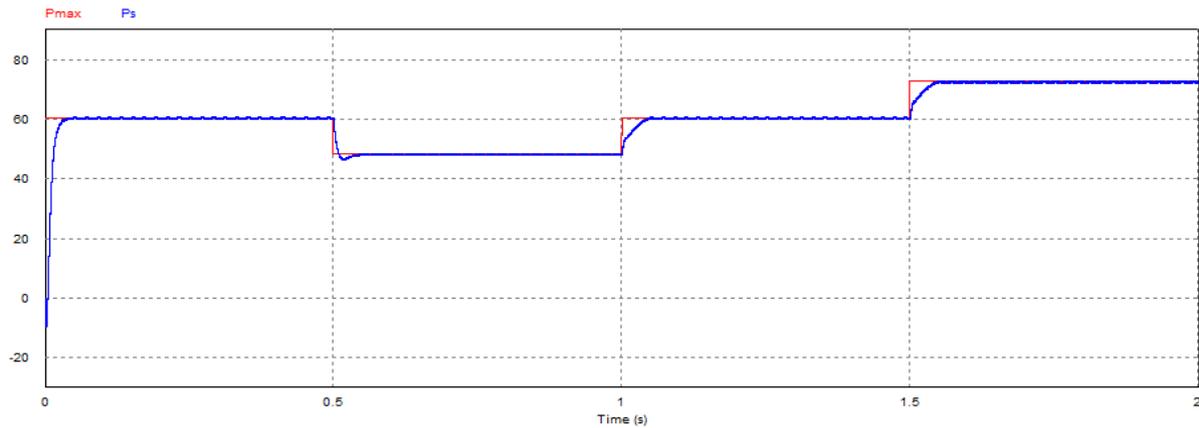


Figure 4.8 : Allures de puissance maximum du module et de puissance de sortie avec éclairement variable

La deuxième simulation consiste à simuler le schéma de la figure 4.7 mais dans ce cas avec une température variable et un éclairement de 1000 W/m² :

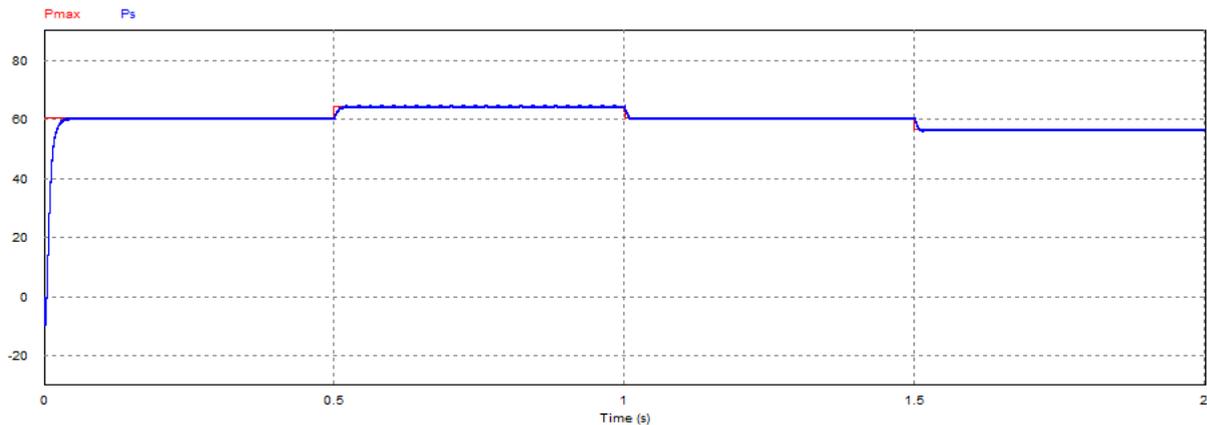


Figure 4.9 : Allures de puissance maximum du module et de puissance de sortie avec température variable

On remarque que l'allure de la puissance extraite par la charge (batterie) P_s poursuit le point de puissance maximale P_{max} du module PV quelque soit les variations de l'éclairement ou de la température.

De point du vu rendement nous avons le résultat suivant :

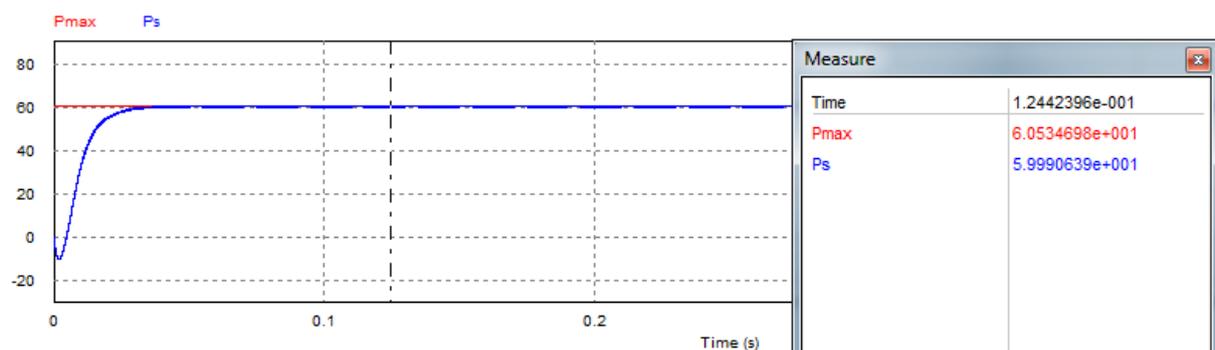


Figure 4.10 : Rendement de l'étage d'adaptation DC-DC

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{MPPT}}{P_{max}} = \frac{59.99}{60.53} = 99.10 \% \quad (3.11)$$

On peut dire que ce rendement est tout à fait convenable mais, il ne faut pas oublier que le générateur est un module photovoltaïque. La puissance délivrée par le panneau est donc dépendante de l'ensoleillement et ne peut pas être maîtrisée et maintenue constante à la valeur optimale. On prend en considération la perte partie puissance et consommation commande. Par conséquent, le rendement de l'étage d'adaptation η_{MPPT} d'un convertisseur destiné au photovoltaïque doit être impérativement élevé sur toute la plage de puissance d'entrée. Sinon, cet étage va dégrader les performances d'un GPV plutôt que d'augmenter le rendement global de la chaîne de conversion.

4.3. Raccordement de l'onduleur PV au réseau

Le raccordement des installations de production aux réseaux publics de distribution est encadré par plusieurs réglementations. La documentation technique de référence dont disposent les gestionnaires de réseaux, précise les études électriques qui sont à mener lors d'une demande de raccordement [1].

Le schéma suivant modélise l'onduleur cascade à cinq niveau raccordé au réseau électrique.

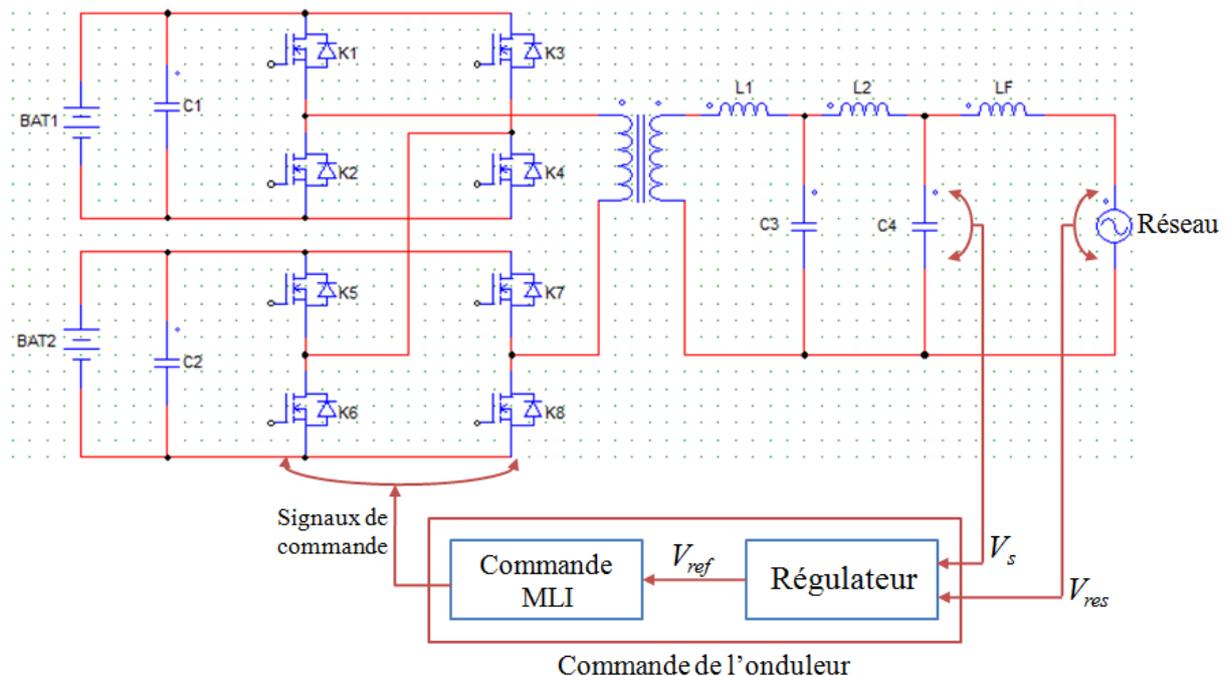


Figure 4.11 : Circuit de puissance et de commande du système photovoltaïque

Cette partie présente le développement du contrôle/commande de l'étage DC-AC de l'onduleur PV (figure 4.11) pour régler la tension à injecter, laquelle comporte :

- Une boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop) pour la synchronisation avec la tension du réseau.
- Une boucle de réglage de la tension du bus continu laquelle impose la référence du courant à injecter au réseau.
- Une boucle de poursuite de courant réseau désiré.

Afin de connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau, il est nécessaire de disposer entre les deux un filtre de raccordement de nature inductive. La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau, et d'autre part à limiter la dynamique du courant, de façon à le rendre plus facile à contrôler [29]. Ainsi qu'il faut synchroniser la tension produite par l'onduleur avec celle du réseau, c'est pourquoi l'information de phase et de fréquence de la tension du réseau est nécessaire.

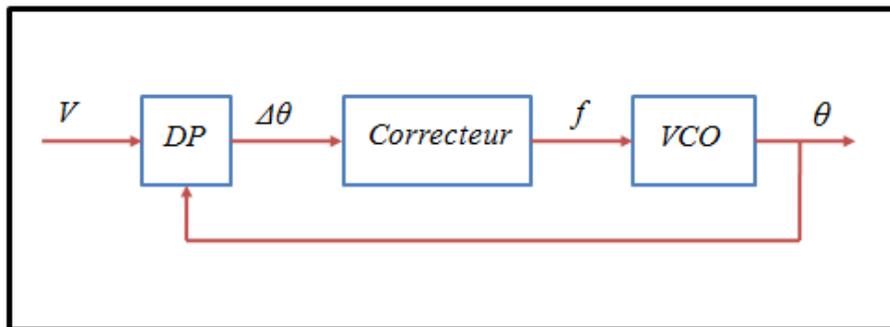


Figure 4.12 : Principe d'une PLL

La structure de la PLL comprend trois blocs : Détecteur de phase (DP), correcteur et oscillateur commandé en tension (VCO) (figure 4.12).

Le principe de la PLL est présenté dans [30, 31, 32]. Les techniques avancées de PLL recherchent une poursuite robuste de la phase du réseau malgré l'existence des perturbations. Les principales perturbations sont : saut de phase, creux de tension, harmonique, saut de fréquence et une difficulté supplémentaire qui tient compte du champ d'information plus réduit (une seule phase).

Plusieurs solutions sont décrites dans la littérature en utilisant des retards, diverses transformations, la projection sur un repère orthogonal, des intégrateurs généralisés...[31]. Et enfin, un filtre est souvent introduit dans la boucle afin de réduire les distorsions du signal de la tension mesurée : simple passe bas, résonant ou moyenne glissant [33, 34].

La figure suivante présente une PLL proposée par Pierre Giroux et Gilbert Sybilleon qui est très efficace :

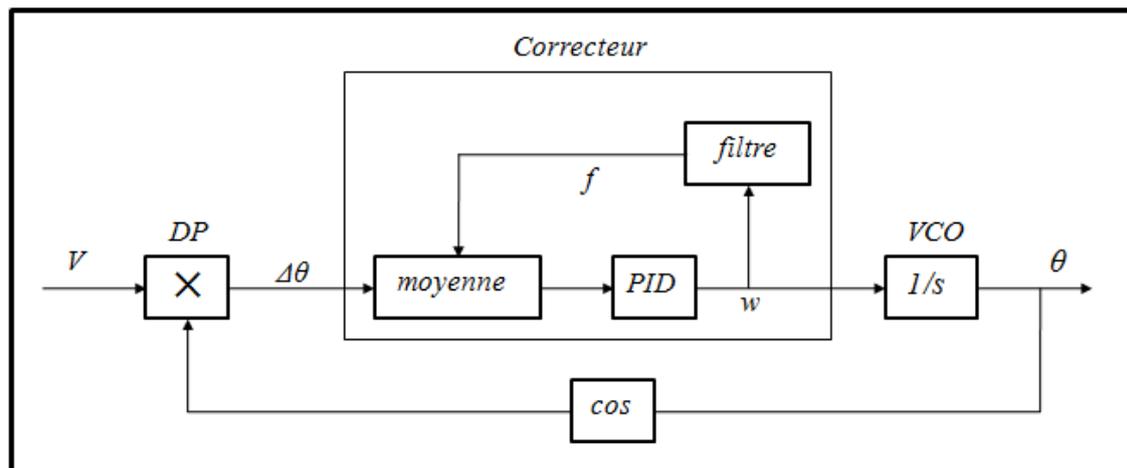


Figure 4.13 : Structure de la PLL

- Bloc Produit (\times) représente le détecteur de phase.
- Bloc « *moyenne* » calcule la valeur moyenne de l'entrée dans une période variable et joue le rôle de filtre anti harmoniques, et s'adapte à la fréquence variable.

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié un convertisseur DC-DC de type Boost, et sa commande basée sur les algorithmes de maximisation MPPT. Nous avons proposé aussi une boucle de régulation afin d'adapter le raccordement des onduleurs PV aux réseaux électriques.

Conclusion générale

Ce mémoire est consacré à la conception d'un onduleur photovoltaïque connecté au réseau. Il consiste à choisir la configuration convenable d'onduleur Cascade à cinq niveaux qui sera connecté au réseau tout en assurant un fonctionnement optimal de la source PV. Une boucle de régulation est aussi introduite pour répondre aux problèmes de raccordement au réseau.

En premier lieu, nous avons décrit les onduleurs photovoltaïques, ainsi que les différents types d'onduleurs multi-niveaux.

En deuxième lieu, Nous avons étudié l'influence des charges connectées à la sortie de l'onduleur, et l'effet des harmoniques sur la tension de sortie. Ensuite, nous avons brièvement présenté les différentes techniques de dépollution harmonique par le filtrage passif et le filtrage actif. Puis nous avons dévoilé les différentes stratégies de commande des onduleurs de tension, telle que la modulation en pleine onde, la modulation sinus-triangle et la modulation vectorielle.

Dans la troisième partie, nous avons étudié l'onduleur cascade à cinq niveaux commandé par la technique MLI sinus-triangle. Les résultats de simulation via PSIM ont montré les performances de ce type d'onduleur. Finalement, un microcontrôleur Arduino "Mega 2560" nous a servi pour la conception de l'onduleur cascade à cinq niveaux.

La quatrième partie traite le convertisseur Boost comme étage d'adaptation, afin d'extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV, et nous avons détaillé la technique de maximisation de puissance P&O. Une boucle de régulation a été proposée pour répondre aux problèmes de raccordement des onduleurs PV aux réseaux électriques.

Comme perspectives nous envisageons :

- De rechercher de nouvelles topologies d'onduleur multi niveaux et d'adopter des techniques MLI avancées.
- D'utiliser un convertisseur dévolteur/survolteur pour tenir compte des fluctuations de la charge.
- L'injection réelle de l'énergie PV au réseau électrique en utilisant la technique de régulation PLL.
- D'utiliser la carte DSP pour l'implémentation pratique.

Références bibliographiques

- [1] Thi Minh Chau LE, « Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations » Thèse de doctorat, Université de GRENOBLE, 2012.
- [2] Hannes Knops, Analysis, "Simulation and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle" thesis, Portland State university 1999.
- [3] Gruning H. Zuckerberger, A, "Hard Driven of High power GTO, Better Switching Capacity Obtained Through Improved Gate Units", IEEE Paper 0-7803-3544-9, 1996
- [4] E.M.Berkouk, « Contribution à la Conduite des Machines Monophasées et Triphasées Alimentées par des Convertisseurs Directs et Indirects, Applications aux Gradateurs et Onduleurs Multi-niveaux », Thèse de Doctorat, CNAM 1995.
- [5] Surin Khomfoi, Leon M. Tolbert, "Multilevel Power Converters", the University of Tennessee USA, Department of Electrical and Computer Engineering, August 2007.
- [6] Roberto Rajas, Tokuo Ohnishi, Takayuki Suzuki, « An Improved Voltage Vector Control Method for Neutral Point Clamped Inverters », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 10, N°6, pp. 666-672, November 1995.
- [7] Nikola Celanovic, « Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converter », Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, September 2000.
- [8] BOUAKAZ OUAHID, "Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux Fonctionnement Symétrique et asymétrique ", Mémoire d'ingénieur d'état, Département d'électrotechnique, université de Batna, 2005.
- [9] APC by Schneider Electric « Élimination des harmoniques dans les installations » Édition 01/2012.
- [10] N. Gheorghe « Perturbations dans les réseaux électriques », Revue Polyewpert Technique N°53 2008.
- [11] Salim MOUTTOU "Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant" Mémoire de la Maîtrise en Génie Électrique, Université du QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES, Octobre 2002
- [12] F.Z. Peng, GJ. Su, and G. Farquaharson, « A series LC filter for harmonic compensation of ac drives », Power Electronics Specialists Conference, PESC 99. 30th annual IEEE, Vol. 1, pp. 213-218,1999.
- [13] F. Labrique, G. Segulier et R. Bausiere, « Les Convertisseurs de l'Électronique de puissance », Paris : Technique et Documentation-Lavoisier, 1995.
- [14] B. Singh, K. Al-Haddad and A.C. Chandra, « A Review of Active Filters for Power Quality Improvement », IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 46, pp. 960-971, October 1999.
- [15] L. Gyugyi and E. Strycula, "Active AC power filters", in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1976, pp. 529-535.

- [16] H. Akagi, «New Trends in active Filters for Power Conditioning », IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 32, pp. 1312-1322, Nov/Déc 1996.
- [17] F. Z. Peng, H. Akagi, & A. Nabae, “A novel harmonic power filter”, in Conf. Rec. IEEE-PESC, 1988, pp. 1151–1158.
- [18] 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.
- [19] S Laurentiu CAPITANEANU « Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux », DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE
- [20] O. Bouakaz « Contribution a l'analyse des onduleurs multi niveaux fonctionnement symétrique et asymétrique », Mémoire de Magister. Université d' Alger 2005.
- [21] Hind Djeghloud, Hocine Benalla, “Space Vector Pulse Width Modulation Applied to the Three-Level Voltage Inverter”, Electrotechnic's Laboratory of Constantine, mentouri-Constantine University.
- [22] S. Ogasawara, J. Takagaki, H. Akagi, and A. Nabe, "A Novel Control Scheme of a Parallel Current-Controlled PWM Inverter," IEEE Transactions on Industry Applications, volume 28, number 5, pages 1023-1030, September / October 1992.
- [23] G Guy, C Guy, « Actionneurs Electriques, Principes Modèles Commande », Edition Eyrolles, 2000.
- [24] Seo, J. H, C. H. Choi, and D. S. Hyun, « A new Simplified Space-Vector PWM Method for Three-Level Inverters », IEEE Trans, Power Electronics. Vol. 16. 527-534. July 2001.
- [25] M. Yaichi “Analyse de la technique de modulation vectorielle SVM (Space Vector Modulation) appliquée aux onduleurs multiniveaux ” Thèse de Magister de l'université Djillali-Liabes de Sidi-Bel-Abbès. 2006.
- [26] Siriroj Sirisukprasert, “Optimized Harmonic Stepped-Waveform for Multilevel Inverter”, Thesis for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute, September 1999.
- [27] Gruning H, « High Power Hard Driven GTO module For 4.5KV/3KV Snubberless Operation”, PCIM Conférence 21-23 mai 1996, Nuremberg.
- [28] Tadjer. Sid Ahmed.” Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque” Mémoire de magistère, Université M'hamed Bougara-Boumrdes, 2008.
- [29] A. Chaoui, “ Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires“, Thèse de doctorat, Universite Ferhat Abbas – Setif, Décembre 2010.
- [30] Vikrarm Kaura, Vladimir Blasko, “Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions” , IEEE Transactions on Industry Applications, Page(s): 58-63, 1997.
- [31] S.M. Silva, B.M. Lopes, B.J.C. Filho, R.P.Campana, “Performance Evaluation of PLL Algorithms for Single-phase Grid-connected Systems” , IEEE Conference on Industry Applications,39th IAS Annual Meeting, Page(s): 2259 - 2263 vol.4, 2004.
- [32] Felice Liccardo, Pompeo Marino, and Giuliano Raimondo, “Robust and Fast Three-Phase PLL Tracking System” , IEEE Transactions on Industrial Electronics, Page(s): 221 - 231, 2011.

- [33] Eider Robles, Salvador Ceballos, Josep Pou, Jordi Zaragoza, Igor Gabiola, “ Grid Synchronization Method Based on a Quasi-Ideal Low-Pass Filter Stage and a Phase-Locked Loop” , IEEE Conferences on Power Electronics Specialists, PESC 2008, Page(s): 4056- 4061, 2008.
- [34] Lisheng Shi, IEEE, and Mariesa L. Crow, “A Novel PLL System Based on Adaptive Resonant Filter” , IEEE, Power Symposium Conferences (NAPS '08), 40th North American 2008.
- [35] IEEE Std 519-1992, IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, New York - IEEE, United States, 1997.
- [w1] <http://www.nms-energie-renouvelable.fr/article-panneaux-solaires-photovoltaiques.107934.2813.html> (consulté le 10/04/2015)
- [w2] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696> (consulté le 10/04/2015)
- [w3] <http://www.photovoltaique.info/Le-rendement-des-onduleurs.html> (consulté le 21/03/2015)
- [w4] <http://soltis.be/fr/photovoltaique/aspects-techniques/onduleurs/> (consulté le 08/05/2015)
- [w5] <http://electronics.stackexchange.com/questions/68971/igbt-vs-power-mosfet-for-switching-applications-where-to-draw-the-line> (consulté le 12/06/2015)
- [w6] <http://www.element14.com/community/docs/DOC-48968/1/arduino-arduino-mega-2560-based-on-atmel-avr-atmega2560-mcu> (consulté le 20/06/2015)

Annexe

Annexe A : NORME IEEE STD 519-1992

La norme IEEE Std 519-1992 [35], contient des recommandations qui ont pour but de contrôler le taux de pollution harmonique présent sur les réseaux électriques. Ces normes spécifient les limites de distorsion en tension que les fournisseurs doivent respecter ainsi que les limites de distorsion en courant que les usagers, avec leurs charges polluantes, doivent respecter.

| Niveau de tension | Taux de distorsion individuel de tension (%) | Taux de distorsion global de tension (%) |
|-------------------------|--|--|
| < 69 kV | 3.0 | 5.0 |
| > 69.001 kV et < 161 kV | 1.5 | 2.5 |
| > 161.001 kV | 1.0 | 1.5 |

Tableau A.1 : Limites de distorsion de tension pour les fournisseurs

| Distorsion maximale du courant harmonique en pourcentage de I_L | | | | | | |
|---|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|------|
| Ordre harmonique individuel (harmoniques impairs) | | | | | | |
| I_{SC}/I_L | $h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h$ | TDD |
| <20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20 < 50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50 < 100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100 < 1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| >1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

Les harmoniques pairs sont limités à 25% des limites des harmoniques impairs définis ci-dessus

I_L : Demande maximale du courant de charge.

I_{SC} : Courant de court-circuit maximal.

TDD : Taux de distorsion global du courant.

Tableau A.2 : Limites de distorsion de courant pour les systèmes généraux de distribution (120 V à 69 000 V)

Annexe B : Classification des composants de puissance

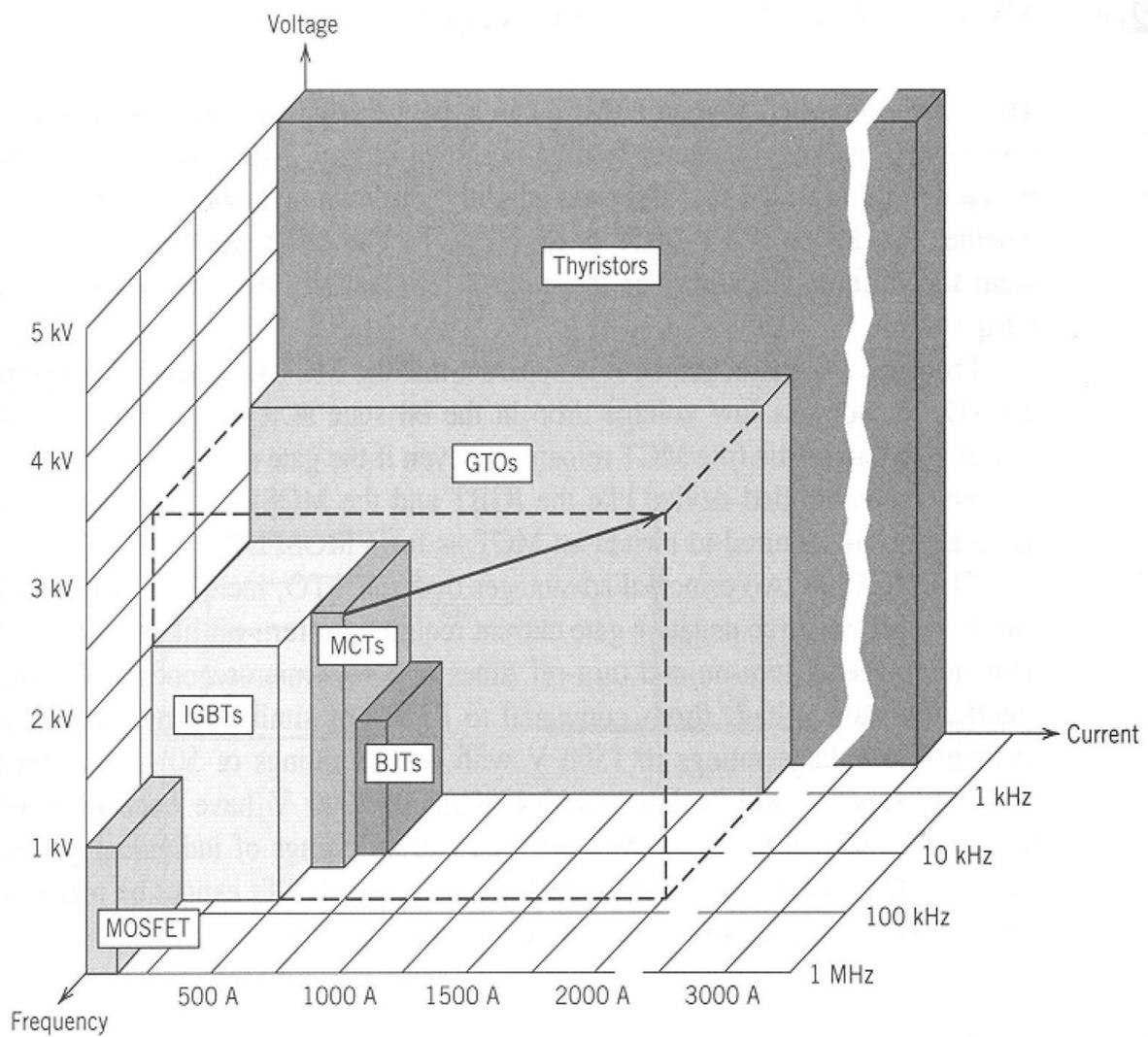


Figure B.1 : Classification des composants de puissance en fonction de tension, courant et fréquence de commutation [w5]

Annexe C : l'architecture d'Arduino Mega 2560

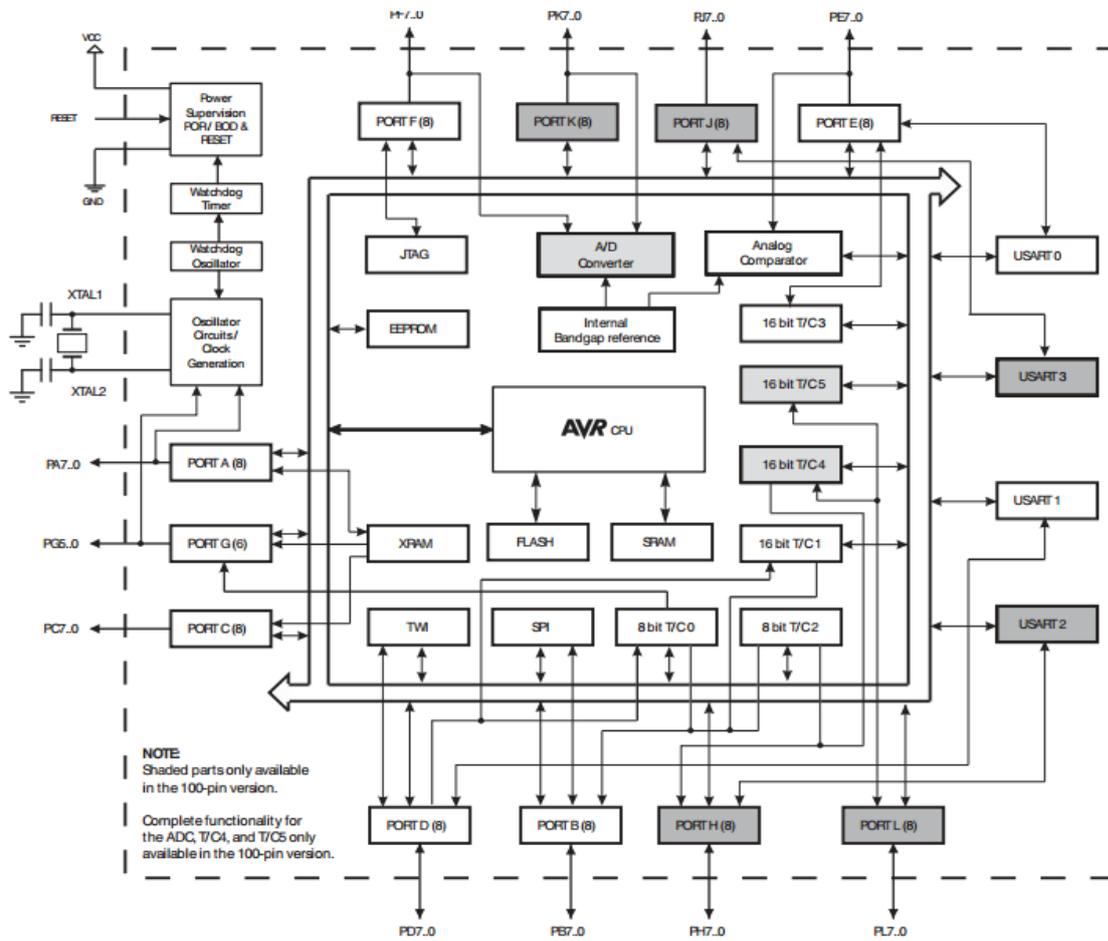


Figure C.1 : Schéma de l'architecture globale d'Arduino Mega 2560 [w6]

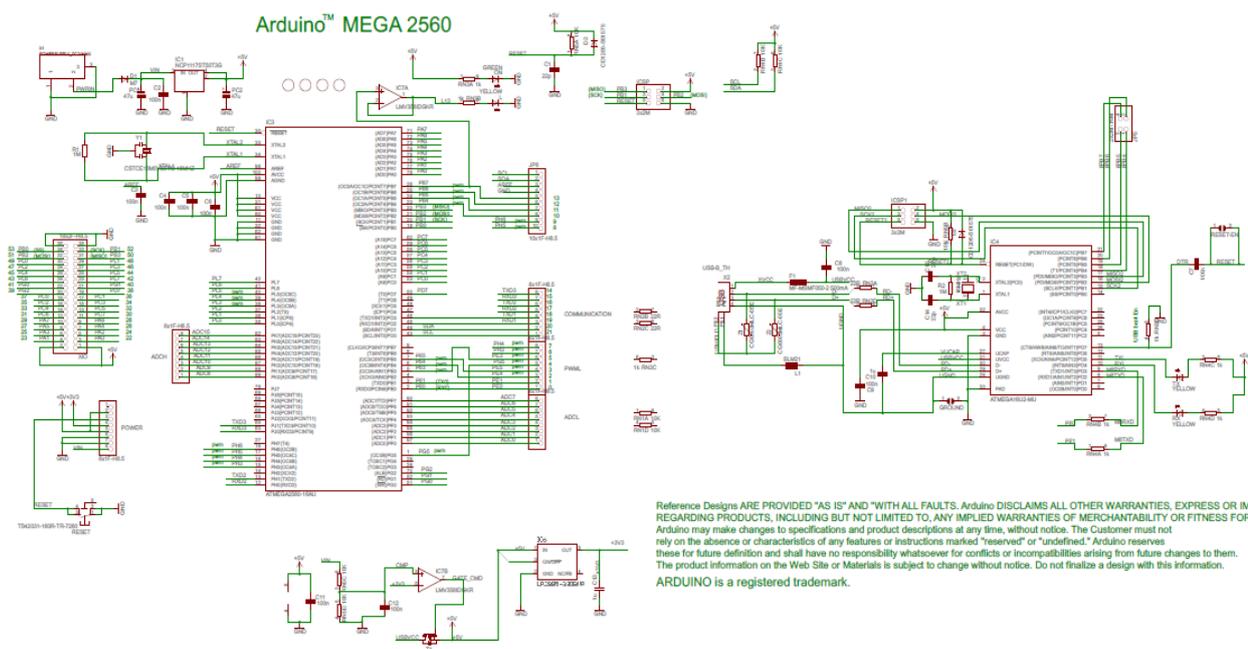


Figure C.2 : Schéma technique de la carte Arduino Mega 2560 [w6]

Annexe D : Programme en langage C de l'algorithme P&O avec fonction MLI

```
#define Ipv x1 // Courant d'entrée du convertisseur
#define Vpv x2 // Tension d'entrée du convertisseur
#define Pmoy x3 // Puissance moyenne
static int N=100, count=0;
static int MLI=50, pas=1;
static float Ppv=0, Pancien=0;
static int count_periode=0;

if (count == N)
{
    count=0;
    count_periode++;
    if ( count_periode % N ==0 )
    {
        if (Pmoy < Pancien)
        {
            pas = - pas;
        }
        MLI = MLI + offset;
        Pancien = Pmoy;
    }
}

if (count <= MLI) y1=1; // D=y1;
else y1=0;

count++;
Ppv = Ipv*Vpv;
```

Annexe E : Circuit imprimé de l'onduleur cascade à cinq niveaux

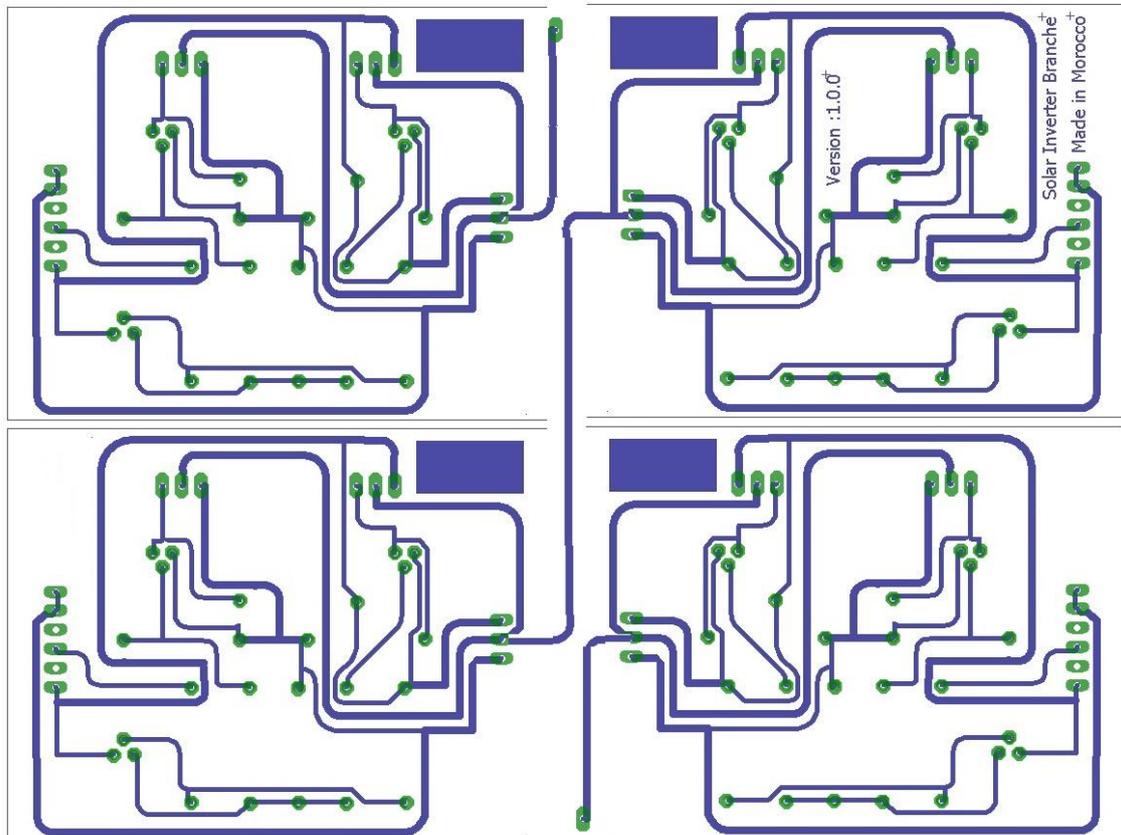


Figure E.1 : Circuit imprimé globale des quatre bras de l'onduleur cascade à cinq niveaux