

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA de Bejaia



Faculté de technologie
Département de Génie Électrique

MÈMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

THÈME

Etude et contrôle d'un onduleur autonome.

➤ **Réaliser par :**

ACHACHE Massinissa

ABDOUNE Reda

➤ **Encadré par :**

Pr T.REKIOUA

Dr A.OUBELAID

Année universitaire 2023 / 2024

Remerciements

Nous tenons, en premier lieu, à rendre grâce à dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

C'est avec un grand honneur et un grand plaisir que nous remercions nos promoteurs, Mr OUBELAID Adel et Mr REKIOUA Toufik de nous avoir encadrés. Merci messieurs pour votre soutien et votre disponibilité. Vos qualités morales, intellectuelles et surtout votre intérêt pour la science forcent le respect et l'admiration.

Ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont apportés leur aide, leur soutien et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Nos chaleureux remerciements s'adressent finalement à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation au sein de l'université de Bejaia.

Nous n'oublions pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Merci à toutes et à tous.

Dédicaces

Quel plus beau cadeau que le fruit d'un travail sincère, offert à ceux qu'on aime et qu'on remercie, en témoignant de notre gratitude et de notre reconnaissance tout au long de notre vie.

Je dédie ce travail à :

À ma famille adorée, qui m'a accompagné et épaulé tout au long de mes études, qui m'ont offert les meilleures conditions pour réussir, qui m'ont transmis le goût de l'apprentissage et du dépassement de soi. Vous êtes ma fierté et mon bonheur.

À mon binôme, qui a été un compagnon de route exceptionnel, qui a su faire preuve de rigueur, de créativité et d'adaptabilité, qui a partagé avec moi les joies et les peines de ce mémoire. Tu es un ami précieux et un collègue exemplaire.

À mes amis fidèles, qui m'ont soutenu et réconforté dans les moments difficiles, qui m'ont fait rire et profiter de la vie, qui m'ont apporté leur aide et leurs conseils. Vous êtes ma deuxième famille et mes meilleurs alliés.



Nomenclature

- **I** - Courant (Intensité).
- **U** – Tension.
- **Id** - Courant de la diode.
- **Ud** - Tension de la diode.
- **Lc** - Inductance de la charge.
- **Rc** - Résistance de la charge.
- **Th** – Thyristor.
- **Vd** - Tension de diode (Diode voltage).
- **IGBT** - Transistor bipolaire à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor).
- **GTO** - Thyristor à gâchette désactivable (Gate Turn-Off thyristor).
- **AC** - Courant alternatif (Alternating Current).
- **DC** - Courant continu (Direct Current).
- **TGV** - Train à grande vitesse (High-speed train, bien que ce ne soit pas un symbole électrique).
- **LED** - Diode électroluminescente (Light Emitting Diode).
- **D** – Diode.
- **GT** - Thyristor à gâchette (Gate Thyristor).
- **BJT** - Transistor bipolaire (Bipolar Junction Transistor).
- Φ - Flux magnétique (Magnetic flux).
- **PV** - Photovoltaïque (Photovoltaic).

Tables de matières

Introduction générale	(01)
Chapitre I : Etat de l'art sur les onduleurs	
I.1 Introduction	(02)
I.2 Convertisseurs statiques	(03)
I.2.1 Différentes catégories de convertisseurs	(03)
I.2.1.1 Hacheur	(03)
I.2.1.2 Gradateur	(03)
I.2.1.3 Redresseur	(04)
I.2.1.4 Onduleur	(04)
I.3 Classification des onduleurs	(05)
I.3.1 Onduleurs non autonomes	(05)
I.3.1.1 Avantages et inconvénients	(06)
I.3.1.1.1 Avantages	(06)
I.3.1.1.2 Inconvénients	(06)
I.3.2 Onduleurs autonomes	(06)
I.3.2.1 Avantages et inconvénients	(07)
I.3.2.1.1 Avantages	(07)
I.3.2.1.2 Inconvénients	(07)
I.3.3 Onduleurs à résonance	(07)
I.3.3.1 Avantages et inconvénients	(08)
I.3.3.1.1 Avantages	(08)
I.3.3.1.2 Inconvénients	(08)
I.4 Types d'onduleurs	(09)
I.4.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur	(09)
I.4.2 Onduleurs monophasés	(09)
I.4.2.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé	(09)
I.4.2.1.1 Onduleur en demi-pont	(09)
I.4.2.1.2 Onduleur monophasé en pont	(10)
I.4.3 Onduleur triphasé	(10)
I.4.3.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé	(11)
I.4.3.1.1 Onduleur triphasé en pont	(11)

I.5 Différences entre un onduleur monophasé et triphasé	(11)
I.6 Applications des onduleurs	(12)
I.6.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone	(12)
I.6.2 Alimentation de secours	(13)
I.6.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	(13)
I.6.4 Applications relatives aux transports	(14)
I.6.4.1 Transports ferroviaires	(14)
I.6.4.2 Transports aériens	(14)
I.6.4.3 Transports maritimes	(14)
I.7 Avantages et inconvénients des onduleurs	(15)
I.7.1 Avantages	(15)
I.7.2 Inconvénients	(15)
I.8 Conclusion	(16)

Chapitre II : Les Onduleurs autonomes

II.1 Introduction	(17)
II.2 Les onduleurs autonomes	(18)
II.2.1 Définition d'un onduleur autonome	(18)
II.2.2 Types d'onduleurs autonomes	(18)
II.2.2.1 Onduleur à onde carrée	(19)
II.2.2.2 Onduleur à onde pseudo sinusoïdale	(19)
II.2.2.3 Onduleur à onde sinusoïdale pure	(20)
II.2.3 Comparaison avec les onduleurs classiques	(20)
II.2.4 Modes de fonctionnement	(21)
II.2.4.1 Mode priorité solaire	(21)
II.2.4.2 Mode priorité à la batterie	(21)
II.2.4.3 Mode hors réseau	(22)
II.2.4.4 Mode d'alimentation de secours	(22)
II.2.5 Tendances actuelles et futures	(22)
II.2.5.1 Tendances Actuelles	(22)
II.2.5.1.1 Intégration de l'Intelligence Artificielle et du Machine Learning	(22)
II.2.5.1.2 Hybridation et Polyvalence	(22)
II.2.5.1.3 Efficacité Énergétique et Réduction des Pertes	(22)
II.2.5.1.4 Intégration de Stockage Énergétique	(22)

II.2.5.2 Tendances Futures	(23)
II.2.5.2.1 Systèmes Autonomes et Autogérés	(23)
II.2.5.2.2 Sécurité et Cybersécurité	(23)
II.2.5.2.3 Énergie Propre et Décentralisée	(23)
II.2.5.2.4 Adaptation aux Changements Climatiques	(23)
II.3 Les Composants des Onduleurs autonomes	(23)
II.3.1 Architecture des onduleurs autonomes	(23)
II.3.1.1 Source de Courant Continu (DC)	(23)
II.3.1.2 Convertisseur DC-DC	(24)
II.3.1.3 Onduleur DC-AC	(24)
II.3.1.4 Contrôleur de Système	(25)
II.3.1.5 Filtres	(25)
II.3.1.6 Systèmes de Sécurité et de Protection	(25)
II.3.2 Schéma de base	(25)
II.3.3 Technologies de stockage	(25)
II.3.3.1 Types de batteries utilisées	(27)
II.3.3.1.1 Batteries au plomb-acide	(27)
II.3.3.1.2 Batteries lithium-ion	(28)
II.3.3.1.3 Batteries sodium-soufre	(29)
II.3.3.1.4 Batteries à base de nickel	(30)
II.3.3.1.5 Batteries à circulation d'électrolyte	(31)
II.3.3.2 Avantages et inconvénients de chaque type	(32)
II.3.3.3 Innovations récentes dans le stockage de l'énergie	(33)
II.3.3.3.1 La gravité, un phénomène naturel pour stocker l'énergie	(33)
II.3.3.3.2 Le sel, un allié prometteur pour la conservation de l'énergie	(33)
II.4 Sources d'énergie renouvelable intégrée	(34)
II.4.1 Panneaux photovoltaïques	(34)
II.4.2 Eoliennes	(35)
II.5 Fonctionnement et Modes de Gestion de l'Énergie	(36)
II.5.1 Principes de fonctionnement	(36)
II.5.2 Gestion des flux d'énergie entre les sources, le stockage et la charge	(37)
II.5.2.1 Stockage d'énergie	(37)
II.5.2.2 Gestion de la charge	(37)

II.5.2.3	Equilibrage de l'offre et de la demande	(38)
II.5.2.4	Intégration des énergies renouvelables	(38)
II.5.2.5	Technologies de contrôle avancée	(38)
II.5.3	Modes de gestion de l'énergie	(38)
II.5.3.1	Gestion de l'énergie domestique	(38)
II.5.3.1.1	Efficacité énergétique domestique	(38)
II.5.3.1.2	Gestion intelligente des appareils	(38)
II.5.3.2	Gestion de l'énergie dans l'industrie	(39)
II.5.3.2.1	Optimisation des processus industriels	(39)
II.5.3.2.2	Gestion de la demande d'énergie	(39)
II.5.3.3	Gestion de l'énergie dans les transports	(39)
II.5.3.3.1	Electrification des transports	(39)
II.5.3.3.2	Planification urbaine durable	(39)
II.5.3.4	Gestion de l'énergie dans les réseaux électriques	(39)
II.5.3.4.1	Intégration des énergies renouvelables	(39)
II.5.3.4.2	Smart grids (réseaux électriques intelligents)	(39)
II.5.3.5	Gestion de l'énergie à l'échelle communautaire ou urbaine	(40)
II.5.3.5.1	Microgrids	(40)
II.5.3.5.2	Planification énergétique urbaine	(40)
II.5.4	Algorithmes de contrôle	(40)
II.5.4.1	L'algorithme de contrôle de charge de la batterie	(40)
II.5.4.2	L'algorithme de gestion de la charge des véhicules électriques	(40)
II.5.4.3	L'algorithme d'optimisation de la consommation d'énergie dans les bâtiments	(41)
II.5.4.4	Algorithme de contrôle de la production d'énergie dans un parc éolien ou solaire ..	(41)
II.5.4.5	Algorithme de gestion de l'énergie pour les systèmes autonomes	(41)
II.6	Avantages et limitations d'un onduleur autonome	(42)
II.7	Conclusion	(43)
 Chapitre III : Dimensionnement et simulation d'un onduleur autonome		
III.1	Introduction	(44)
III.2	Présentation du système global	(44)
III.3	Simulation de l'onduleur autonome	(45)
III.4	Schéma de l'onduleur autonome	(45)

III.5 Les différentes composantes utilisées	(46)
III.5.1 LM555CM	(46)
III.5.1.1 Caractéristiques	(46)
III.5.1.2 Applications	(47)
III.5.1.3 Circuit électrique	(47)
III.5.2 4017BP_10V	(47)
III.5.2.1 Caractéristiques	(48)
III.5.2.2 Applications	(48)
III.5.2.3 Diagramme logique	(49)
III.5.3 Le transistor MOSFET	(49)
III.5.3.1 Critère de choix de l'élément semi-conducteur	(51)
III.5.3.2 Commande d'un transistor MOSFET	(51)
III.5.3.2.1 Caractéristique de sortie	(51)
III.5.3.2.2 Caractéristique de commande	(52)
III.5.4 Transformateur	(52)
III.5.4.1 Principe de fonctionnement	(52)
III.5.5 La résistance	(53)
III.5.6 Le condensateur	(53)
III.6 Conclusion	(54)
 Chapitre IV : Résultat du montage proposé	
IV.1 Introduction	(55)
IV.2 Schéma de simulation de l'onduleur autonome	(55)
IV.3 Résultats de simulation	(56)
IV.3.1 Le signal de sorties du panneau photovoltaïque	(56)
IV.3.2 Le signal de sorties du LM555CM	(57)
IV.3.3 Le signal de sorties du 4017BP_10V	(57)
IV.3.3 Le signal de sortie obtenu par les MOSFETs	(58)
IV.3.4 Le signal de sortie du transformateur	(58)
IV.3.4 Le signal de sortie après le filtrage	(59)
IV.4 Conclusion	(59)
Conclusion générale	(60)

Listes des figures

Figure I.1 : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance	(03)
Figure I.2 : Schéma de principe d'un hacheur série	(03)
Figure I.3 : Schéma d'un gradateur simple	(04)
Figure I.4 : Redresseur simple alternance. Montage parallèle P3	(04)
Figure I.5 : Onduleur de tension en pont commande Monophasé	(05)
Figure I.6 : Schéma bloc représentatif d'un onduleur	(09)
Figure I.7 : Onduleur en demi-pont	(10)
Figure I.8 : Onduleur monophasé en pont	(10)
Figure I.9 : Onduleur triphasé	(11)
Figure I.10 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone	(12)
Figure I.11 : Alimentation de secours	(13)
Figure I.12 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	(13)
Figure I.13 : Chaîne de traction bi-mode	(14)
Figure II.1 : Onduleur autonome	(18)
Figure II.2 : Onduleur à onde carrée	(19)
Figure II.3 : Onduleur à onde pseudo sinusoïdale	(19)
Figure II.4 : Onduleur à onde sinusoïdale pure	(20)
Figure II.5 : Panneau photovoltaïque	(23)
Figure II.6 : Batterie	(24)
Figure II.7 : Générateur DC	(24)
Figure II.8 : Schéma de base d'un onduleur autonome	(25)
Figure II.9 : Synoptique des constituants d'un système de stockage (réversible) d'électricité ainsi que son contrôle et son diagnostic	(26)
Figure II.10 : Batteries au plomb Enersys : 24 unité, tension nominale de 48V, courant nominal de 200A, puissance de 10kW, capacité de 1000Ah (L2EP AMPT Lille)	(28)
Figure II.11 : Batteries Li-ion Saft : tension nominale 48V, courant de charge 32A, courant de décharge 44A, énergie 3900Wh, énergie massique 130Wh/Kg (L2EP HEI Lille)	(28)
Figure II.12 : 17 ensembles de 2 MW de batteries NaS au Japon	(30)
Figure II.13 : Principe des batteries à circulation d'électrolyte	(31)

Figure II.14 : Panneaux photovoltaïques	(34)
Figure II.15 : Panneau photovoltaïque Condor Électronique CEM200M-72	(35)
Figure II.16 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	(36)
Figure III.1 : Système global a étudié	(44)
Figure III.2 : Schéma de simulation d'un onduleur hybride	(45)
Figure III.3 : LM555CM	(46)
Figure III.4 : Circuit électrique du LM555CM	(47)
Figure III.5 : Schéma du 4017BP	(48)
Figure III.6 : Le branchement de 4017BP avec le LM555CM	(49)
Figure III.7 : Le diagramme logique du 4017BP	(49)
Figure III.8 : Schéma électrique du MOSFET	(50)
Figure III.9 : Schéma de l'élimination des diodes internes	(50)
Figure III.10 : L'échelle des semi-conducteurs (interrupteurs)	(51)
Figure III.11 : Caractéristiques de sortie d'un transistor MOSFET	(51)
Figure III.12 : Caractéristiques de commande d'un transistor MOSFET	(52)
Figure III.13 : Transformateur ou point milieu (15V à 230V)	(53)
Figure III.14 : Résistance de puissance 2.2k Ω	(53)
Figure III.15 : Condensateur de 1000 μ F	(54)
Figure IV.1 : Schéma de simulation d'un onduleur hybride	(55)
Figure IV.2 : Schéma du sous-système (Filtre + Transformateur)	(56)
Figure IV.3 : L'allure de la tension du générateur PV, 12V	(56)
Figure IV.4 : Le signal généré par le LM555CM	(57)
Figure IV.5 : Le signal généré par le 4017BP_10V	(57)
Figure IV.6 : Le signal obtenu par les MOSFETs	(58)
Figure IV.7 : Le signal obtenu par le transformateur	(58)
Figure IV.8 : Le signal de sortie après le filtrage	(59)

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Différences entre un onduleur monophasé et triphasé	(11)
Tableau II.1 : Comparaison avec les onduleurs classiques	(20)
Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de chaque type de batterie	(32)
Tableau II.3 : Avantages et inconvénients de chaque type de batterie	(42)

INTRODUCTION GENERALE

La production d'énergie reste stratégique sur le long terme, ainsi, la consommation énergétique mondiale augmente d'environ 2% par an alors que l'on est confronté à une réduction des ressources primaires fossiles. Par ailleurs, concernant l'avenir de notre planète, en vertu du protocole de Kyoto, du plan de Bali, des accords de Cancun et certainement de ce qui ressortira de la conférence de Durban l'utilisation de quelques ressources conventionnelles comme le charbon, le pétrole, l'énergie nucléaire... seraient limitée ou découragée pour des raisons liées à l'environnement. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains [1].

Le type de stockage généralement utilisé dans ces systèmes est la batterie au plomb. La maturité dont cette technologie fait preuve et son faible coût en sont les raisons principales. L'utilisation de ces batteries à l'échelle saisonnière est inenvisageable. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie. Leur fonctionnement journalier (décharge et recharge complètes sur quelques jours) permet d'installer une faible capacité de stockage. Mais l'état de charge maximal des batteries est atteint d'autant plus rapidement que cette capacité installée est faible.

Les applications domestiques ou industrielles étant généralement alimentées en courant alternatif, il est nécessaire de convertir le courant continu produit par le GPV, en courant alternatif avec les mêmes caractéristiques (tension, fréquence, phase,...) que le courant qui provient du réseau, cette transformation est réalisée grâce à un onduleur. Etant monophasés ou triphasés, autonomes ou non autonomes, de tension ou de courant, les onduleurs sont basés sur une structure en pont ou en demi pont constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée, il module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée. De nos jours, les énergies renouvelables occupent une place beaucoup plus grande. Cette source d'énergie est disponible presque partout.

Pour alimenter des charges alternatives ou injecter de l'énergie dans le réseau de distribution, l'électricité produite de manière continue doit être transformée en une forme ondulée. Afin de répondre à ces besoins, il est essentiel de concevoir et de développer des technologies pour les onduleurs autonomes, capables de fonctionner avec plusieurs sources d'énergie.

I.1 Introduction

La transition vers des sources d'énergie renouvelables s'impose comme un enjeu crucial et une nécessité impérieuse pour garantir un avenir durable à notre planète. Face aux bouleversements climatiques et à l'épuisement des ressources fossiles, il est crucial d'opérer une transition énergétique ambitieuse et résolue [2]. Cette transition engendre une métamorphose fondamentale dans le paradigme énergétique, faisant passer d'un système largement dépendant des combustibles fossiles à un modèle caractérisé par la décentralisation, la diversification et l'utilisation de sources d'énergie propres et renouvelables. Les énergies solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et issues de la biomasse émergent ainsi comme des alternatives prometteuses, aptes à satisfaire nos besoins énergétiques tout en préservant l'intégrité environnementale.

La production d'énergie reste stratégique sur le long terme, ainsi, la consommation énergétique mondiale augmente d'environ 2% par an alors que l'on est confronté à une réduction des ressources primaires fossiles. Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydroélectrique et la biomasse devront jouer un rôle de plus en plus important. Dans ce contexte, en septembre 2001, l'Union Européenne a adopté la Directive relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelable sur le marché intérieur de l'électricité. L'objectif de cette directive est la promotion et l'exploitation à l'avenir du potentiel des sources d'énergie renouvelable.

Dans ce contexte, les onduleurs photovoltaïques sont essentiels pour convertir l'énergie solaire en électricité utilisable, conformément aux normes internationales sur le climat.

Les onduleurs photovoltaïques sont des composants essentiels des systèmes d'énergie solaire photovoltaïque, convertissant l'électricité produite par les panneaux solaires en une forme utilisable pour les foyers et les réseaux électriques. Leur rôle est crucial car ils permettent de transformer le courant continu généré par les panneaux solaires en courant alternatif compatible avec les appareils électriques domestiques et les réseaux électriques.

I.2 Convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance (monophasée ou triphasée), on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques (schéma ci-dessous) [3].

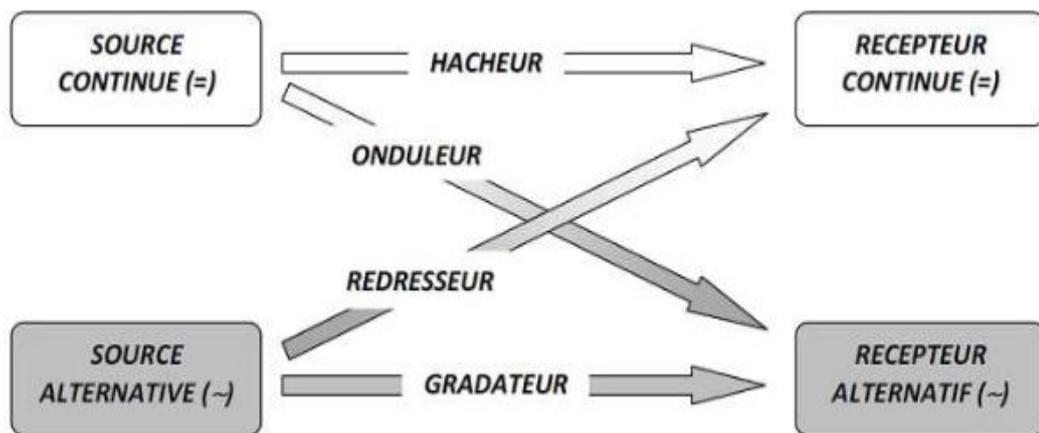


Figure I.1 : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance.

I.2.1 Différentes catégories de convertisseurs

I.2.1.1 Hacheur

Le hacheur, également désigné comme un convertisseur continu-continu, représente un dispositif d'électronique de puissance intégrant un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés. Son objectif premier est de réguler la valeur moyenne de la tension d'une source continue avec une efficacité notable, par le biais de processus de commutation contrôlés.

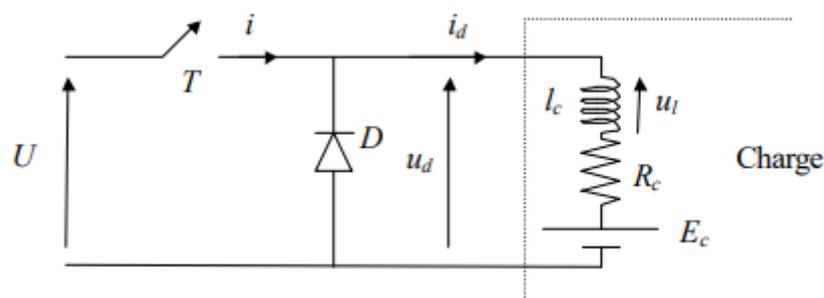


Figure I.2 : Schéma de principe d'un hacheur série.

I.2.1.2 Gradateur

Un gradateur, Aussi connu sous le nom de convertisseur direct alternatif-alternatif, est un composant de l'électronique de puissance qui permet de modifier un signal électrique afin

de faire varier sa tension efficace en sortie, ce qui permet de réguler la puissance fournie à la charge, principalement utilisé sur des tensions alternatives.

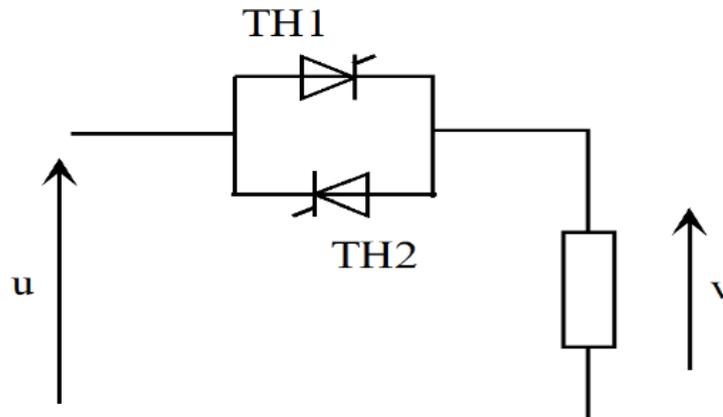


Figure I.3 : Schéma d'un gradateur simple.

I.2.1.3 Redresseur

Un redresseur, connu également sous le nom de convertisseur alternatif-continu ou pont de Graetz, est un dispositif de conversion conçu pour fournir une alimentation électrique à une charge nécessitant une tension et un courant aussi continus que possible, à partir d'une source de tension alternative.

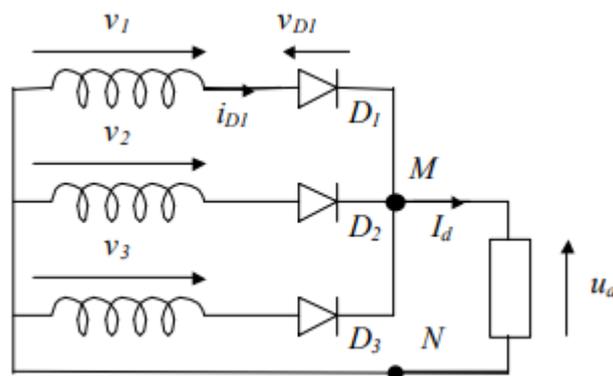


Figure I.4 : Redresseur simple alternance. Montage parallèle P3.

I.2.1.4 Onduleur

Un onduleur, Aussi appelé convertisseur continu-alternatif, est un appareil électronique offrant la possibilité de réguler la tension, la fréquence et parfois la forme d'onde du courant de sortie. Il est couramment employé dans les dispositifs de secours pour assurer l'alimentation en cas de coupure de courant, ainsi que dans des contextes nécessitant un courant alternatif stable,

tel que dans les installations solaires photovoltaïques. Typiquement, l'onduleur utilise une source de courant continu, comme une batterie, pour générer un courant alternatif de tension et de fréquence spécifiques.

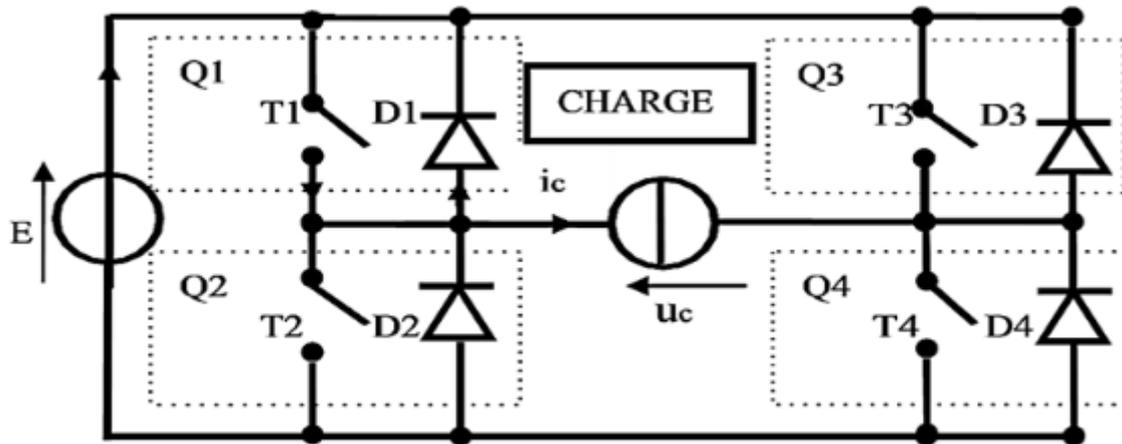


Figure I.5 : Onduleur de tension en pont commande Monophasé.

I.3 Classification des onduleurs

Les onduleurs, souvent utilisés dans les domaines de l'électronique de puissance et des systèmes d'alimentation électrique, sont des dispositifs cruciaux pour la conversion de courant continu en courant alternatif. Comme mentionné, il existe une vaste gamme de schémas d'onduleurs, chacun conçu pour répondre à des besoins spécifiques en termes d'application ou de performances.

L'une des principales classifications des onduleurs se fait en fonction des modes de commutation de leurs interrupteurs. Cette classification divise généralement les onduleurs en deux grandes familles : les onduleurs non autonomes et les onduleurs autonomes.

I.3.1 Onduleurs non autonomes

C'est le nom donné au montage redresseur tout thyristors qui en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur. À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternative, cyclo-convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO [4]. [5].

I.3.1.1 Avantages et inconvénients

I.3.1.1.1 Avantages

- Protection immédiate : Les onduleurs non autonomes offrent une protection immédiate contre les fluctuations de tension et les coupures de courant, car ils sont toujours connectés à l'alimentation électrique.
- Stabilité de la tension de sortie : Ces onduleurs maintiennent généralement une tension de sortie stable même en cas de variation de tension d'entrée, ce qui est crucial pour les équipements sensibles.
- Isolation contre les surtensions : Ils fournissent une isolation contre les surtensions et les pics de tension, ce qui peut protéger vos appareils électroniques contre les dommages.
- Conversion efficace de l'énergie : Les onduleurs non autonomes sont souvent très efficaces dans la conversion de l'énergie, minimisant les pertes et assurant une alimentation continue à vos appareils.

I.3.1.1.2 Inconvénients

- Coût : Ils sont généralement plus coûteux que les onduleurs autonomes en raison de leur conception plus complexe et de leur technologie avancée.
- Complexité de l'installation : Leur installation peut être plus complexe en raison de la nécessité de les connecter en permanence à une source d'alimentation électrique.
- Sensibilité à la qualité de l'alimentation : Ces onduleurs peuvent être sensibles à la qualité de l'alimentation électrique, ce qui signifie qu'ils pourraient ne pas fonctionner correctement dans des environnements où la qualité de l'alimentation est médiocre.
- Perte d'efficacité à pleine charge : À pleine charge, les onduleurs non autonomes peuvent devenir moins efficaces, ce qui se traduit par une augmentation de la consommation d'énergie et une génération de chaleur supplémentaire.

I.3.2 Onduleurs autonomes

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des IGBT's ou d'autres semi-conducteurs, dans ce cas, nous commandons la fréquence de l'onde de tension de sortie [4]. [5].

I.3.2.1 Avantages et inconvénients

I.3.2.1.1 Avantages

- Indépendance énergétique : Les onduleurs autonomes fonctionnent indépendamment du réseau électrique principal, ce qui leur permet de fournir une alimentation continue même en cas de panne de courant.
- Flexibilité d'utilisation : Leur capacité à fonctionner sans nécessiter une source d'alimentation externe les rend adaptés à une variété d'applications, y compris les systèmes de secours pour les infrastructures critiques et les applications hors réseau.
- Contrôle de la fréquence et de la tension : Ces onduleurs permettent souvent un contrôle précis de la fréquence et de la tension de sortie, ce qui les rend adaptés à des applications sensibles nécessitant une alimentation stable.
- Efficacité énergétique : Grâce à leur conception optimisée, les onduleurs autonomes peuvent être très efficaces dans la conversion de l'énergie, minimisant les pertes et réduisant ainsi la consommation d'énergie.

I.3.2.1.2 Inconvénients

- Coût initial élevé : Les onduleurs autonomes sont généralement plus coûteux à l'achat en raison de leur technologie avancée et de leur capacité à fonctionner de manière autonome.
- Maintenance requise : Ils peuvent nécessiter une maintenance régulière pour garantir un fonctionnement optimal, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires et une interruption potentielle de service lors des opérations de maintenance.
- Complexité d'installation : Leur installation peut être plus complexe que celle des onduleurs non autonomes en raison de leur intégration avec des systèmes de stockage d'énergie ou des générateurs de secours.
- Dépendance aux batteries : Dans le cas des onduleurs autonomes utilisant des batteries, la durée de fonctionnement est limitée par la capacité de stockage de ces batteries, ce qui peut limiter leur utilisation dans des situations de panne prolongée de courant.

I.3.3 Onduleurs à résonance

Les onduleurs à résonance, qu'ils soient de tension ou de courant, sont des dispositifs conçus pour fonctionner dans des conditions spécifiques où chaque alternance est configurée en créneau. Ils sont principalement adaptés à des charges constituées de circuits oscillants peu

amortis. Leur fonctionnement repose sur la commande des interrupteurs à une fréquence proche de celle de résonance de la charge. En cas de variation de cette dernière, une adaptation de la fréquence de commande s'avère nécessaire. Ainsi, contrairement aux onduleurs conventionnels, ces dispositifs nécessitent une régulation pilotée par les caractéristiques de la charge, les rendant dépendants de celle-ci et non plus autonomes.

I.3.3.1 Avantages et inconvénients

I.3.3.1.1 Avantages

- Efficacité élevée : Les onduleurs à résonance peuvent offrir une efficacité élevée dans la conversion de l'énergie électrique en raison de leur conception optimisée pour minimiser les pertes d'énergie.
- Faible distorsion harmonique : Ils ont tendance à produire une distorsion harmonique minimale dans le courant de sortie, ce qui les rend adaptés à certaines applications sensibles aux perturbations électromagnétiques.
- Réduction des interférences électromagnétiques : Leur conception peut réduire les émissions d'interférences électromagnétiques, ce qui peut être avantageux dans les applications où la compatibilité électromagnétique est importante.
- Compatibilité avec les charges non linéaires : Ils peuvent être adaptés pour fonctionner efficacement avec des charges non linéaires, telles que celles rencontrées dans les systèmes de communication et les systèmes électroniques.

I.3.3.1.2 Inconvénients

- Complexité de conception : Les onduleurs à résonance peuvent être plus complexes à concevoir et à mettre en œuvre que certains autres types d'onduleurs en raison de leur configuration spécifique.
- Sensibilité aux variations de charge : Ils peuvent être sensibles aux variations de charge, ce qui peut nécessiter des dispositifs de régulation supplémentaires pour maintenir des performances stables dans différentes conditions de charge.
- Coût potentiellement plus élevé : En raison de leur conception plus complexe et de leurs exigences spécifiques en termes de composants, les onduleurs à résonance peuvent parfois être plus coûteux à produire que d'autres types d'onduleurs.

- Limitations de puissance : Dans certains cas, les onduleurs à résonance peuvent avoir des limitations de puissance par rapport à d'autres topologies d'onduleurs, ce qui peut restreindre leur utilisation dans certaines applications à haute puissance.

I.4 Types d'onduleurs

I.4.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la figure (I.6) [6].

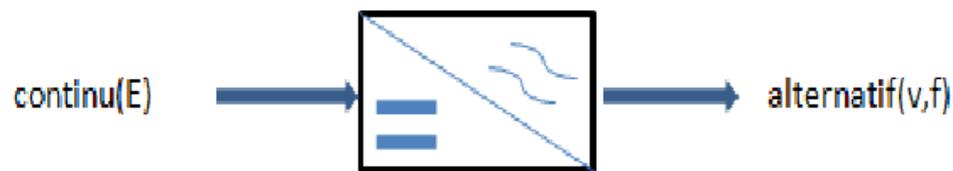


Figure I.6 : Schéma bloc représentatif d'un onduleur.

I.4.2 Onduleurs monophasés

L'onduleur est un convertisseur statique permettant de fabriquer un échange d'énergie entre une source de tension continue fournie par une batterie ou un redresseur, et une source de tension alternative pour alimenter des charges en courant alternatif. La forte évolution de cette fonction s'est appuyée, d'une part sur le développement des composants à semi-conducteur entièrement commandable, puissant et robuste et rapide, et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion [7].

I.4.2.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé

I.4.2.1.1 Onduleur en demi-pont

Le principe de l'onduleur monophasé en demi-pont peut être expliqué à partir de la figure (I.7), on dispose d'une source de tension continue à point milieu et de 2 interrupteurs, et une charge.

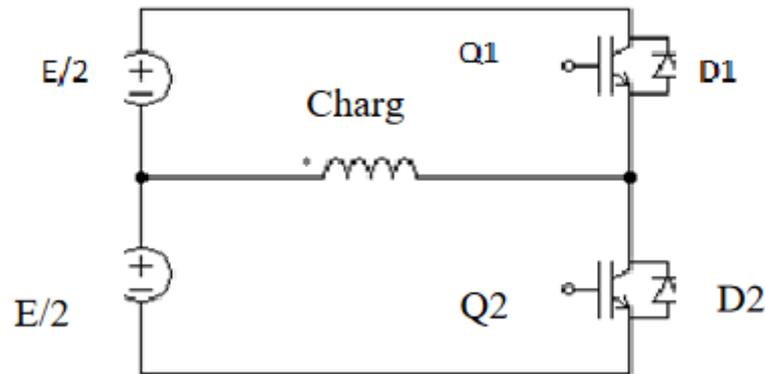


Figure I.7 : Onduleur en demi-pont.

I.4.2.1.2 Onduleur monophasé en pont

Afin d'éviter la nécessité d'une source à point milieu et de doubler la tension de sortie, un onduleur en pont (illustré à la figure I.8) est utilisé. Dans ce cas, les transistors Q1 et Q2 sont commandés pendant une demi-période, tandis que les transistors Q3 et Q4 sont activés durant le reste de la période.

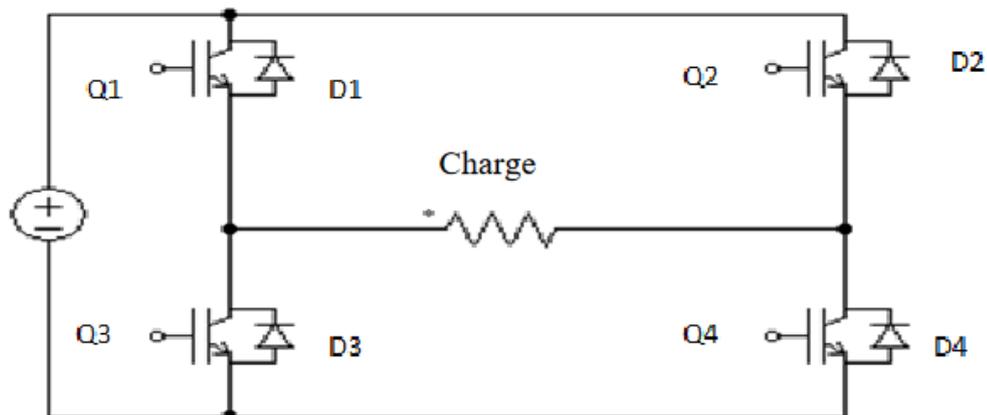


Figure I.8 : Onduleur monophasé en pont.

I.4.3 Onduleur triphasé

Un onduleur triphasé est un dispositif électronique qui convertit une source de courant continu (DC) en courant alternatif (AC) triphasé. Il est principalement utilisé pour alimenter des moteurs triphasés ou d'autres charges triphasées à partir d'une source DC. L'onduleur triphasé fonctionne en générant trois signaux de sortie AC déphasés de 120 degrés les uns par rapport aux autres, ce qui permet de produire un système de tension triphasée équilibré. Ce type

d'onduleur est constitué de plusieurs cellules de commutation qui sont contrôlées de manière à synthétiser les formes d'onde AC nécessaires pour l'application spécifique.

I.4.3.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé

I.4.3.1.1 Onduleur triphasé en pont

L'onduleur triphasé en pont se compose de trois cellules de commutation, comme illustré à la figure (I.9). Il présente une structure différentielle évidente, dans laquelle les tensions triphasées sont obtenues de manière composée sur les trois bornes de sortie.

L'onduleur triphasé doit évidemment, en régime nominal, délivrer un système de tension dont les composantes fondamentales forment un système équilibré [8].

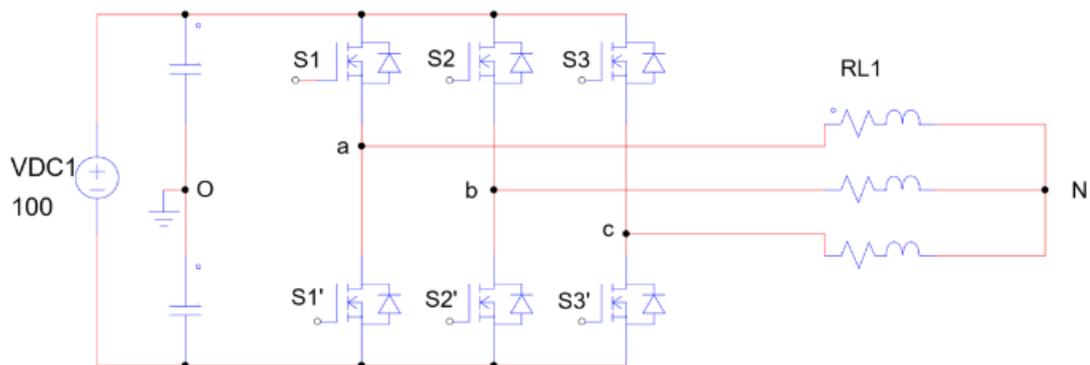


Figure I.9 : Onduleur triphasé.

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs [9].

- Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode [9].
- La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur [9].
- Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b , I_c , les interrupteurs S_1 , S_1' et S_2 , S_2' , S_3 et S_3' doivent être complémentaires deux à deux [9].

I.5 Différences entre un onduleur monophasé et triphasé

Il existe deux types d'onduleurs en ligne : monophasé et triphasé. Toutefois, des différences substantielles distinguent l'onduleur monophasé de l'onduleur triphasé, comme présenté ci-dessous :

Critère	Onduleur monophasé	Onduleur triphasé
Nombre de phases	1 phase	3 phases
Tension de sortie	Unique tension de sortie	Trois tensions de sortie déphasées de 120°
Applications	Appareils domestiques, petits systèmes	Applications industrielles, moteurs triphasés
Complexité de conception	Relativement simple	Plus complexe
Coût	Moins coûteux	Plus coûteux
Efficacité énergétique	Généralement moins efficace pour grandes puissances	Généralement plus efficace pour grandes puissances
Stabilité de puissance	Moins stable pour charges fluctuantes	Plus stable et équilibré
Utilisation typique	Petits équipements électroniques, charges légères	Moteurs industriels, systèmes de distribution
Taille et poids	Plus petit et léger	Plus grand et plus lourd

Tableau I.1 : Différences entre un onduleur monophasé et triphasé.

I.6 Applications des onduleurs

Les onduleurs sont des dispositifs essentiels dans de nombreuses applications où la conversion efficace et fiable de courant est nécessaire. Leur utilisation s'étend à une variété de domaines. En offrant la capacité de convertir le courant continu en courant alternatif, les onduleurs jouent un rôle crucial dans la fourniture d'une alimentation électrique stable et de haute qualité dans divers environnements.

I.6.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse d'un moteur synchrone est intrinsèquement déterminée par la fréquence des courants statiques auxquels il est soumis. Ainsi, pour effectuer un changement de vitesse, il est impératif de modifier la fréquence des tensions d'alimentation appliquées au moteur. Cette adaptation nécessite initialement le redressement de la tension provenant du réseau électrique, suivie de son ondulation à la fréquence désirée. La figure (I.10) illustre le processus de réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone conformément à cette méthodologie.

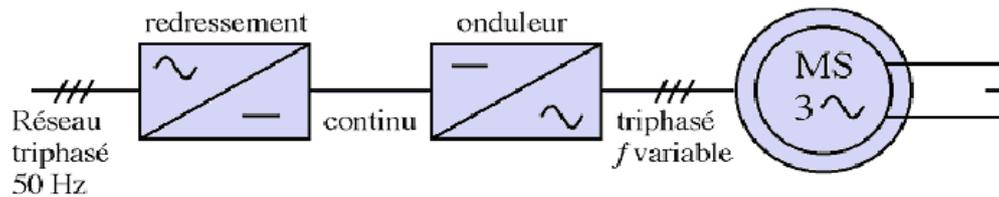


Figure I.10 : Régulation de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.

Remarque : pour que la puissance du moteur reste nominale lorsque la fréquence varie, il faut en fait conserver le rapport (f/V) constant. (Si la fréquence augmente, il faut augmenter la tension d'alimentation proportionnellement).

I.6.2 Alimentation de secours UPS

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [10].

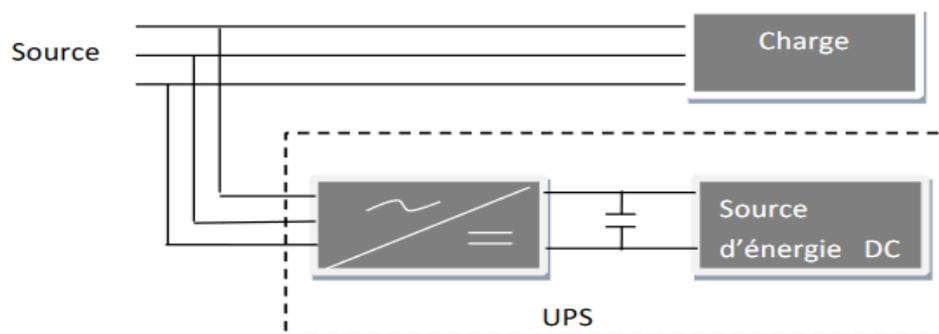


Figure I.11 : Alimentation de secours.

I.6.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

Dans cette situation, l'utilisation d'onduleurs facilite l'interconnexion de deux réseaux électriques opérant à des fréquences distinctes. Ainsi, pour assurer cette connexion, il est nécessaire d'ajuster la fréquence à travers l'utilisation d'un onduleur.

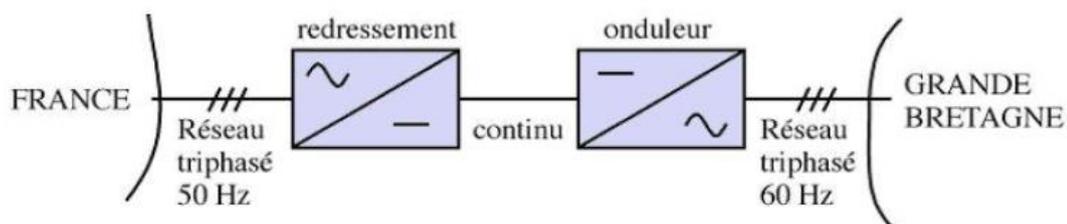


Figure I.12 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.

I.6.4 Applications relatives aux transports

I.6.4.1 Transports ferroviaires

Dans ce mode de transport spécifique, la composante principale qui génère le mouvement est la machine asynchrone. Pour réguler la vitesse de rotation de ces machines, il est nécessaire de modifier la fréquence de l'alimentation électrique. Cette opération est réalisée grâce à un onduleur de tension, tel que celui illustré dans l'exemple présenté dans la figure (I.13), utilisé notamment dans les TGV ou les tramways.

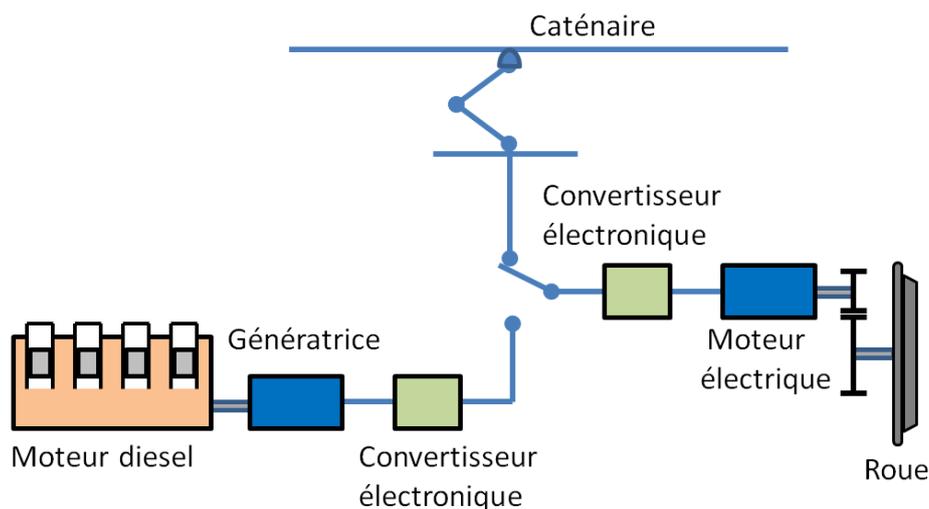


Figure I.13 : Chaîne de traction bi-mode.

I.6.4.2 Transports aériens

Dans l'aviation, chaque aéronef est doté d'un système autonome de production d'énergie électrique destiné à alimenter ses équipements internes. Par exemple, sur l'Airbus A380, un réseau de bord spécifique opère à une fréquence variant entre 380 Hz et 800 Hz, rendue possible grâce à l'utilisation d'onduleurs. Ces dispositifs jouent un rôle crucial en fournissant une alimentation électrique fiable et stable, essentielle pour le bon fonctionnement de l'aéronef en vol.

I.6.4.3 Transports maritimes

Tout comme dans le secteur des transports aériens, la production d'énergie pour les équipements de bord est cruciale pour assurer le fonctionnement sûr et efficace des systèmes embarqués. Ces équipements dépendent d'une alimentation électrique fiable pour maintenir les opérations vitales, nécessitant une planification minutieuse et des systèmes de secours pour garantir la disponibilité continue de l'énergie.

I.7 Avantages et inconvénients des onduleurs

I.7.1 Avantages

- Alimentation de secours : L'avantage principal des onduleurs est de fournir une alimentation électrique de secours en cas de panne de courant, ce qui permet de maintenir le fonctionnement des équipements critiques comme les ordinateurs, les serveurs, les équipements médicaux, etc.
- Protection contre les fluctuations de tension : Les onduleurs stabilisent la tension électrique, protégeant ainsi les équipements sensibles des dommages causés par les variations de tension ou les surtensions.
- Temps de bascule : Certains onduleurs offrent un temps de bascule très court, voire nul, ce qui garantit une transition transparente vers l'alimentation de secours sans interruption de service.
- Filtrage du bruit électrique : Les onduleurs peuvent également filtrer le bruit électrique et les interférences, assurant ainsi une alimentation électrique propre aux équipements connectés.

I.7.2 Inconvénients

- Coût initial : Les onduleurs peuvent être coûteux à l'achat, en particulier pour les modèles haut de gamme offrant des fonctionnalités avancées comme une capacité de stockage d'énergie élevée ou une gestion intelligente de l'alimentation.
- Entretien et remplacement des batteries : Les onduleurs utilisent des batteries rechargeables qui ont une durée de vie limitée et doivent être remplacées périodiquement, ce qui peut entraîner des coûts et nécessite un entretien régulier.
- Perte d'efficacité : Certains onduleurs peuvent avoir une efficacité énergétique relativement faible, ce qui signifie qu'ils peuvent consommer une quantité significative d'électricité lorsqu'ils sont en veille ou en fonctionnement normal.
- Encombrement et poids : Les onduleurs, en particulier les modèles de grande capacité, peuvent être encombrants et lourds, ce qui peut poser des problèmes d'installation et de manutention, en particulier dans les environnements où l'espace est limité.

I.8 Conclusion

Ce premier chapitre a offert une vue d'ensemble complète et détaillée de l'état de l'art sur les onduleurs, soulignant leur rôle crucial dans la transition vers des sources d'énergie renouvelables. Nous avons débuté par une introduction générale à la transition énergétique, en mettant en lumière l'importance croissante des technologies permettant la production de l'énergie. Cette section a permis de contextualiser les onduleurs photovoltaïques comme une technologie clé dans ce domaine.

La seconde section a exploré les différentes catégories de convertisseurs, fournissant la définition des hacheurs, gradateurs, redresseurs et onduleurs. Cela a établi une base solide pour appréhender la variété des technologies de conversion de puissance disponibles et leurs applications spécifiques.

Nous avons ensuite approfondi la classification des onduleurs, en distinguant les onduleurs non-autonomes, autonomes et à résonance. Cette classification a permis de saisir les divers avantages et inconvénients des onduleurs.

Dans la section dédiée aux types d'onduleurs, une distinction claire a été faite entre les onduleurs monophasés et triphasés, mettant en lumière leurs principes de fonctionnement. Cette distinction a été renforcée par un tableau comparatif, offrant une visualisation concise des différences et facilitant ainsi une compréhension rapide et efficace.

Enfin, nous avons examiné les avantages et inconvénients des onduleurs, cette analyse critique a été suivie par une exploration des diverses applications des onduleurs, démontrant leur polyvalence et leur importance.

II.1 Introduction

L'onduleur autonome est un convertisseur continu-alternatif servant à produire une tension alternative à partir d'une source de tension continue. Il a la particularité de ne pas avoir besoin d'un signal électrique en entrée pour fonctionner, ce qui permet une alimentation permanente. Comme tous les onduleurs électriques, l'onduleur autonome est utilisé dans le cadre d'un redressement de tension d'alimentation [11].

Dans ce chapitre, nous examinons en détail les différentes facettes des onduleurs autonomes, en commençant par une définition précise de ce qu'est un onduleur autonome. Par la suite, nous étudierons les divers types d'onduleurs autonomes.

On présentera une comparaison approfondie entre les onduleurs autonomes et les onduleurs classiques, afin de mieux appréhender les avantages et les inconvénients de chaque technologie. On abordera également les différents modes de fonctionnement des onduleurs autonomes.

Les tendances actuelles et futures des onduleurs autonomes feront l'objet d'une attention particulière, avec une analyse des innovations technologiques.

Le chapitre se poursuivra par une étude détaillée des composants des onduleurs autonomes, y compris leur structure, les différentes batteries employées et les avancées récentes dans le domaine du stockage de l'énergie. Nous aborderons ensuite les sources d'énergie renouvelable intégrées, telles que les panneaux photovoltaïques et les éoliennes.

Une section sur le fonctionnement et les modes de gestion de l'énergie. Nous étudierons aussi les diverses méthodes de gestion de l'énergie, allant de la gestion domestique à la gestion industrielle, en passant par les transports et les réseaux électriques intelligents.

Enfin, nous explorerons les divers algorithmes de contrôle qui améliorent le fonctionnement des onduleurs autonomes, ainsi que les avantages et les limitations de ces systèmes.

II.2 Les onduleurs autonomes

II.2.1 Définition d'un onduleur autonome

Un onduleur autonome, également appelé onduleur indépendant ou onduleur off-grid, est un convertisseur statique assurant la transformation continu-alternatif pour alimenter des récepteurs fonctionnant en courant alternatif, il est capable de fonctionner de manière indépendante du réseau électrique principal. Ces onduleurs sont spécifiquement développés pour des utilisations où il n'y a pas de connexion avec le réseau électrique ou où l'on désire une autonomie énergétique totale.

Contrairement à l'onduleur non autonome ou relié à un réseau alternatif qui lui impose la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie, l'onduleur autonome détermine lui-même la fréquence et la forme d'onde de la tension alternative fournie au récepteur.

Les onduleurs autonomes sont constitués par des interrupteurs de puissance (MOSFET, IGBT, thyristors...) qui sont pilotés par des différents types de commande en vue d'obtenir des formes des tensions et des courants qui sont proches de la forme sinusoïdale.



Figure II.1 : Onduleur autonome.

II.2.2 Types d'onduleurs autonomes

En fonction du type d'onde de sortie, il existe trois types d'onduleurs :

II.2.2.1 Onduleur à onde carrée

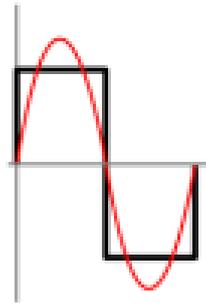


Figure II.2 : Onduleur à onde carrée.

Comme leur nom l'indique, ces onduleurs délivrent un signal de type carré. Ils sont moins chers mais moins efficaces. En outre, ils ne sont pas adaptés pour des moteurs à induction en raison de la grande quantité d'harmoniques qu'ils génèrent (bruits dans la forme d'onde due à la fluctuation de tension et d'intensité) [12].

II.2.2.2 Onduleur à onde pseudo sinusoïdale

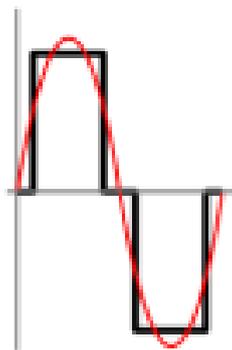


Figure II.3 : Onduleur à onde pseudo sinusoïdale.

Ils sont plus sophistiqués et plus chers que ceux à onde carrée. La largeur de l'onde modifiée pour la rapprocher le plus possible d'une onde sinusoïdale. La sortie n'est pas encore une sinusoïde pure, mais elle en est proche. En outre, le contenu des harmoniques est moindre que pour l'onde carrée.

Par conséquent, ce sont les onduleurs qui ont le meilleur rapport qualité prix pour la connexion des charges d'éclairage [12].

II.2.2.3 Onduleur à onde sinusoïdale pure

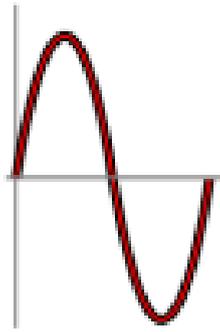


Figure II.4 : Onduleur à onde sinusoïdale pure.

Ces onduleurs peuvent obtenir une onde sinusoïdale pure et un rendement supérieur à 90%. C'est pourquoi, les onduleurs à onde sinusoïdale sont les plus impliqués pour alimenter des charges qui requièrent une onde sinusoïdale pure, comme par exemple les moteurs à induction.

Aujourd'hui, l'électronique a permis que le coût de fabrication de ces onduleurs soit compétitif pour tout autre type de charge, c'est pourquoi ce sont les plus utilisés [12].

II.2.3 Comparaison avec les onduleurs classiques

Caractéristique	Onduleurs Autonomes	Onduleurs Classiques
Définition	Appareils convertissant l'énergie d'une batterie ou d'une source d'énergie renouvelable directement en courant alternatif (CA).	Appareils convertissant le courant continu (CC) d'une batterie en courant alternatif (CA), principalement utilisés en tant que source d'alimentation de secours.
Source d'alimentation	Batteries, panneaux solaires, éoliennes, etc.	Batteries uniquement
Usage principal	Utilisés principalement dans les systèmes de production d'énergie renouvelable pour fournir une alimentation continue et autonome.	Utilisés comme source de secours pour les appareils critiques lors de coupures de courant.

Mode de fonctionnement	Fonctionnement continu, capable de fonctionner indépendamment du réseau électrique.	Fonctionnement intermittent, activé principalement en cas de panne de courant.
Coût initial	Généralement plus élevé en raison des composants additionnels et des fonctionnalités avancées.	Coût initial souvent moins élevé comparé aux onduleurs autonomes.
Capacité de stockage	Nécessite des batteries de grande capacité pour un fonctionnement autonome prolongé.	Utilise des batteries de capacité variable, souvent limitées pour une utilisation de secours à court terme.
Maintenance	Entretien régulier nécessaire, surtout pour les systèmes utilisant des sources renouvelables.	Entretien moindre, principalement lié à la vérification et au remplacement des batteries.

Tableau II.1 : Comparaison avec les onduleurs classiques.

II.2.4 Modes de fonctionnement

II.2.4.1 Mode priorité solaire

Dans ce mode, la puissance CC générée est optimisée, convertie puis utilisée pour alimenter directement les charges connectées. Si la production solaire est insuffisante pour répondre aux demandes de charge, l'onduleur tire de l'énergie supplémentaire de la batterie ou du réseau. L'excédent d'énergie solaire, lorsqu'il est disponible, est utilisé pour charger la batterie, avant que tout excédent ne soit injecté dans le réseau à l'aide de la facturation nette.

II.2.4.2 Mode priorité à la batterie

L'onduleur utilise en priorité l'énergie stockée dans la batterie pour alimenter les charges connectées, tandis que l'énergie solaire générée est utilisée pour charger la batterie. Si la batterie est complètement chargée, l'énergie excédentaire est injectée dans le réseau.

II.2.4.3 Mode hors réseau

Également connu sous le nom de mode autonome, l'onduleur fonctionne indépendamment du réseau, alimentant les charges à l'aide de l'énergie solaire et de la batterie stockée.

II.2.4.4 Mode d'alimentation de secours

L'onduleur passe à ce mode en cas de panne de réseau et de panne du système solaire. Il tire l'énergie de la batterie pour alimenter les charges essentielles. Une fois tout restauré, l'onduleur revient automatiquement à son mode précédent.

II.2.5 Tendances actuelles et futures

II.2.5.1 Tendances Actuelles

II.2.5.1.1 Intégration de l'Intelligence Artificielle et du Machine Learning

Les onduleurs autonomes utilisent de plus en plus l'IA et le machine learning afin d'améliorer la gestion de l'énergie. Ces technologies offrent la possibilité de prédire la consommation d'énergie, de gérer les sources d'énergie de manière dynamique, et d'améliorer l'efficacité globale du système.

II.2.5.1.2 Hybridation et Polyvalence

Les onduleurs hybrides sont de plus en plus prisés, car ils peuvent gérer à la fois des systèmes connectés au réseau et des systèmes autonomes. Ces dispositifs offrent une plus grande flexibilité et une utilisation améliorée des ressources énergétiques renouvelables.

II.2.5.1.3 Efficacité Énergétique et Réduction des Pertes

L'amélioration continue de l'efficacité des onduleurs grâce à des matériaux avancés comme le carbure de silicium (SiC) et le nitrure de gallium (GaN) réduit les pertes énergétiques et augmente la performance.

II.2.5.1.4 Intégration de Stockage Énergétique

La norme est désormais celle des systèmes qui intègrent des batteries et d'autres solutions de stockage énergétique, offrant ainsi une autonomie accrue et une gestion améliorée des pics de demande et des variations de production.

II.2.5.2 Tendances Futures

II.2.5.2.1 Systèmes Autonomes et Autogérés

Les onduleurs à venir seront encore plus autonomes, en utilisant des algorithmes sophistiqués pour s'optimiser, se réparer et se gérer eux-mêmes. Ces systèmes pourront effectuer des choix en temps réel afin d'optimiser l'efficacité énergétique et la fiabilité.

II.2.5.2.2 Sécurité et Cybersécurité

En raison de l'augmentation de la connectivité et de l'utilisation des technologies IoT, il sera crucial de prendre en compte la sécurité et la cybersécurité des onduleurs. Les systèmes à venir incluront des mesures de sécurité avancées pour protéger contre les cybermenaces.

II.2.5.2.3 Énergie Propre et Décentralisée

La transition vers des sources d'énergie renouvelables et décentralisées va s'accélérer. Il sera crucial d'utiliser des onduleurs autonomes afin d'intégrer l'énergie solaire, éolienne et d'autres sources renouvelables dans les systèmes énergétiques locaux.

II.2.5.2.4 Adaptation aux Changements Climatiques

L'adaptation des onduleurs autonomes aux conditions météorologiques extrêmes et aux variations climatiques sera nécessaire. Cela impliquera l'utilisation de conceptions plus robustes et de capacités de gestion de l'énergie plus flexibles afin d'assurer une alimentation électrique stable même en cas de catastrophe naturelle.

II.3 Les Composants des Onduleurs autonomes

II.3.1 Architecture des onduleurs autonomes

II.3.1.1 Source de Courant Continu (DC)

Panneaux Solaires : Capturent l'énergie solaire et la convertissent en électricité DC.



Figure II.5 : Panneau photovoltaïque.

Batteries : Stockent l'énergie pour une utilisation ultérieure.



Figure II.6 : Batterie.

Générateurs : Produisent de l'électricité DC via des moyens mécaniques.



Figure II.7 : Générateur DC.

II.3.1.2 Convertisseur DC-DC

Régule et optimise la tension DC avant de la transférer à l'onduleur DC-AC. Peut inclure des régulateurs de charge pour gérer le flux d'énergie vers et depuis les batteries.

II.3.1.3 Onduleur DC-AC

Convertit le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) de la qualité et de la fréquence requises (souvent 50 Hz ou 60 Hz).

Utilise des commutateurs électroniques tels que les transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) pour générer un signal AC.

II.3.1.4 Contrôleur de Système

Supervise l'ensemble du système, y compris la gestion de la charge des batteries, la surveillance des performances et la protection contre les surtensions ou les décharges profondes.

Utilise des algorithmes de gestion d'énergie pour optimiser l'utilisation des sources d'énergie et la durée de vie des batteries.

II.3.1.5 Filtres

Filtrent les harmoniques et les bruits électriques pour produire une sortie AC propre et stable. Peuvent inclure des filtres LC (Inductance-Capacité) ou des transformateurs.

II.3.1.6 Systèmes de Sécurité et de Protection

Protection contre les courts-circuits, les surcharges, les surchauffes et les inversions de polarité. Fusibles, disjoncteurs et relais pour isoler et protéger les composants critiques.

II.3.2 Schéma de base

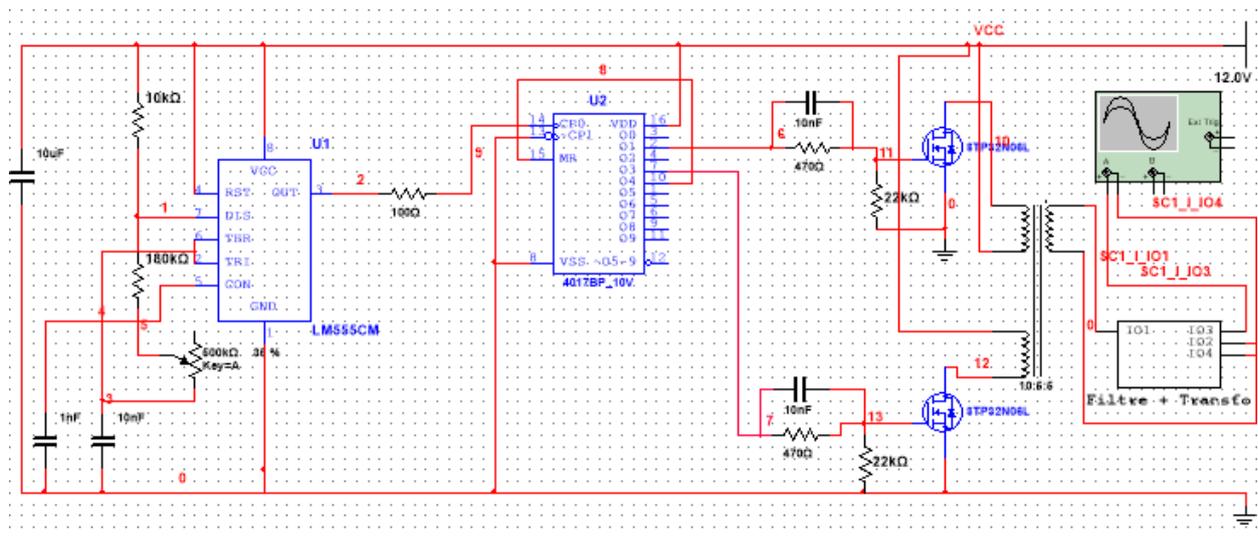


Figure II.8 : Schéma de base d'un onduleur autonome.

II.3.3 Technologies de stockage

Les technologies de stockage adaptées aux systèmes embarqués sont évidemment plus limitées pour des raisons de volume et de poids.

Les techniques suivantes permettent un stockage à long terme d'énergie d'origine électrique, sur une durée supérieure à la dizaine de minutes et pouvant atteindre plusieurs mois :

- Pompage hydraulique, stockage gravitaire utilisé à grande échelle dans les réseaux électriques ;
- Stockage thermique, sous forme de chaleur sensible (sans changement d'état) ou de chaleur latente (avec changement d'état) ;
- Stockage sous forme d'énergie de pression au moyen d'air comprimé ;
- Batteries d'accumulateurs électrochimiques se déclinant sous différentes variantes ;
- Stockage d'hydrogène obtenu par électrolyse et utilisation d'une pile à combustible pour restituer l'électricité.

Les techniques suivantes permettent un stockage à court terme d'énergie d'origine électrique, de la seconde à quelques dizaines de minutes :

- Stockage d'énergie cinétique dans une masse tournante appelée volant d'inertie ;
- Stockage d'énergie magnétique dans des bobinages supraconducteurs (SMES) ;
- Stockage d'énergie électrique dans des supercondensateurs.

La Figure II.9 montre de façon synthétique quelles sont les principales fonctions présentes dans un système de stockage d'énergie électrique générique [13]. Ce synoptique met en évidence un bloc « forme intermédiaire d'énergie » qui représente le réservoir, c'est-à-dire la partie stockant « réellement » l'énergie ou plutôt celle correspondant à un changement d'état interne à haut niveau de réversibilité. Un ou plusieurs convertisseurs d'interface avec le monde électrique sont alors nécessaires pour réaliser les transferts lors des phases de charge (stockage) et décharge (déstockage).

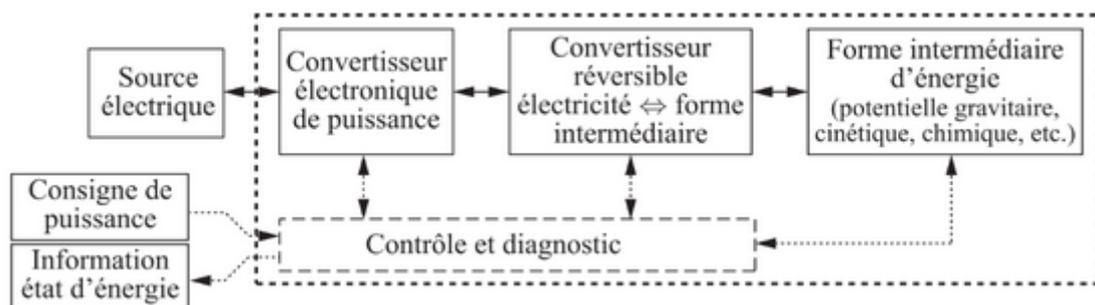


Figure II.9 : Synoptique des constituants d'un système de stockage (réversible) d'électricité ainsi que son contrôle et son diagnostic [13].

Un convertisseur électronique de puissance est souvent requis pour bien adapter la forme d'énergie électrique des convertisseurs d'interface précédemment décrits à celle nécessaire au fonctionnement du système électrique global, généralement une source de tension alternative sinusoïdale à fréquence fixe (AC) ou une source continue de valeur sensiblement constante (DC). Il joue un rôle majeur en assurant avec un excellent rendement, les conversions nécessaires, par exemple, pour permettre le fonctionnement à vitesse variable de la machine électrique, ou encore les charges et décharges sous tension ou courant variable respectivement d'un condensateur ou d'une inductance.

Enfin, un système de contrôle électronique est nécessaire pour assurer les nombreuses fonctions indispensables telles que le contrôle des conversions (régulation du couple de la machine à vitesse variable, du courant et/ou de la tension, etc.), mais aussi pour garantir la sécurité (surveillance, équilibrages d'éléments en série, etc.) et surtout pour renseigner l'utilisateur sur l'état de charge SoC (State of Charge), auquel on préfère de plus en plus fréquemment, l'état d'énergie SoE (State of Energy).

Il apparaît alors clairement que le dimensionnement d'un système (complet) de stockage comprend une partie associée à la capacité énergétique et une autre à la puissance maximale (parfois asymétrique entre charge et décharge).

II.3.3.1 Types de batteries utilisées

II.3.3.1.1 Batteries au plomb-acide :

Très utilisé dans l'industrie automobile basée sur des moteurs thermiques, ce type d'accumulateur relève d'une technologie mature (Figure II.10). Connues depuis plus de 100 ans, ces batteries demeurent compétitives par leur coût. On en distingue deux types : les accumulateurs au plomb ouvert et les accumulateurs à recombinaison de gaz. Les premiers ont une durée de vie plus importante allant de 5 à 15 ans. Ils sont moins chers et moins sensibles à la température que les seconds qui ne nécessitent aucun entretien et émettent de très faibles quantités de gaz. Technologie la moins chère du marché, ces accumulateurs ont l'inconvénient d'offrir un faible nombre de cycle charge/décharge (500 à 1 000 cycles profonds) et une capacité massique assez faible (de l'ordre de 30 à 40 Wh/kg). L'installation la plus importante, située à Chino en Californie, a une capacité de 40 MWh et une puissance de 10 MW. Le rendement du stockage est typiquement de l'ordre de 70 % [14], mais il dépend fondamentalement des régimes de charge et décharge et peut donc être plus élevé.



Figure II.10 : Batteries au plomb Energysys : 24 unité, tension nominale de 48V, courant nominal de 200A, puissance de 10kW, capacité de 1000Ah (L2EP AMPT Lille).

II.3.3.1.2 Batteries lithium-ion :

Les batteries lithium-ion utilisent la circulation d'ions Li^+ d'une électrode négative, généralement en graphite, vers un oxyde de métal de transition (manganèse ou dioxyde de cobalt) pour générer un courant lors de la décharge (Figure II.11). L'avantage de cette technologie est la densité d'énergie massique et volumique qu'elle offre (entre 80 et 150 Wh/kg) supérieure de plus de cinq fois à celles de batteries classiques au plomb. Par ailleurs, ces batteries subissent une autodécharge relativement faible par rapport à d'autres accumulateurs et nécessitent peu de maintenance. Leur nombre annoncé de cycles profonds de charge/décharge varie entre 1000 et 4000 ; il peut être beaucoup plus élevé pour des profondeurs de décharge plus faible. Cependant leur coût élevé est un élément pénalisant encore leur compétitivité. De même, la recyclabilité et l'élimination en fin de vie sont d'autres axes d'études présentent des marges de progrès notable [14].



Figure II.11 : Batteries Li-ion Saft : tension nominale 48V, courant de charge 32A, courant de décharge 44A, énergie 3900Wh, énergie massique 130Wh/Kg (L2EP HEI Lille).

On distingue aujourd'hui 3 technologies principales [15] :

La technologie lithium-ion (Li-ion), où le lithium reste à l'état ionique grâce à l'utilisation d'un composé d'insertion aussi bien à l'électrode négative (généralement en graphite) qu'à l'électrode positive (dioxyde de cobalt, manganèse, phosphate de fer). Les batteries Li-ion offrent une densité énergétique importante en moyen de 150 Wh/kg, ont un faible taux d'autodécharge, pas d'effet de mémoire et ne nécessitent pas de maintenance. Afin de ralentir leur vieillissement, il est préférable de les utiliser avec une faible profondeur de décharge. Des risques d'explosion existent si elles sont rechargées dans de mauvaises conditions, c'est pourquoi les constructeurs prévoient un système de sécurité adapté (Batterie Management Système, BMS) pour ces batteries.

La technologie lithium-ion polymère (Li-Po), où le matériau des électrodes est identique à la technologie lithium-ion mais dans laquelle l'électrolyte est composé de gel polymère. Les batteries Li-Po ont un poids plus faible et sont plus sûres que les batteries Li-ion, mais elles sont aussi plus coûteuses.

La technologie lithium métal polymère (LMP) où l'électrode négative est composée de lithium métallique. Les batteries LMP ont une densité énergétique de 110 Wh/kg environ, sans être entièrement solide, réduisant le risque d'explosion, sans effet mémoire, mais fonctionnant de façon optimale à une température élevée, de 85 °C.

II.3.3.1.3 Batteries sodium-soufre :

La technologie sodium-soufre (NAS) fonctionne avec des électrodes liquides. Pour cela, elle doit être maintenue à une température comprise entre 290 °C et 350 °C. Les électrodes, siège des réactions électrochimiques, sont en sodium et en soufre liquide. L'électrolyte séparant les deux électrodes est constitué de céramique, ce qui garantit une bonne conduction des ions. La durée de vie peut atteindre 15 ans et plus de 4000 cycles en condition non critique (décharge inférieure à 80%).

La filière sodium-soufre peut être utilisée pour des grandes capacités (plusieurs MW et plusieurs MWh avec une constante de temps typique de 7 heures), ce qui permet d'y recourir pour des systèmes de stockage en soutien aux réseaux électriques. Des batteries NaS ont été installées sur l'île de la Réunion (1 MW), au Texas (4 MW) et de nombreuses applications existent au Japon (par exemple, 17 unités de 2 MW, soit 34 MW avec une capacité totale de 244,8 MWh et un rendement de 75 % associé à une ferme éolienne de 51 MW, Figure II.12). La technologie NaS faisant appel à des matériaux largement disponibles et peu onéreux (sulfure

de sodium, alumine, aluminium) est une solution attractive pour le stockage d'énergie dans les batteries fixes, en charge de la régulation des réseaux ou de l'optimisation du fonctionnement des centrales sur des périodes de plusieurs heures [14].



Figure II.12 : 17 ensembles de 2 MW de batteries NaS au Japon [16].

II.3.3.1.4 Batteries à base de nickel :

Il s'agit des technologies nickel-cadmium (NiCd) et nickel-métal-hydrures (NiMH), qui fournissent, dans les deux cas, une force électromotrice par élément d'environ 1,2 V. Les performances massiques sont jusqu'à deux fois plus élevées que celles du plomb acide et les performances en puissance peuvent être excellentes [13].

Les technologies NiCd, après avoir satisfait la demande en petits accumulateurs pour les applications électroniques grand public, sont aujourd'hui bannies de ce domaine à cause de la toxicité du cadmium et ne sont autorisées que pour des usages professionnels. Actuellement, cette technologie est typiquement utilisée dans les chariots de manutention comme elle l'a été dans les véhicules électriques de la fin du XX^e siècle. De plus, elle a fait objet d'une grande réalisation de soutien au réseau en Alaska, où une batterie nickel-cadmium de 1 000 tonnes peut fournir 40 MW pendant 7 minutes (4,7 MWh) et 27 MW pendant 15 minutes (6,7 MWh).

La technologie NiMH a remplacé partiellement celle de type NiCd sur le marché grand public. Elle permet de se passer du cadmium tout en augmentant l'énergie massique, passant de 60 à 80 Wh/kg, et en doublant quasiment l'énergie volumique. Elle sert également de « batterie de puissance » dans les chaînes de traction hybride de Toyota [13].

II.3.3.1.5 Batteries à circulation d'électrolyte

Les batteries à circulation (flow batteries) permettent de contourner la limitation des accumulateurs électrochimiques classiques dans lesquels les réactions électrochimiques créent des composés solides qui sont stockés directement sur les électrodes où ils se sont formés. La masse qu'il est possible d'accumuler localement est alors forcément limitée, ce qui borne la capacité. Comme illustré Figure II.13 [17], dans les batteries dites à circulation d'électrolyte, les composés chimiques responsables du stockage de l'énergie sont liquides en solution dans l'électrolyte et sont pompés entre les réservoirs et le convertisseur électrochimique proprement dit (stack). Ce dernier est dimensionné en puissance alors que les réservoirs d'électrolyte le sont en énergie.

Actuellement trois technologies ont été développées

- À base de vanadium et acide sulfurique (sociétés VRB, Sumimoto).
- À base de bromure de zinc (plusieurs sociétés dont ZBB).
- À base de bromure de sodium et de polysulfure de sodium (Regenesys), cette dernière technologie semblant être confrontée à des difficultés rédhibitoires.

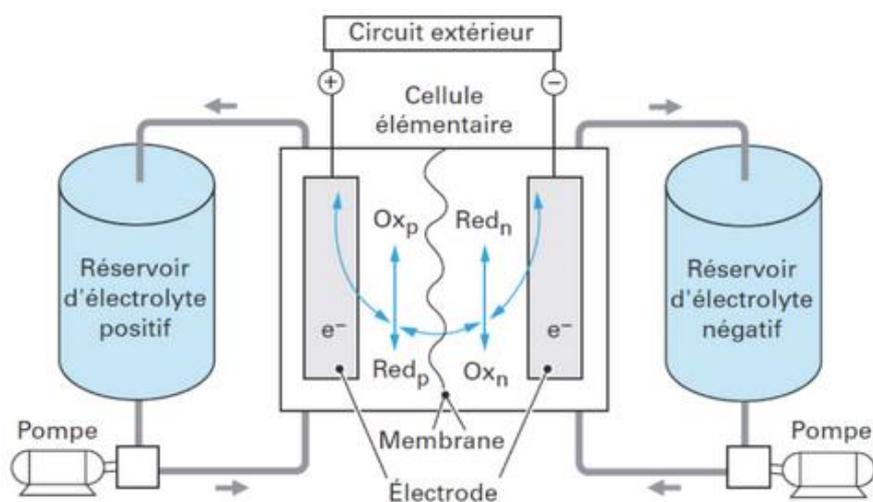


Figure II.13 : Principe des batteries à circulation d'électrolyte [17].

La technologie au vanadium (fem de 1,7 V) semble l'une des plus prometteuses avec une grande durée de vie (plus de 10 000 cycles) et un potentiel de coût relatif à l'énergie stockée très attractif mais lié au cours du vanadium.

Les systèmes de capacité élevée (quelques 100 kWh à quelques 10 MWh) sont en phase expérimentale plus ou moins avancée. Pour donner quelques ordres de grandeurs, le stack d'un système VRB a une puissance massique de 30 W/kg en continu (et 90 W/kg en crête) pour un

rendement sur cycle compris aux alentours de 83% pour des cycles de charge/décharge de quelques heures de période et la densité d'énergie de l'électrolyte est d'environ 15 kWh/m³ [13].

II.3.3.2 Avantages et inconvénients de chaque type

Type de Batterie	Avantages	Inconvénients
Plomb-acide	Coût initial faible. Robustesse. Recyclabilité élevée.	Durée de vie limitée. Entretien régulier. Densité énergétique faible.
Lithium-ion	Haute densité énergétique. Faible taux d'autodécharge. Longue durée de vie. Faible entretien.	Coût élevé. Risques de surchauffe et d'incendie. Recyclage complexe.
Sodium-soufre	Haute densité énergétique. Bonne capacité de cyclage. Matériaux abondants et non toxiques.	Fonctionnement à haute température. Besoin d'isolation thermique et de gestion thermique.
Nickel-cadmium (NiCd)	Robustesse. Tolérance aux abus. Performances stables sur une large plage de températures.	Effet mémoire. Cadmium toxique. Densité énergétique inférieure aux lithium-ion.
Nickel-métal hydrure (NiMH)	Densité énergétique plus élevée que les NiCd. Absence de cadmium toxique. Meilleure performance écologique.	Effet mémoire présent. Autodécharge élevée. Moins de cycles de vie que les lithium-ion.
Flux	Très longue durée de vie. Capacité de décharge profonde. Ajustabilité de la capacité énergétique et de la puissance.	Coût initial élevé. Encombrement. Complexité du système.

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de chaque type de batterie.

II.3.3.3 Innovations récentes dans le stockage de l'énergie

Pour lutter contre le changement climatique, l'Union européenne vise une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40 % et sur une augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique de 32 % d'ici 2030 [18]. Pierre angulaire d'une transition énergétique réussie, la question du stockage de l'énergie est donc plus que jamais au cœur des enjeux.

II.3.3.3.1 La gravité, un phénomène naturel pour stocker l'énergie

Dans un autre registre, des scientifiques ont vu dans l'eau une alternative prometteuse pour accroître le potentiel des énergies renouvelables et augmenter leur rendement [19]. Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), qui utilisent la gravité de l'eau pour produire de l'énergie, constituent une solution intéressante pour contourner l'intermittence des énergies renouvelables. Composées de deux bassins, les stations pompent dans un premier temps l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur lorsque la demande en électricité est faible (et donc à bas prix) pour la stocker jusqu'à ce que la demande croisse. Lorsque la demande augmente, et avec elle le prix de l'électricité, le système, qui permet ainsi d'optimiser les coûts, produit de l'électricité grâce au transfert de l'eau du bassin supérieur vers le bassin inférieur et à sa turbine intégrée. Grâce au double système (pompe-moteur / turbine-alternateur), l'énergie produite participe à maintenir l'équilibre entre la production et la consommation électrique.

D'autres techniques de stockage utilisant la gravité ont vu le jour pour répondre à la demande. Une start-up suisse a développé un système novateur pour stocker de l'énergie renouvelable à bas prix à partir de blocs de béton empilés issus de la récupération de déchets de construction [20]. Le principe est le suivant : grâce à un système de contrôle intelligent, des blocs de béton de 35 tonnes sont levés par des grues pour ériger une tour. L'énergie produite par le gain d'altitude est alors stockée. Puis l'énergie cinétique produite par leur descente au sol alimente une turbine, qui génère à son tour de l'électricité.

II.3.3.3.2 Le sel, un allié prometteur pour la conservation de l'énergie

Plus étonnant encore, certains misent sur les propriétés du sel pour stocker de l'énergie [21]. La technologie, brevetée par une entreprise suédoise, repose sur l'utilisation du sel pour recharger plusieurs milliers de fois une batterie et stocker l'énergie produite durant des semaines, voire des mois, sans perte. Conçue pour les environnements industriels, la batterie,

composée d'oxyde de calcium, enrichie de nano-revêtements (traitement destiné à protéger un matériau pour augmenter sa conservation), évolue et s'adapte ainsi, dans la durée, à l'utilisation qui en est faite.

En principe, l'énergie est stockée chimiquement grâce à la séparation du sel et de l'eau. Des réactions électrochimiques se créent dans le système de la batterie, produisant de la chaleur. En d'autres termes, lorsque l'oxyde de calcium réagit avec l'eau, celui-ci se transforme en hydroxyde de calcium et libère de l'énergie. Inversement, quand l'hydroxyde de calcium est séché, il absorbe la chaleur. La technologie, déjà testée en usine pilote dans une centrale thermique allemande, est capable de stocker dix fois plus d'énergie thermique qu'une batterie traditionnelle [22].

II.4 Sources d'énergie renouvelable intégrées

II.4.1 Panneaux photovoltaïques

Le panneau photovoltaïque (champ photovoltaïque) se compose de plusieurs modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise crête, définie selon des conditions spécifiques d'éclairement et température. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [23].

L'inclinaison joue un rôle très important pour attirer le maximum de flux solaire, les expériences ont montré qu'il suffit incliner le module d'un angle de 30 degrés pour obtenir un meilleur rendement.



Figure II.14 : Panneaux photovoltaïques.

Une cellule photovoltaïque produit une tension d'environ 0.6v, dans le but d'augmenter cette tension et d'aboutir une tension de l'ordre 21v, on connecte un certain nombre de cellules (36 ou 72 cellules) en série ou en parallèle, ce qui forme ce qu'on appelle module photovoltaïque. Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant pour une même tension. Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres existant dans un ensemble de photopiles en fonctionnement. La puissance d'un module photovoltaïque est exprimée en Watt crête, c'est une valeur donnée pour les conditions STC.

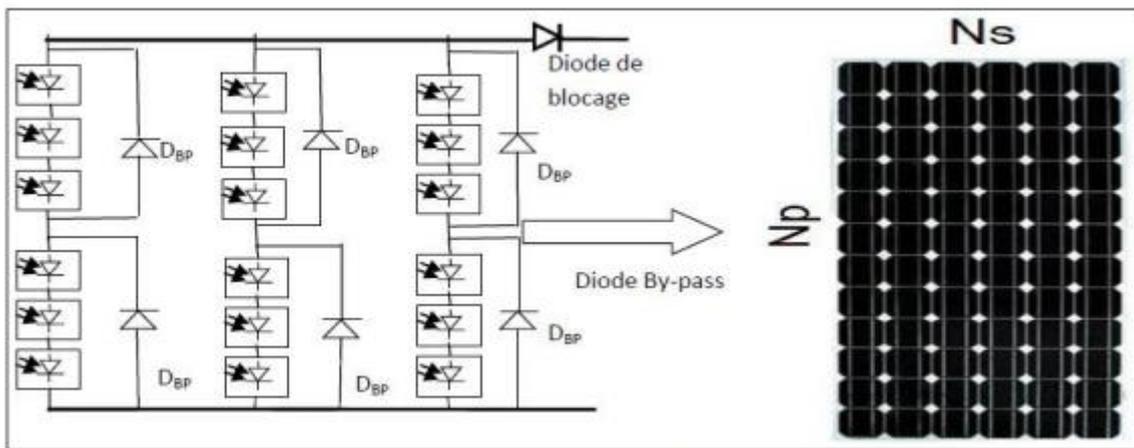


Figure II.15 : Panneau photovoltaïque Condor Électronique CEM200M-72.

II.4.2 Eoliennes

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle est utilisée pour produire l'électricité, appelée énergie éolienne. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs, tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées éoliennes de pompage ou pompe à vent. Une forme ancienne d'éolienne est le moulin à vent.

Les termes « centrale éolienne », « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre ou en mer [24].

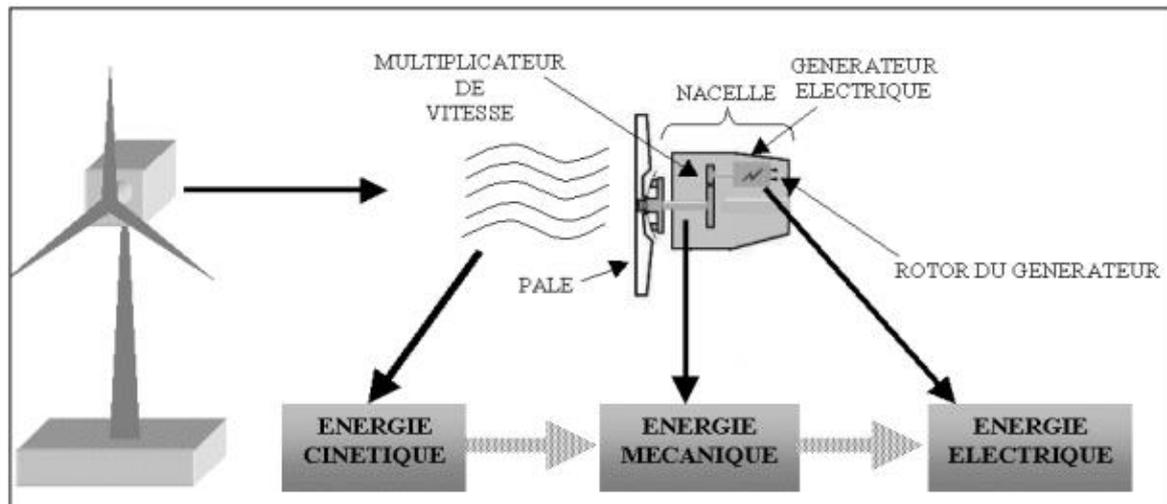


Figure II.16 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [24].

II.5 Fonctionnement et Modes de Gestion de l'Énergie

II.5.1 Principes de fonctionnement

La gestion de l'énergie, en principe, comporte quatre étapes clés couvrant tous les aspects majeurs des projets les plus courants.

Collecte des données de consommation d'énergie : tout projet de gestion de l'énergie doit disposer d'un solide système de collecte de données de consommation d'énergie, qui sert de base à celui-ci. Pour assurer l'analyse et l'optimisation de la consommation, il est impératif de savoir combien d'énergie est consommée, où elle est consommée, et quand elle est consommée. Par conséquent, il est absolument essentiel que les bonnes données soient enregistrées. Les compteurs d'énergie sont des outils qui permettent des mesures précises. Dans les organisations et infrastructures simples, les points de données de consommation d'énergie à mesurer sont assez simples. Cependant, les systèmes industriels plus complexes, dont les sources d'énergie et les points de consommation sont nombreux, peuvent nécessiter une planification minutieuse des installations des compteurs d'énergie.

Analyse des données collectées : une fois que les données ont été collectées, elles sont analysées afin de trouver des opportunités d'économie d'énergie. Grâce à des outils de visualisation, les données observées sur une période définie peuvent être rendues plus compréhensibles. Les différentes pistes d'optimisation peuvent alors être illustrées et hiérarchisées.

Optimisation sur la base de l'analyse : la hiérarchisation et la mise en œuvre des activités d'optimisation de la consommation d'énergie peuvent varier en fonction de l'organisation et de ses objectifs. L'urgence, la facilité et le coût de mise en œuvre, les économies, les modifications aux opérations, à long ou à court terme, ainsi que de nombreux facteurs de ce type peuvent influencer la recommandation d'optimisation qui est mise en œuvre en premier. Il existe de nombreuses technologies disponibles pour fournir des solutions intelligentes de gestion de l'énergie. Depuis les systèmes d'automatisation de CVC des bâtiments jusqu'aux systèmes de gestion de l'énergie domestique, de nombreuses technologies et solutions courantes peuvent garantir que les pratiques de gestion de l'énergie sont largement adoptées et améliorées.

Suivi des améliorations et optimisations ultérieures : comme pour tout processus ayant pour objectif d'optimiser quelque chose, la gestion de l'énergie ne s'arrête pas après la mise en œuvre d'une initiative. Il s'agit en fait d'un processus continu, au cours duquel d'autres pistes d'amélioration doivent être explorées. Même l'efficacité et le succès des mesures mises en œuvre doivent être suivis et analysés en termes d'avantages estimés pour référence future. De cette façon, le processus devient une boucle dont le but est une amélioration constante [25].

II.5.2 Gestion des flux d'énergie entre les sources, le stockage et la charge

La gestion des flux d'énergie entre le stockage et la charge est un aspect crucial des systèmes énergétiques modernes, en particulier dans le contexte croissant des énergies renouvelables et de la transition vers des réseaux électriques plus intelligents et durables. Voici quelques points clés à considérer :

II.5.2.1 Stockage d'énergie

Les technologies de stockage d'énergie comme les batteries, les super-condensateurs, les systèmes de stockage thermique, etc., servent à stocker l'énergie générée pendant les périodes de faible demande ou d'abondance de ressources renouvelables (par exemple, lorsque le soleil brille ou le vent souffle fort). Ces systèmes ont la capacité de générer de l'électricité pendant les périodes de forte demande ou lorsque les conditions de production d'énergie sont défavorables.

II.5.2.2 Gestion de la charge

L'optimisation de l'utilisation de l'énergie stockée et de l'énergie disponible est essentielle pour gérer la charge afin de satisfaire les besoins des utilisateurs finaux. On peut accomplir cela en utilisant différentes stratégies, comme la régulation de la puissance de charge

et de décharge des batteries, la planification des horaires de charge/décharge, l'emploi de techniques de prévision de la demande, etc.

II.5.2.3 Equilibrage de l'offre et de la demande

L'équilibrage en temps réel de l'offre et de la demande est un élément essentiel de la gestion des flux d'énergie. Des algorithmes sophistiqués sont employés par les systèmes de gestion de l'énergie pour anticiper et ajuster la production et la consommation d'énergie dans le but de maintenir l'équilibre sur le réseau.

II.5.2.4 Intégration des énergies renouvelables

Les sources d'énergie renouvelable comme le solaire et l'éolien sont fréquemment intermittentes et sont soumises aux conditions météorologiques. La gestion des flux d'énergie nécessite l'intégration stable et efficace de ces sources variables dans le réseau, en utilisant par exemple le stockage d'énergie pour compenser les fluctuations de production.

II.5.2.5 Technologies de contrôle avancé

De nos jours, on utilise de plus en plus des technologies de contrôle avancées comme l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et l'optimisation algorithmique afin d'améliorer la gestion des flux d'énergie. Ces technologies offrent la possibilité de prévoir les variations de la demande et de la production, d'améliorer les opérations en temps réel et de maximiser l'efficacité énergétique globale du système.

II.5.3 Modes de gestion de l'énergie

II.5.3.1 Gestion de l'énergie domestique

II.5.3.1.1 Efficacité énergétique domestique

Inciter à adopter des comportements et des technologies visant à diminuer la consommation d'énergie, tels que l'utilisation d'appareils électroménagers écologiques, l'isolation des bâtiments et la sensibilisation à l'économie d'énergie.

II.5.3.1.2 Gestion intelligente des appareils

L'utilisation de technologies comme les compteurs intelligents et les systèmes de domotique permet de surveiller et de contrôler la consommation d'énergie des appareils domestiques, offrant ainsi aux utilisateurs la possibilité de réguler leur consommation en fonction des tarifs d'électricité ou des périodes de forte demande.

II.5.3.2 Gestion de l'énergie dans l'industrie

II.5.3.2.1 Optimisation des processus industriels

Analyse et adoption de méthodes et de technologies pour diminuer la consommation d'énergie lors des processus de production, tels que l'amélioration des paramètres de production, l'emploi de matériaux et de technologies économes en énergie, ainsi que la récupération de chaleur.

II.5.3.2.2 Gestion de la demande d'énergie

Organiser et coordonner la consommation d'énergie industrielle afin de réduire les dépenses et réduire les conséquences sur le réseau électrique pendant les périodes de forte demande.

II.5.3.3 Gestion de l'énergie dans les transports

II.5.3.3.1 Electrification des transports

Promotion de l'utilisation de véhicules électriques et de technologies de recharge pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles dans le secteur des transports.

II.5.3.3.2 Planification urbaine durable

Favoriser les modes de transport durables tels que la marche, le vélo et les transports en commun dans les zones urbaines, ce qui permet de diminuer la consommation d'énergie liée aux déplacements.

II.5.3.4 Gestion de l'énergie dans les réseaux électriques

II.5.3.4.1 Intégration des énergies renouvelables

Développement et exploitation de sources d'énergie renouvelables telles que le solaire, l'éolien et l'hydroélectricité dans les réseaux électriques, en utilisant des technologies de stockage et de gestion de la demande pour garantir la stabilité du réseau.

II.5.3.4.2 Smart grids (réseaux électriques intelligents)

Utilisation de technologies de communication et de contrôle pour surveiller et optimiser le fonctionnement des réseaux électriques, permettant une intégration plus efficace des énergies renouvelables, une gestion dynamique de la demande et une meilleure résilience face aux pannes.

II.5.3.5 Gestion de l'énergie à l'échelle communautaire ou urbaine

II.5.3.5.1 Microgrids

Création de réseaux électriques locaux autonomes ou semi-autonomes, utilisant des sources d'énergie renouvelables et des systèmes de stockage pour répondre aux besoins.

II.5.3.5.2 Planification énergétique urbaine

Intégration de stratégies de gestion de l'énergie dans la planification urbaine pour promouvoir la durabilité, réduire les émissions de gaz à effet de serre et améliorer la résilience aux chocs énergétiques.

II.5.4 Algorithmes de contrôle

La transition vers des réseaux électriques intelligents et durables nécessite l'utilisation d'algorithmes de contrôle pour la gestion de l'énergie. Ces algorithmes, grâce à des méthodes sophistiquées telles que l'intelligence artificielle et l'optimisation algorithmique, permettent d'améliorer la production, le stockage et la distribution de l'énergie afin de répondre de manière efficace à la demande tout en réduisant les dépenses et en optimisant l'efficacité énergétique.

II.5.4.1 L'algorithme de contrôle de charge de la batterie

Il joue un rôle crucial dans la bonne gestion des systèmes de stockage d'énergie. Il est principalement utilisé pour surveiller de manière constante la tension et le courant de la batterie. Si un seuil maximal de tension est dépassé, il arrête automatiquement la charge pour éviter toute surcharge préjudiciable. De manière similaire, lorsque la tension diminue en dessous d'un seuil minimum, l'algorithme commence à charger la batterie afin d'éviter une décharge excessive, ce qui préserve la durée de vie et les performances optimales de celle-ci. Grâce à ce mécanisme de contrôle précis et réactif, les batteries sont sécurisées et performantes dans différentes applications, telles que les véhicules électriques et les systèmes de stockage domestique d'énergie renouvelable.

II.5.4.2 L'algorithme de gestion de la charge des véhicules électriques

Les réseaux intelligents jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de l'utilisation de l'électricité. Elle fonctionne en suivant de manière constante la demande d'électricité et les contraintes du réseau électrique. L'objectif de cet algorithme est de répartir de manière stratégique la charge des véhicules électriques afin de réduire les moments de forte demande, ce qui contribue à maintenir l'équilibre du réseau et à prévenir les surcharges. En outre, il tient compte des limitations de temps et des préférences des utilisateurs afin de donner la priorité à

la charge des véhicules nécessitant une recharge immédiate. Grâce à cette méthode astucieuse, il est possible de gérer de manière efficace les ressources électriques, ce qui favorise une transition vers une mobilité plus durable et une utilisation plus intelligente de l'énergie.

II.5.4.3 L'algorithme d'optimisation de la consommation d'énergie dans les bâtiments

Il s'agit d'une avancée significative dans la gestion optimale des ressources énergétiques. Cet algorithme génère une base de connaissances essentielle en collectant les données de consommation provenant des différents appareils et systèmes présents dans le bâtiment. En utilisant des méthodes sophistiquées comme l'apprentissage automatique ou des algorithmes d'optimisation avancés, il ajuste automatiquement les réglages de chauffage, de climatisation, d'éclairage, et autres, afin de réduire la consommation d'énergie tout en préservant le confort des résidents. Cette méthode astucieuse et flexible aide à diminuer les dépenses énergétiques, à réduire l'impact environnemental des constructions et à favoriser une utilisation plus durable des ressources énergétiques.

II.5.4.4 Algorithme de contrôle de la production d'énergie dans un parc éolien ou solaire

Constitue un élément essentiel de l'efficacité opérationnelle des infrastructures de production d'énergie écologique. Cet algorithme permet de prévoir et de réagir de manière proactive aux changements environnementaux en surveillant en temps réel les conditions météorologiques, ainsi que la production actuelle et les prévisions de production d'énergie renouvelable. L'objectif est d'ajuster de manière dynamique la direction des éoliennes ou l'angle des panneaux solaires afin de maximiser la production d'énergie en fonction des conditions météorologiques prévues, afin d'optimiser l'utilisation des ressources renouvelables disponibles. Les parcs éoliens et solaires bénéficient d'une approche intelligente et adaptative qui améliore leur efficacité énergétique, ce qui renforce leur contribution à la transition vers une production d'énergie plus durable et respectueuse de l'environnement.

II.5.4.5 Algorithme de gestion de l'énergie pour les systèmes autonomes (comme les robots ou les drones)

Un algorithme de gestion de l'énergie est essentiel dans le domaine des systèmes autonomes comme les robots et les drones. Cet algorithme élabore des plans d'activités en fonction de la disponibilité d'énergie en surveillant attentivement les niveaux de batterie et en prenant en considération les exigences opérationnelles. En accordant une priorité aux tâches

essentielles et en ajustant les paramètres afin d'améliorer l'efficacité énergétique, il assure un fonctionnement optimal et durable des systèmes autonomes, assurant ainsi leur performance continue dans différentes situations et conditions.

II.6 Avantages et limitations d'un onduleur autonome

Catégorie	Avantages	Limitations
Indépendance Énergétique	Ne dépend pas des réseaux électriques publics	Peut nécessiter une gestion complexe pour maintenir l'indépendance complète
Fiabilité	Fournit une alimentation continue et stable	La fiabilité dépend fortement de la qualité des composants et de la maintenance
Flexibilité d'Installation	Peut être installé dans diverses situations (habitations, installations industrielles, etc.)	L'installation peut être complexe et nécessiter des compétences professionnelles
Utilisation des Énergies Renouvelables	Favorise l'utilisation des ressources énergétiques durables (solaire, éolien)	Dépend des conditions climatiques, pouvant affecter la production d'énergie
Réduction des Coûts à Long Terme	Réduit les coûts d'exploitation grâce à l'énergie renouvelable	Coût initial élevé, particulièrement pour les systèmes de haute qualité
Sécurité et Protection des Appareils	Protège contre les variations de tension et les surtensions	La protection dépend de la qualité du système de gestion de l'énergie
Évolutivité	Facilement extensible pour répondre à des besoins croissants	L'ajout de nouvelles capacités peut nécessiter des mises à jour coûteuses

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients de chaque type de batterie.

II.7 Conclusion

Dans cette étude, nous avons examiné en détail les aspects techniques, fonctionnels et contextuels des onduleurs autonomes, mettant en lumière leur architecture, leurs composants clés ainsi que leurs modes de gestion de l'énergie. Nous avons également comparé ces systèmes avec les onduleurs classiques, soulignant leurs avantages et limites respectifs.

Il est évident que les onduleurs autonomes jouent un rôle de plus en plus essentiel dans le domaine de l'énergie à travers le monde. Les outils essentiels pour la transition vers une économie plus durable et décarbonisée sont leur capacité à intégrer de manière efficace différentes sources d'énergie renouvelable, telles que le solaire photovoltaïque et l'éolien, tout en garantissant une gestion optimale des flux d'énergie et en proposant des options de stockage avancées.

Les onduleurs autonomes prennent également de plus en plus d'importance en raison de leur rôle dans la résistance des systèmes énergétiques. Ces systèmes jouent un rôle essentiel dans la stabilité et la fiabilité des infrastructures énergétiques en favorisant une meilleure intégration des énergies intermittentes dans les réseaux électriques et en proposant des solutions de secours en cas de panne ou de situations d'urgence.

Sur le plan futur, les onduleurs autonomes sont destinés à occuper une place encore plus importante dans la durabilité énergétique. En raison des progrès constants dans les technologies de stockage, les algorithmes de contrôle et l'intégration des énergies renouvelables, il est prévu que ces systèmes deviennent plus performants, plus souples et plus accessibles. Leur mise en place à l'échelle mondiale dans les réseaux électriques permettra de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et de diminuer les conséquences du changement climatique.

En conclusion, les onduleurs autonomes représentent une technologie essentielle pour répondre aux défis énergétiques du 21^e siècle. Leur adoption généralisée et leur développement continu sont essentiels pour assurer un avenir énergétique durable et résilient pour les générations futures.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions et simulons un onduleur autonome, un élément indispensable des systèmes de conversion d'énergie. Nous entamons en présentant le système de manière générale, puis en effectuant une simulation afin de vérifier et d'améliorer son fonctionnement. Par la suite, nous décrirons le schéma de l'onduleur autonome.

Nous examinerons les divers éléments employés, en commençant par le LM555CM, en donnant une description détaillée de ses caractéristiques, de ses applications et de son circuit électrique. Par la suite, nous étudierons le 4017BP_10V en abordant ses caractéristiques, ses applications et son diagramme logique.

On examinera le rôle du transistor MOSFET en examinant ses critères de sélection, sa gestion et ses caractéristiques. Nous examinerons le fonctionnement du transformateur et d'autres éléments passifs tels que la résistance et le condensateur.

III.2 Présentation du système global

Les principaux éléments qui constituent le système global sont représentés sur la figure III.1.

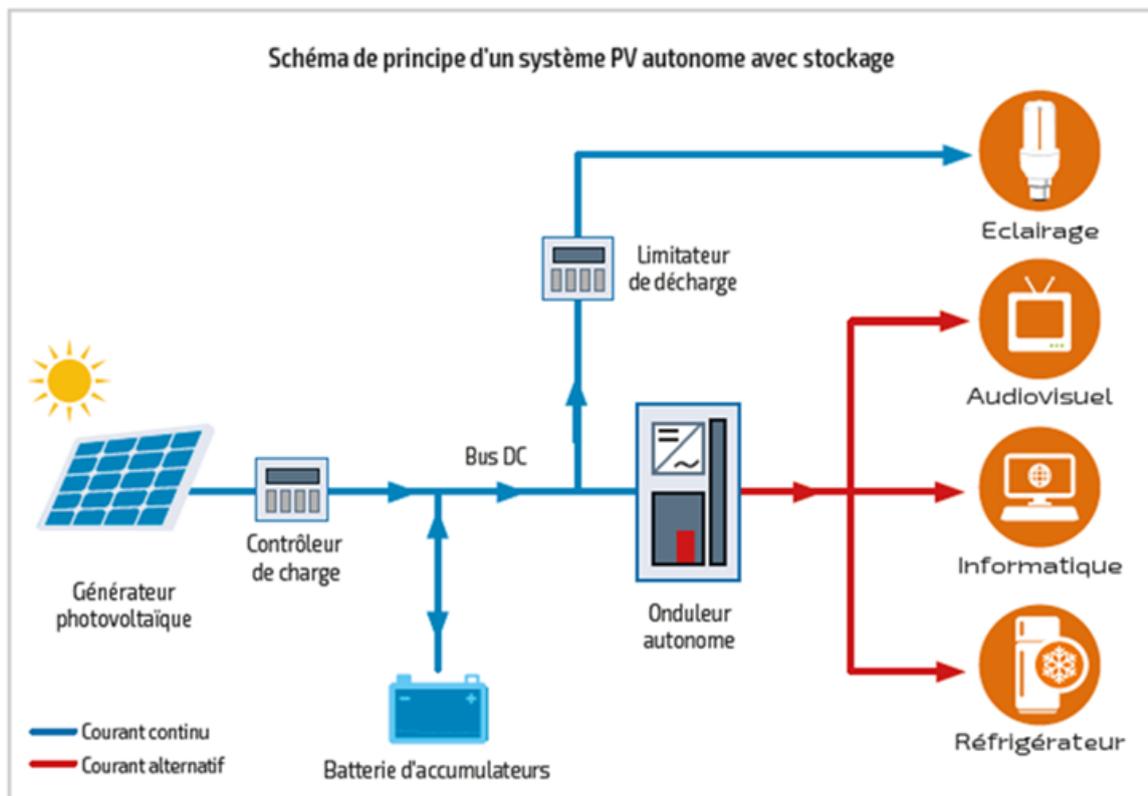


Figure III.1 : Système global a étudié.

III.3 Simulation de l'onduleur autonome

En utilisant Multisim, un logiciel de simulation de circuits électroniques, qui permet d'analyser et de vérifier les performances d'un système de conversion d'énergie qui combine différentes sources, telles que les panneaux solaires et les batteries. De plus, Multisim offre des outils pour visualiser les formes d'onde et les paramètres électriques en temps réel, ce qui est essentiel pour affiner les performances du système.

III.4 Schéma de l'onduleur autonome

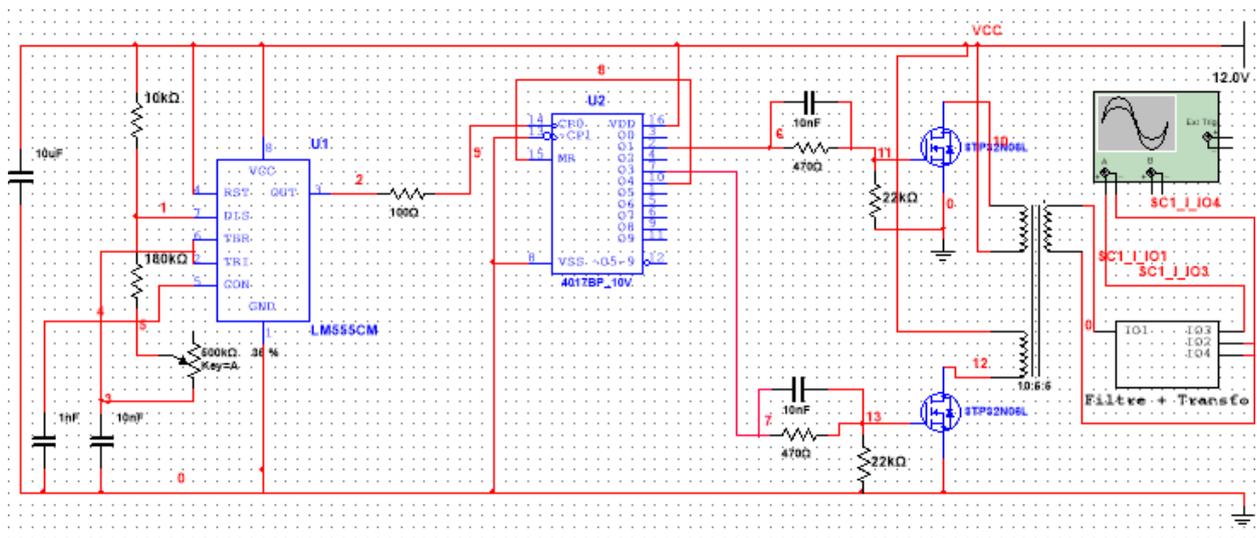


Figure III.2 : Schéma de simulation d'un onduleur autonome.

La Figure III.2 nous montre la simulation d'un onduleur autonome. Voici une explication détaillée de son fonctionnement, incluant les composants principaux et leur rôle respectif dans le circuit :

Panneau photovoltaïque (VCC) : fournit l'énergie nécessaire au circuit. La valeur est indiquée comme 12V.

LM555CM : est un temporisateur configuré en mode astable produisant un signal d'horloge carré continu. La fréquence de ce signal est déterminée par les composants externes connectés aux broches 6 et 2 du LM555, soit des résistances de 10k Ω et 180k Ω , et un condensateur de 10 nF. La sortie (broche 3) du LM555 est connectée à la broche 14 (clock) du compteur 4017.

Le **4017BP** : compte les impulsions d'horloge fournies par le LM555 et active ses sorties séquentiellement de Q0 à Q9. Dans ce schéma, seules les sorties Q1 et Q3 sont utilisées. Les sorties Q1 et Q3 sont connectées aux grilles des MOSFETs via des résistances de 470 Ω et 22 k Ω respectivement, avec un condensateur de 10 nF pour filtrer les signaux.

Les **MOSFETs Q1** et **Q2** : sont utilisés pour la commutation de la tension d'entrée (VCC) à travers le transformateur. Les signaux de grille provenant du 4017 alternent les MOSFETs, permettant ainsi la commutation de la tension DC à travers le transformateur, générant une tension AC en sortie.

Le **Transformateur** : élève la tension en fonction du rapport de transformation. En sortie, On obtient un signal similaire à celui à la sortie des MOSFETs, mais avec une amplitude plus élevée, qui est ensuite filtrée pour obtenir une onde sinusoïdale.

III.5 Les différentes composantes utilisées

III.5.1 LM555CM

Le LM555 est un contrôleur hautement stable capable de produire des impulsions de temporisation précises. En mode monostable, le délai de temporisation est contrôlé par une résistance externe et un condensateur. En mode astable, la fréquence et le rapport cyclique sont contrôlés avec précision par deux résistances externes et un condensateur.

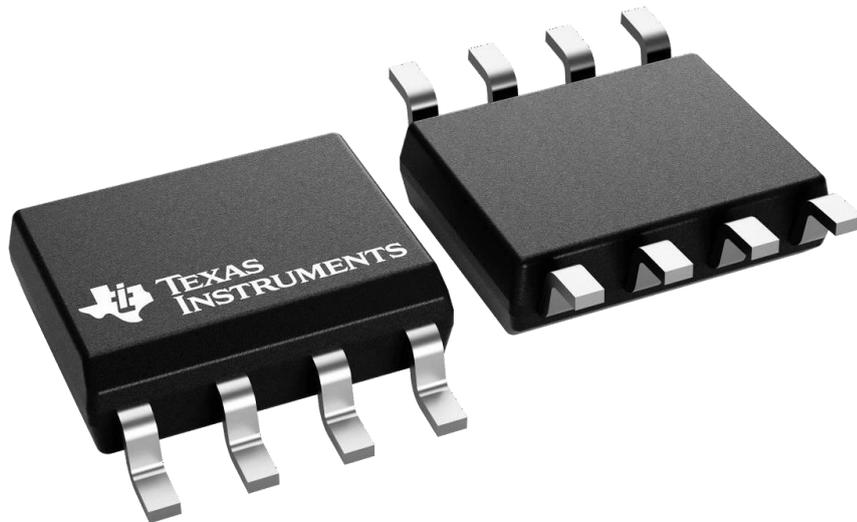


Figure III.3 : LM555CM.

III.5.1.1 Caractéristiques

- Capacité de pilotage de courant élevée (200 mA).
- Rapport cyclique réglable.
- Stabilité en température de 0,005 %/°C.
- Temporisation de μsec à heures.
- Temps de désactivation inférieur à 2 μsec .

III.5.1.2 Applications

- Temporisation de précision.
- Génération d'impulsions.
- Génération de délais.
- Temporisation séquentielle.

III.5.1.3 Circuit électrique

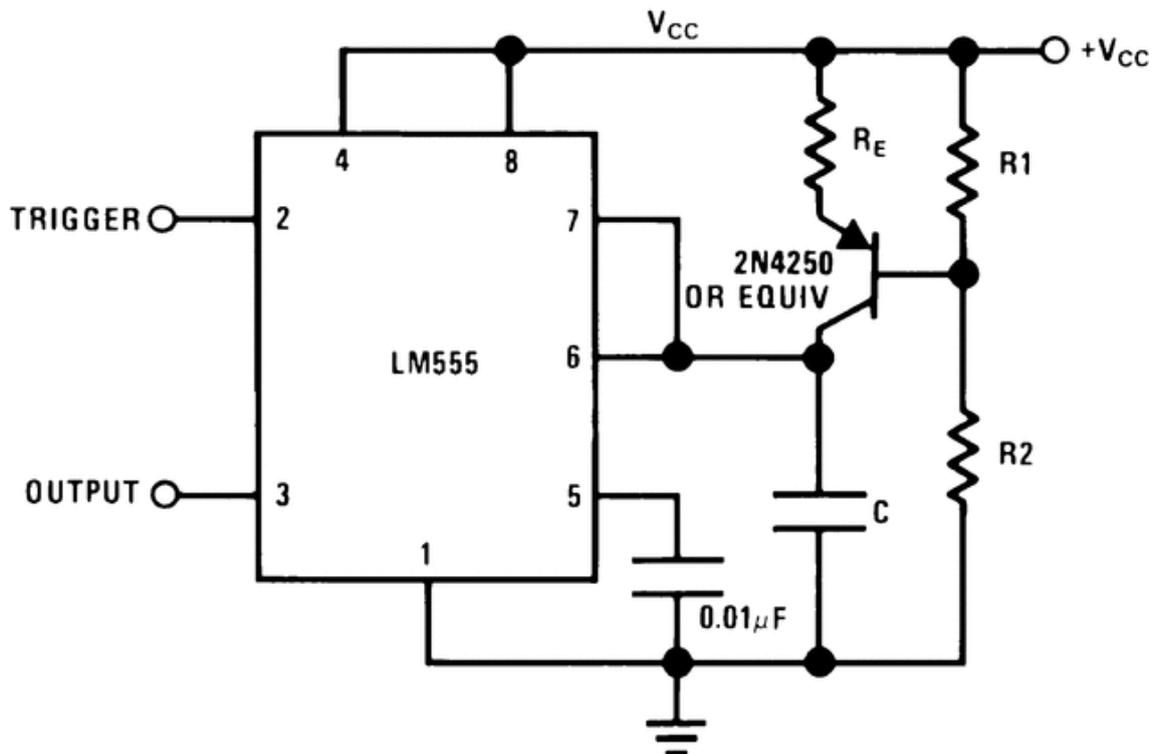


Figure III.4 : Circuit électrique du LM555CM.

III.5.2 4017BP_10V

Le 4017BP est une variante du circuit intégré CD4017, également connu sous le nom de décalage de compteur/diviseur. Le 4017BP est un compteur Johnson à cinq étages avec dix sorties actives HAUTES décodées sans pics (Q0 à Q9), une sortie de report active BASSE provenant de la bascule le plus significatif (Q5-9), des entrées d'horloge actives HAUTES et BASSES (CP0, CP1) et une entrée de réinitialisation maître asynchrone prioritaire (MR). Le compteur est avancé soit par une transition BASSE à HAUTE sur CP0 lorsque CP1 est BAS, soit par une transition HAUTE à BASSE sur CP1 lorsque CP0 est HAUT.

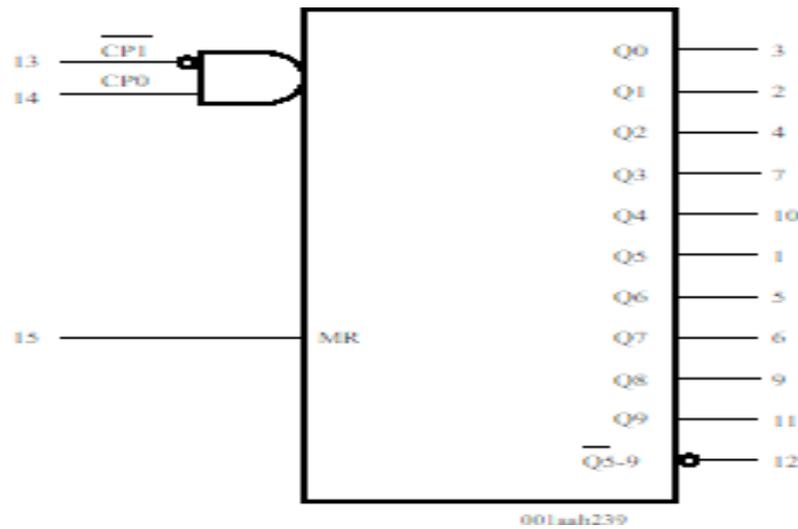


Figure III.5 : Schéma du 4017BP.

III.5.2.1 Caractéristiques

- Correction automatique du compteur.
- Tolérant aux temps de montée et de descente lents de l'horloge.
- Fonctionnement entièrement statique.
- Notes paramétriques de 5 V, 10 V et 15 V.
- Caractéristiques de sortie symétriques standardisées.
- Fonctionne dans la plage de température automobile de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Conforme à la norme JEDEC JESD 13-B.

III.5.2.2 Applications

- Compteurs électroniques.
- Séquenceurs de LED.
- Générateurs de séquences de commutation.
- Diviseurs de fréquence.
- Applications de temporisation.

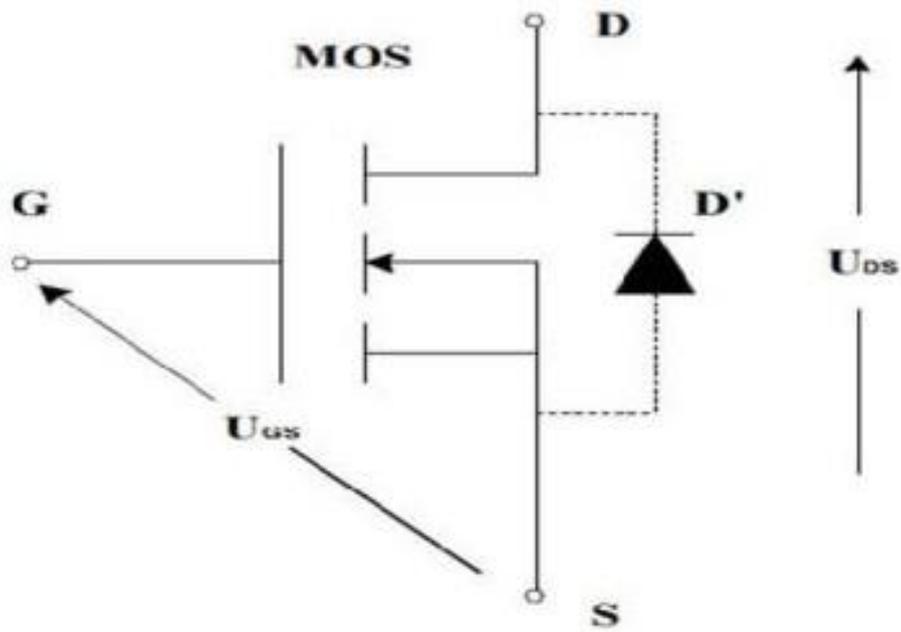


Figure III.8 : Schéma électrique du MOSFET.

La figure III.9 montre l'élimination des diodes internes.

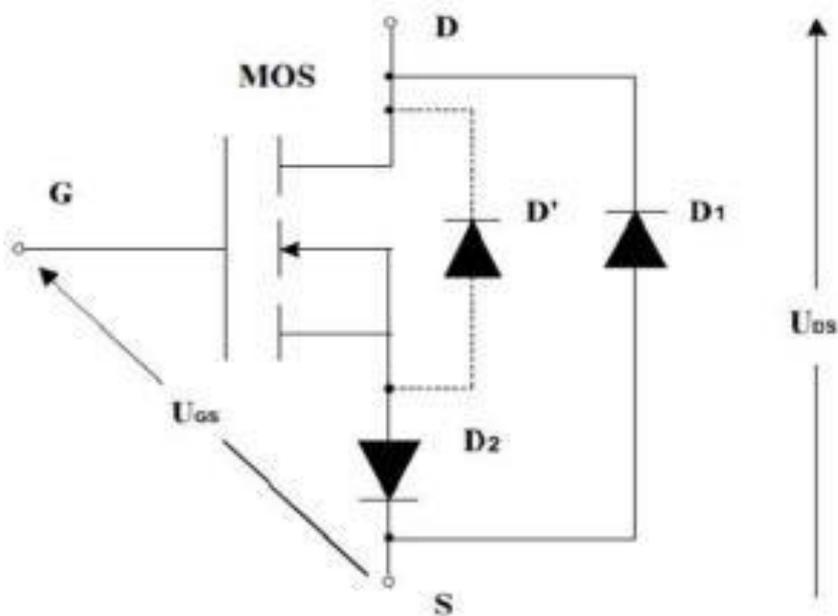


Figure III.9 : Schéma de l'élimination des diodes internes.

Ces transistors à effet de champ possèdent par construction une diode « D' » en parallèle inverse mais cette dernière, elle a un temps de recouvrement lent.

III.5.3.1 Critère de choix de l'élément semi-conducteur

La figure III.10 illustre la gamme des semi-conducteurs en fonction de la puissance et de la fréquence d'utilisation. A travers ces caractéristiques, et selon notre application, l'interrupteur adéquat est le transistor MOSFET.

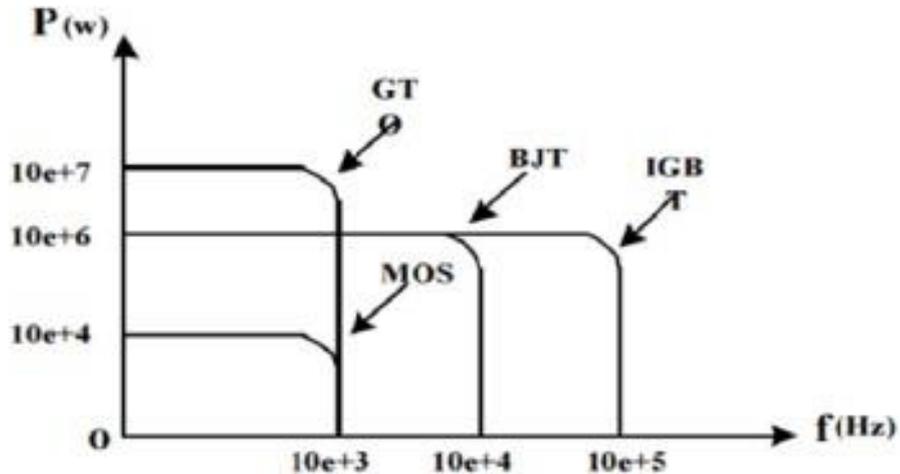


Figure III.10 : L'échelle des semi-conducteurs (interrupteurs).

III.5.3.2 Commande d'un transistor MOSFET

Lorsque la tension U_{GS} appliquée entre la grille et la source est nulle ou négligeable, le transistor MOSFET reste bloqué. En revanche, une tension U_{GS} positive entraîne le passage du transistor MOSFET à l'état de saturation. Voir figures III.11 et III.12 pour plus de détails.

III.5.3.2.1 Caractéristique de sortie

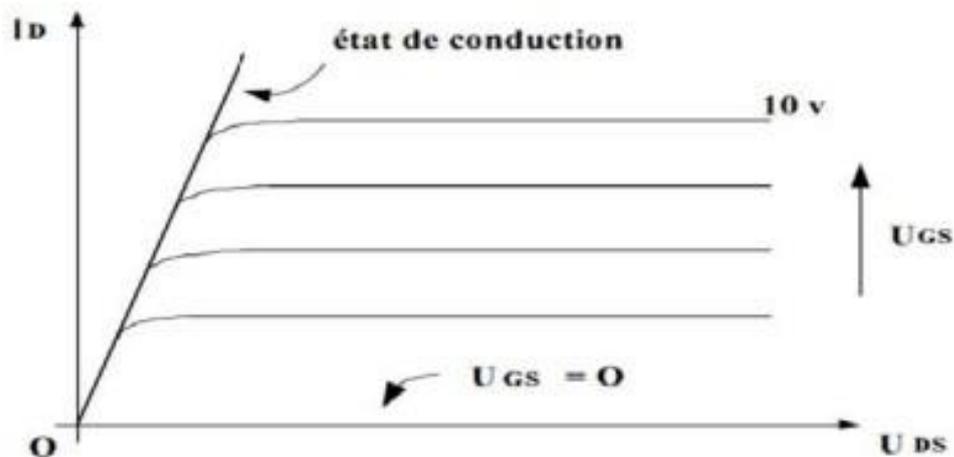


Figure III.11 : Caractéristiques de sortie d'un transistor MOSFET.

III.5.3.2.2 Caractéristique de commande

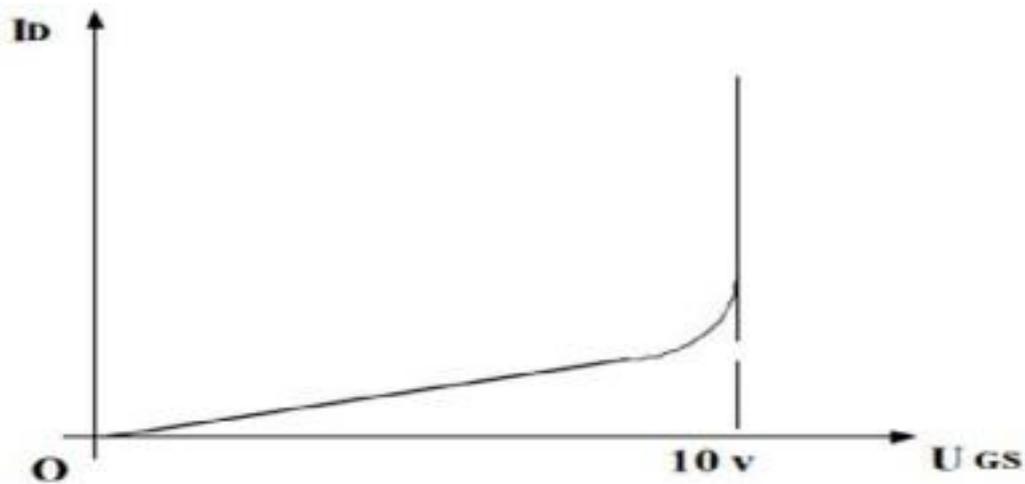


Figure III.12 : Caractéristiques de commande d'un transistor MOSFET.

III.5.4 Transformateur

Les transformateurs sont des dispositifs statiques à induction électromagnétique couramment utilisés pour modifier les caractéristiques de l'énergie électrique alternative, dans le but de l'adapter de manière optimale à toutes les étapes de sa production, son transport, sa distribution et son utilisation. Ces appareils sont d'un usage universel, car ils transforment les signaux des sources de tension et de courant sinusoïdaux en signaux de même fréquence, mais avec des valeurs efficaces généralement différentes.

III.5.4.1 Principe de fonctionnement

Conformément à la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable ϕ circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle au taux de variation temporelle du flux ($d\phi/dt$) et au nombre de spires de l'enroulement.

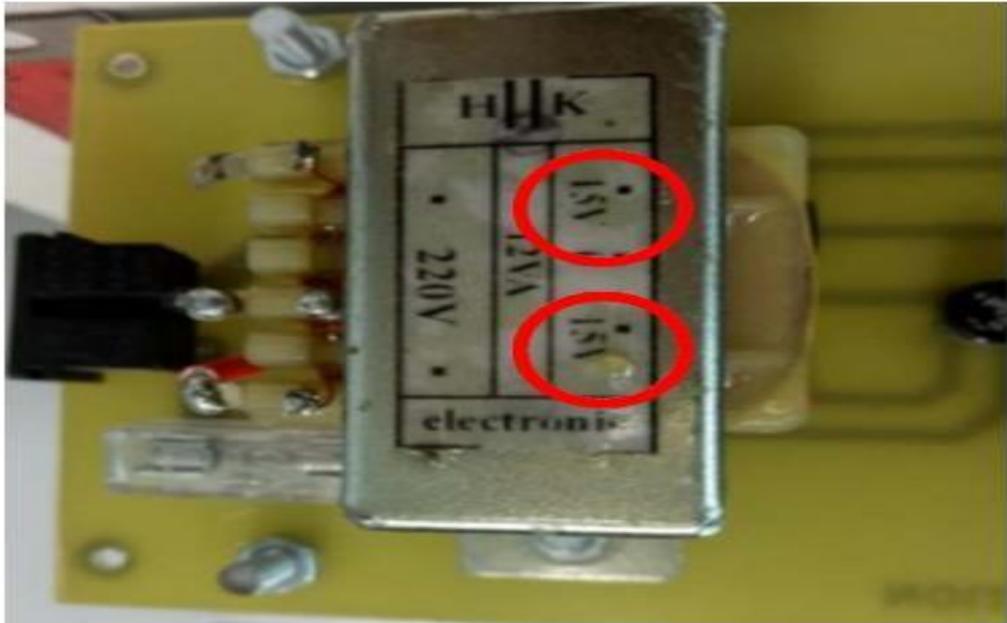


Figure III.13 : Transformateur ou point milieu (15V à 230V) [26].

III.5.5 La résistance

La résistance constitue une propriété fondamentale dans le domaine de l'électricité. Elle désigne l'opposition qu'un matériau ou un composant offre au passage du courant électrique. Exprimée en ohms et représentée par le symbole « Ω », la résistance est essentielle pour appréhender le fonctionnement des circuits électriques.



Figure III.14 : Résistance de puissance 2.2k Ω [26].

III.5.6 Le condensateur

Le condensateur est un composant électronique qui stocke la charge électrique. Le condensateur est composé de 2 conducteurs proches (généralement des plaques) séparés par un matériau diélectrique. Les plaques accumulent une charge électrique lorsqu'elles sont

connectées à une source d'alimentation. Une plaque accumule une charge positive et l'autre plaque une charge négative.



Figure III.15 : Condensateur de 1000 μ F [26].

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons débuté par une présentation du système global de l'onduleur autonome et de ses éléments principaux. Ensuite, nous avons détaillé les différentes composantes qui constituent l'onduleur autonome. Dans le prochain chapitre, nous présenterons les résultats des simulations obtenues.

IV.1 Introduction

Un domaine de recherche essentiel dans le domaine des énergies renouvelables est la conversion efficace de l'énergie solaire en électricité utilisable. Les onduleurs autonomes occupent une place essentielle dans cette transformation, car ils permettent de convertir le courant continu (CC) généré par les panneaux solaires en courant alternatif (CA) qui peut être utilisé dans les réseaux électriques domestiques et industriels. Ce travail présente une simulation détaillée d'un onduleur autonome, en se concentrant sur les différentes étapes de traitement du signal à travers divers composants électroniques.

La source d'énergie principale est le panneau photovoltaïque, qui produit un signal de sortie en courant continu. Ce signal est ensuite modulé par un circuit à base de LM555CM, un timer polyvalent couramment employé dans les domaines de la génération de signal et de la modulation. Le signal modulé est ensuite introduit dans un compteur décimal 4017BP_10V, qui assure la distribution temporelle des signaux vers les interrupteurs électroniques.

Les MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors), sont des commutateurs haute fréquence qui transforment le signal modulé en un signal alternatif. Ce signal est ensuite transmis à un transformateur. Enfin, un filtrage est appliqué pour lisser la forme d'onde de sortie, produisant un signal de sortie sinusoïdale propre et stable, prêt pour l'utilisation dans diverses applications électriques.

IV.2 Schéma de réalisation de l'onduleur autonome

La figure IV.1 illustre le schéma de simulation d'un onduleur autonome réalisé dans Multisim. Le fonctionnement de ce schéma est expliqué en détail dans le chapitre 3.

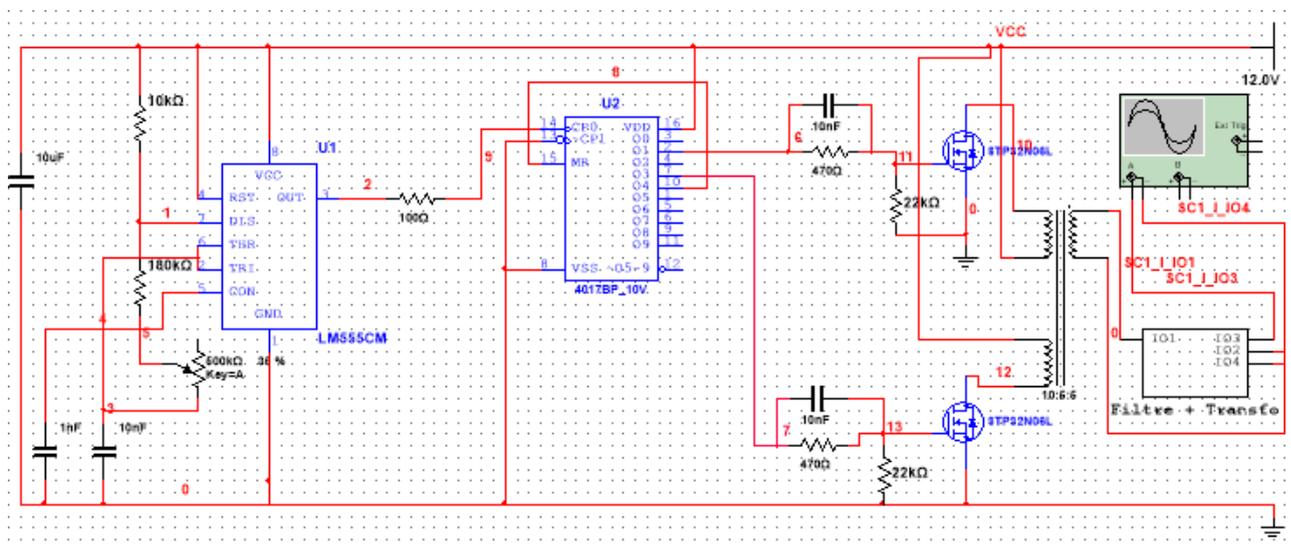


Figure IV.1 : Schéma de simulation d'un onduleur autonome.

La Figure IV.2 montre le sous-système utilisé dans ce schéma de simulation. Il comprend un filtre pour obtenir une onde sinusoïdale ainsi qu'un transformateur pour augmenter la tension.

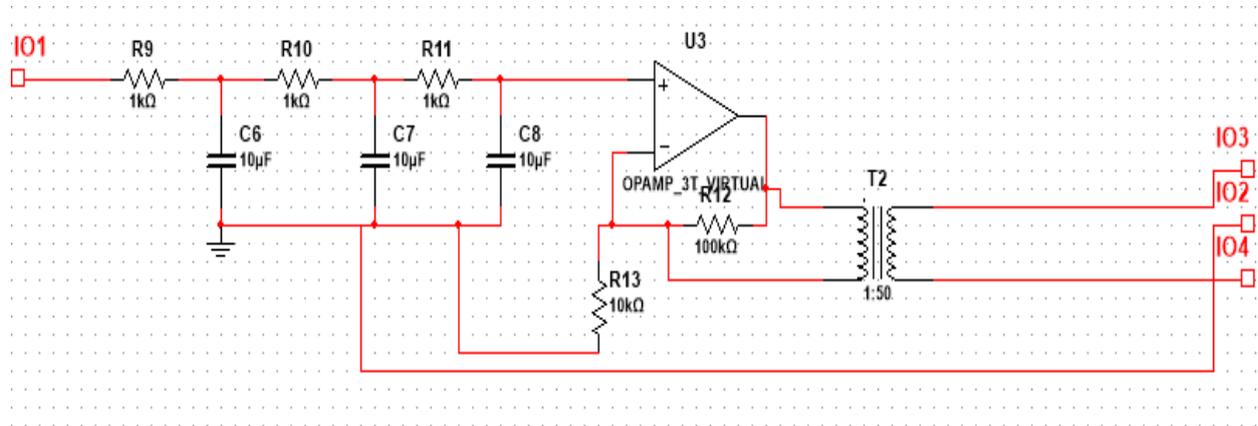


Figure IV.2 : Schéma du sous-système (Filtre + Transformateur).

IV.3 Résultats de simulation

IV.3.1 Le signal de sorties du panneau photovoltaïque



Figure IV.3 : L'allure de la tension du générateur PV, 12V.

La figure IV.3 nous montre l'allure de la tension du générateur PV, 12V. Le panneau photovoltaïque génère une tension continue pouvant atteindre 17V. Dans notre application, nous l'avons fixée à 12V.

IV.3.2 Le signal de sorties du LM555CM

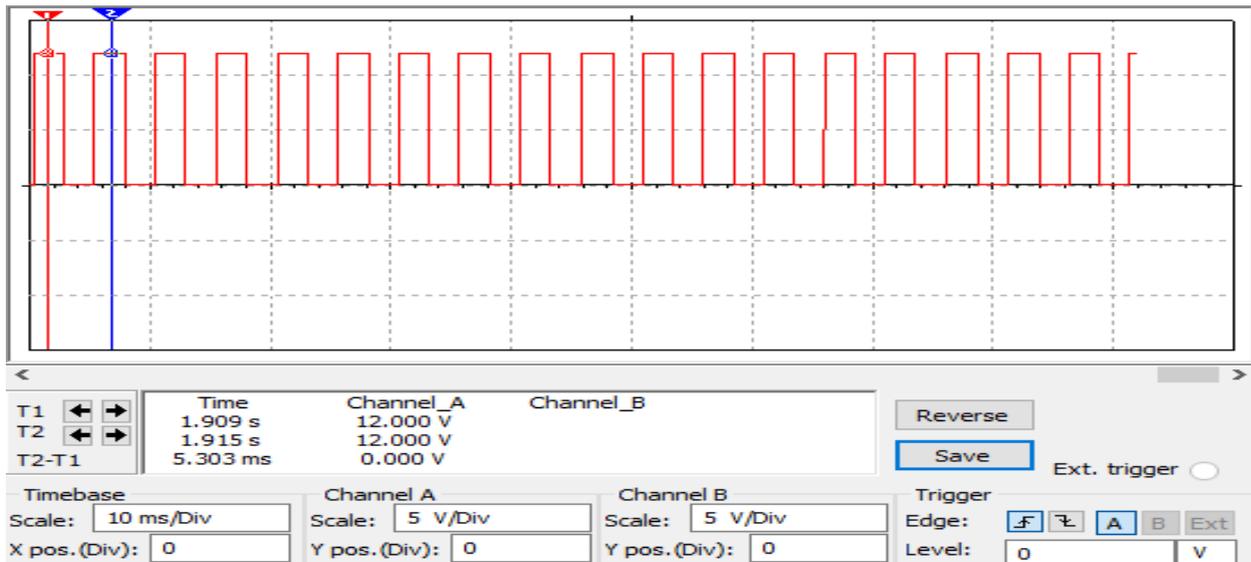


Figure IV.4 : Le signal généré par le LM555CM.

La figure IV.4 nous montre le signal à la sortie de LM555CM qui est carré, continu, périodique et d'une amplitude de 12V. Ce signal d'horloge est utilisé pour synchroniser le fonctionnement du compteur 4017BP.

IV.3.3 Le signal de sorties du 4017BP_10V

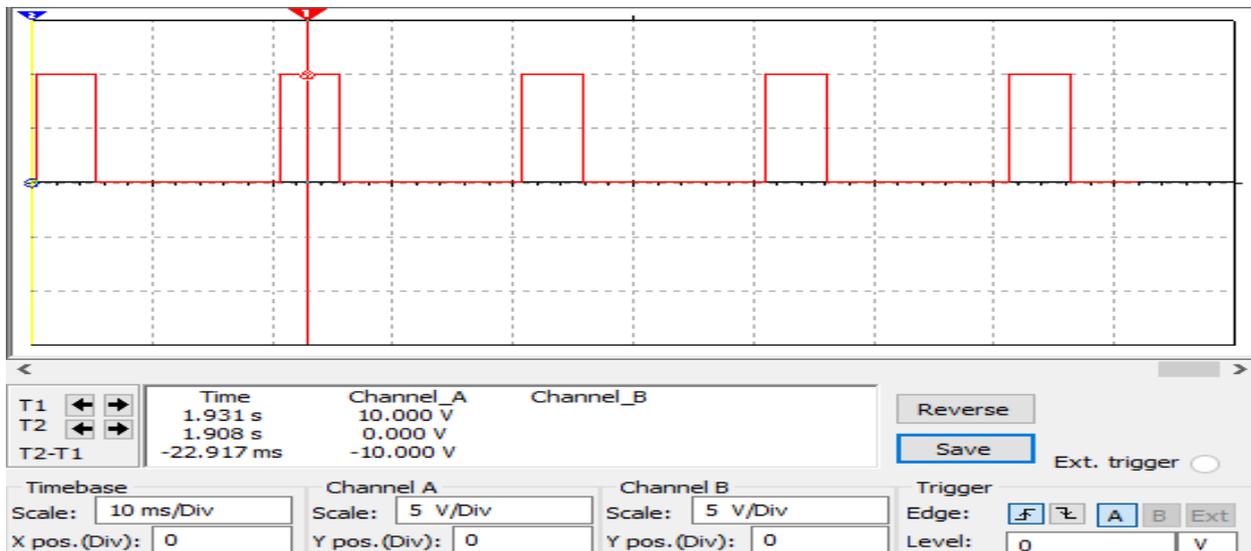


Figure IV.5 : Le signal généré par le 4017BP_10V.

La figure IV.5 présente le signal en sortie du 4017BP, qui est un signal carré d'une amplitude de 10V, utilisé pour contrôler la commutation des MOSFETs auxquels il est connecté.

IV.3.3 Le signal de sortie obtenu par les MOSFETs

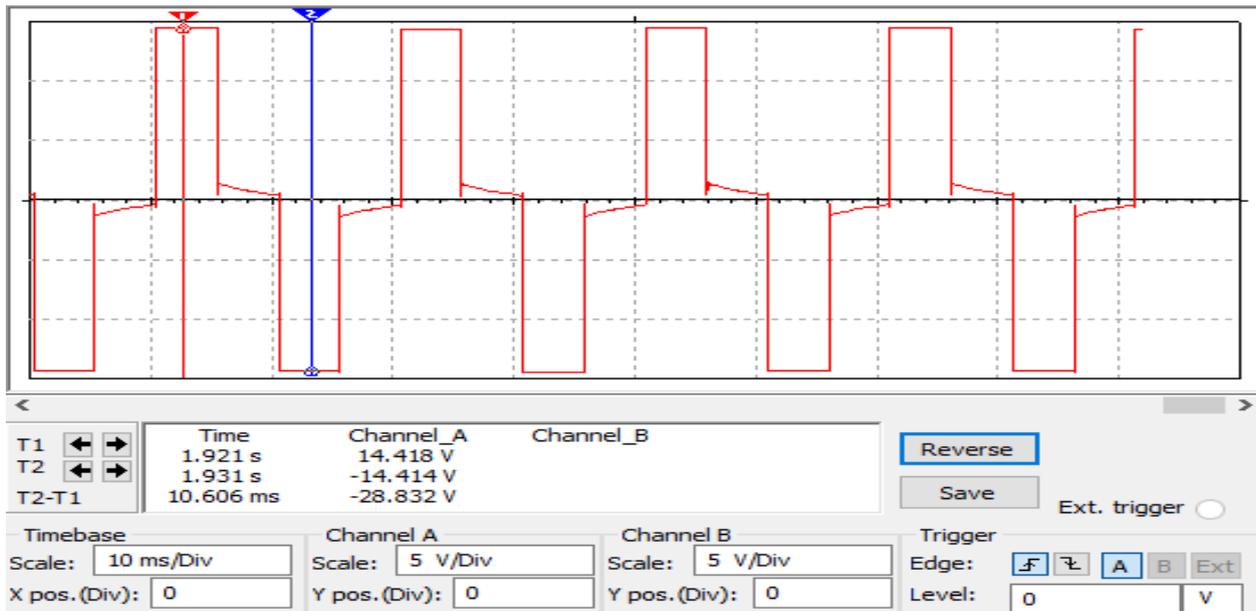


Figure IV.6 : Le signal obtenu par les MOSFETs.

La figure IV.6 nous montre le signal de sorties des MOSFETs, qui est un signal alternatif d'une amplitude de 14V.

IV.3.4 Le signal de sortie du transformateur

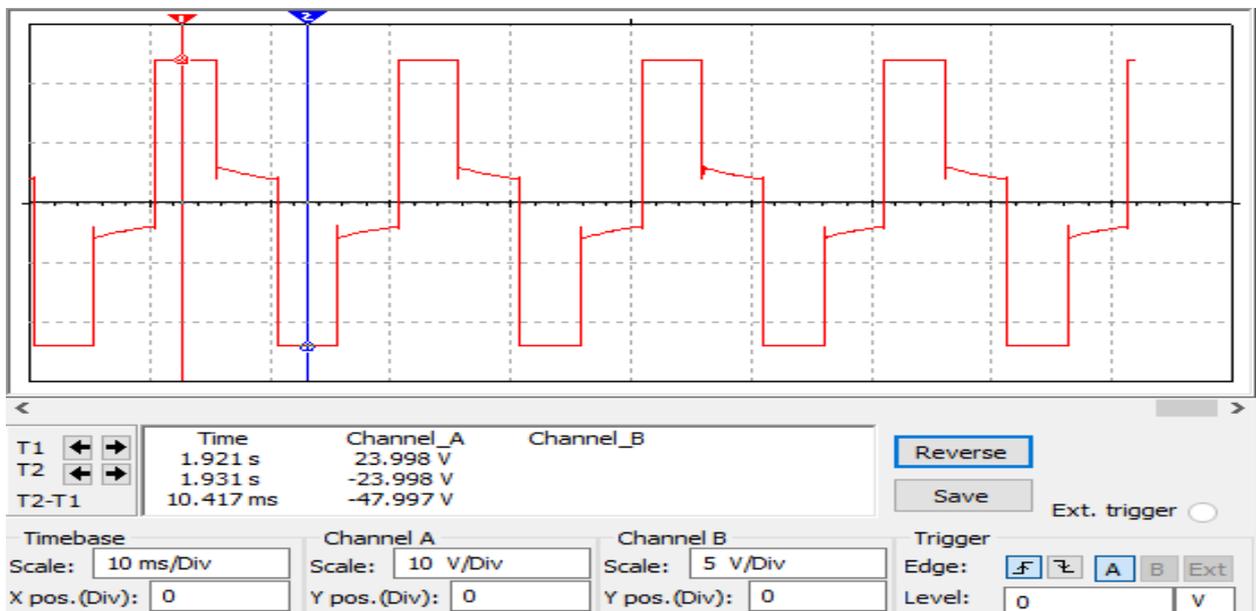


Figure IV.7 : Le signal obtenu par le transformateur.

La Figure IV.7 présente le signal de sortie du transformateur, on remarque que c'est le même signal que celui généré par les MOSFETs mais avec une amplitude différente, 24V.

IV.3.5 Le signal de sortie après le filtrage

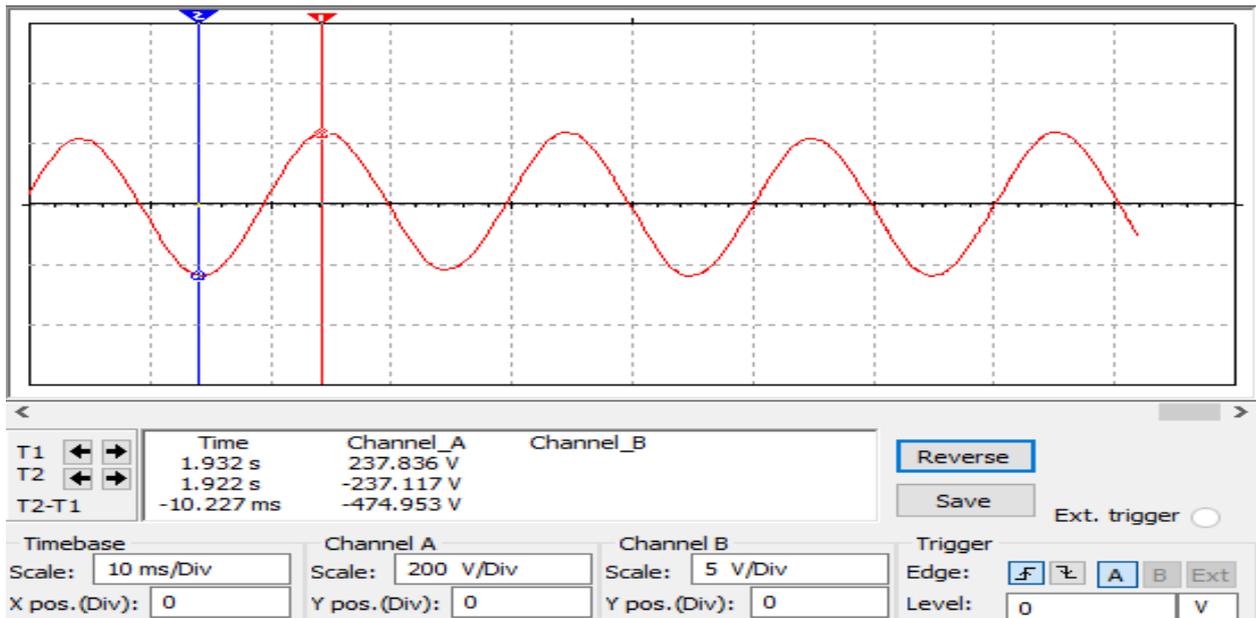


Figure IV.8 : Le signal de sortie après le filtrage.

La figure IV.8 nous montre le signal à la sortie du filtre, qui est un signal sinusoïdale d'une amplitude de 237V, qui représente la conversion réussie d'une tension continue en tension alternative, ainsi que le transformateur qui a augmenté la tension jusqu'à 237V.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents résultats obtenus durant notre simulation. La présence d'une forme d'onde sinusoïdale à la sortie atteste de la réalisation de notre objectif, qui est de produire une tension de sortie parfaitement sinusoïdale à partir d'une tension continue fournie par le générateur photovoltaïque.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons fourni une vue d'ensemble complète et détaillée sur les onduleurs, mettant en lumière leur rôle crucial dans la transition vers des sources d'énergie renouvelables. Nous avons commencé par une introduction à la transition énergétique, soulignant l'importance des technologies de production d'énergie renouvelable.

Dans la seconde section, nous avons exploré les différentes catégories de convertisseurs, notamment les hacheurs, gradateurs, redresseurs et onduleurs. Cette exploration a établi une base solide pour comprendre la variété des technologies de conversion de puissance disponibles et leurs applications spécifiques. La classification des onduleurs en non-autonomes, autonomes et à résonance a ensuite été approfondie, permettant de saisir les divers avantages et inconvénients de chaque type.

Nous avons également distingué entre les onduleurs monophasés et triphasés, en mettant en lumière leurs principes de fonctionnement à travers un tableau comparatif. Cette comparaison a offert une visualisation concise des différences, facilitant ainsi une compréhension rapide et efficace.

L'analyse des avantages et inconvénients des onduleurs a été suivie par une exploration de leurs diverses applications, démontrant leur polyvalence et leur importance. Nous avons examiné en détail les aspects techniques, fonctionnels et contextuels des onduleurs autonomes, en mettant en lumière leur architecture, leurs composants clés, ainsi que leurs modes de gestion de l'énergie.

Les onduleurs autonomes jouent un rôle de plus en plus essentiel dans le domaine de l'énergie à travers le monde. Leur capacité à intégrer de manière efficace différentes sources d'énergie renouvelable, telles que le solaire photovoltaïque et l'éolien, tout en garantissant une gestion optimale des flux d'énergie et en proposant des options de stockage avancées, les rend indispensables pour la transition vers une économie durable et décarbonisée.

En outre, les onduleurs autonomes contribuent à la résistance et la fiabilité des systèmes énergétiques, en favorisant une meilleure intégration des énergies intermittentes dans les réseaux électriques et en proposant des solutions de secours en cas de panne ou de situations d'urgence.

Sur le plan futur, les onduleurs autonomes sont destinés à occuper une place encore plus importante dans la durabilité énergétique. Les progrès constants dans les technologies de stockage, les algorithmes de contrôle et l'intégration des énergies renouvelables les rendront plus performants, plus souples et plus accessibles. Leur mise en place à l'échelle mondiale contribuera non seulement à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à atténuer les conséquences du changement climatique, mais aussi à promouvoir une transition énergétique inclusive et équitable.

En fin, les onduleurs autonomes représentent une technologie essentielle pour répondre aux défis énergétiques du 21^e siècle. Leur adoption généralisée et leur développement continu sont essentiels pour assurer un avenir énergétique durable et résilient pour les générations futures. Ce chapitre a présenté le système global de l'onduleur autonome et ses éléments principaux, détaillant les différentes composantes constitutives. Les résultats des simulations, qui seront présentés dans le dernier chapitre, confirmeront la réalisation de notre objectif de produire une tension de sortie parfaitement sinusoïdale à partir d'une tension continue fournie par le générateur photovoltaïque.

Références bibliographiques

- [1] « Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations ». Doctoral dissertation, Université de Grenoble, 2012.
- [2] IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. <https://www.ipcc.ch/>
- [3] « Les convertisseurs statiques », communication technique, L. P . La Chauvinière <http://electrotech1el2.blogspirit.com/files/07%20Convertisseurs%20statiques%20%C3%A9%20%C3%A8ve.pdf>
- [4] Muhammad H. Rachid, « Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications », Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [5] C. Canudas de Wit, « Modélisation, Contrôle Vectoriel et DTC, Commande des Moteurs asynchrones », Editions Hermès.
- [6] M. Pinard, « convertisseurs et électronique de puissance et puissance de commande, description », mise en œuvre Dunod, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p116.
- [7] S. MECHERI, « Réalisation d'un onduleur de tension monophasée centrale par carte ARDUINE », Université de Constantine I, 2013/2014.
- [8] F. Labrique, G. Séguier, R. Bausière, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance », Volume 4 : La conversion continu alternatif. Editions LAVOISIER.
- [9] ABOELSAUD, Raef, IBRAHIM, A., et GARGANEEV, Alexander G. « Review of three-phase inverters control for unbalanced load compensation ». International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2019, vol. 10, no 1, p. 242.
- [10] Onduleurs et harmoniques, Cahiers techniques Merlin Gerin N°159.

- [11] Onduleur autonome - Comparez les prix pour professionnels sur Hellopro.fr - page 1. https://materiel.hellopro.fr/onduleur-autonome-3005404-1-feuille.html#description_suite, 8 juillet 2024.
- [12] *Différents types d'onduleurs autonomes.* https://turgotlimoges.scenari-community.org/STI2D/2_TSTI2D/SEQUENCES/1_SERRURE_BIOMETRIQUE/co/Onduleurs_differeents_types.html. Consulté le 22 juin 2024.
- [13] MULTON B., Ruer J., *Stocker l'électricité : oui, c'est indispensable et c'est possible.* publication ECRIN en contribution au débat national sur les énergies, avril 2003.
- [14] BOYE H., « Le stockage de l'énergie électrique, Panorama des technologies », REE N° 3/2013, p. 30-41, 2013.
- [15] COROLLER P., PASQUIER M., « Les challenges « batteries » et « infrastructures de charge » du véhicule électrique », REE N° 1/2013, p. 49-56, 2013.
- [16] KAWAKAMI N., IJIMA Y., SAKANAKA Y., « Development and field experiences of stabilization system », *International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Bari, p. 2371-2376, 4-7 juillet 2010.
- [17] ROBERT J., ALZIEU J., *Accumulateurs. Accumulateurs « redox-flow »*, Techniques de l'ingénieur, Traité de Génie Electrique, D3357, 2005.
- [18] Cadre d'action en matière de climat et d'énergie d'ici à 2030 | Action pour le climat (europa.eu).
- [19] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step>.
- [20] Stockage d'énergie : l'invention géniale d'une startup suisse (futura-sciences.com).
- [21] Vattenfall lance un projet pilote de stockage d'énergie dans du sel – Les Smartgrids (les-smartgrids.fr).
- [22] Stocker dix fois plus d'énergie thermique avec du sel nano-enrobé (azonano.com).

[23] M. Belhadj, « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome », mémoire de magister, Université de Bechar, 2008.

[24] HASSINI née BELGHITRIHOUDA, « modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque », université Abou-bakrbelkaid de Tlemcen, 2010.

[25] « GESTION DE L'ÉNERGIE : TOUT CE QUE VOUS DEVEZ SAVOIR POUR COMMENCER ». *KNX*, 20 septembre 2021, <https://sustainabilityknx.org/fr/articles-fr/gestion-de-lenergie-tout-ce-que-vous-devez-savoir-pour-commencer/>.

[26] MOUSSOUNI N Eddine., OUADFEL Sofiane, « Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasé », mémoire master, université abderrahmane mira-bejaia, 2017.