

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTE DE TECHNOLOGIES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE  
N° : CE-09



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE  
OPTION : COMMANDE ELECTRIQUES

**Mémoire Présenté pour l'Obtention  
du Diplôme de Master Académique**

**Par:**

**RABHI Rabia**

**FADEL Djilali**

**Intitulé**

**Commande avancé d'un onduleur  
autonome**

**Soutenu devant le jury composé de:**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
Dr. OUAGUENI Fayssal	MCA	Université de M'sila	Président
Dr. BENGUESMIA Hani	MCA	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. HELLALI Lallouani	MAB	Université de M'sila	Co-Rapporteur
Dr. HERIZI Abdelghafour	MCA	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2023/ 2024**

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTE DE TECHNOLOGIES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE  
N° : CE-09



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE  
OPTION : COMMANDE ELECTRIQUES

**Mémoire Présenté pour l'Obtention  
du Diplôme de Master Académique**

**Par:**

**RABHI Rabia**

**FADEL Djilali**

**Intitulé**

**Commande avancé d'un onduleur  
autonome**

**Soutenu devant le jury composé de:**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
Dr. OUAGUENI Fayssal	MCA	Université de M'sila	Président
Dr. BENGUESMIA Hani	MCA	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. HELLALI Lallouani	MAB	Université de M'sila	Co-Rapporteur
Dr. HERIZI Abdelghafour	MCA	Université de M'sila	Examineur
Dr. DJERIOUI Ali	Pr	Université de M'sila	Représentant de l'incubateur/CATI
Mr. SAOUDI Mohammed	Ingénieur	Direction Matériel Cosider -M'sila	Partenaire socio-économique

**Année universitaire : 2023/ 2024**

## Remerciements

*En premier lieu, nous remercions DIEU tout puissant, qui nous a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous remercions particulièrement notre promoteur **Dr. Hani Benguesmia**, Maître de conférences, à l'université de M'sila, et **Dr. Lallouani Hellali**, Maître assistant, à l'université de M'sila, pour son dévouement exceptionnel, sa précieuse directive et son suivi constant.*

*Nous tenons également à remercier les membres du jury, **M. Fayssal Ouagueni**, Maître de conférences, enseignant à l'université de M'sila, **M. Abdelghafour Herizi**, Maître de conférences, enseignant à l'université de M'sila, **M. Mohammed Saoudi**, ingénieur à la Direction Matériel Cosider - M'sila, notre partenaire socio-économique, **M. Ali Djiroui**, professeur, enseignant à l'université de M'sila, et le représentant de l'incubateur/CATI pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.*

*Nous tenons à remercier nos parents car ce travail représente un petit fruit de leur souffrance et qui sans eux nous ne pouvons traverser ces longues années d'études et de travail.*

*J'adresse mes vifs remerciements à tous les enseignants ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

تعتبر المموجات المستقلة أجهزة مهمة وحاسمة في تحويل الطاقة لتطبيقات مثل أنظمة الطاقة غير المنقطعة وأنظمة الطاقة المتجددة. يتطلب التحكم في هذه المموجات تقنيات متقدمة لضمان الأداء الأمثل، خاصة من حيث الاستجابة الديناميكية والاستقرار. الهدف من مذكرتنا هو التركيز على محاكاة وتقييم التحكم المتقدم في التيار الميت لمموج مستقل. تظهر نتائج المحاكاة أن أسلوب التحكم الميت (**dead-beat**) يمكن أن يتفوق في الأداء على تقنيات التحكم التقليدية، مما يجعله خيارًا واعدًا لتطبيقات المموجات المستقلة.

**الكلمات المفتاحية:** التحكم بالنبض الميت، مموج أحادي الطور، قانون التحكم.

---

## Résumé

Les onduleurs autonomes sont des dispositifs cruciaux dans la conversion de l'énergie pour des applications telles que les systèmes d'alimentation sans interruption et les systèmes d'énergie renouvelable. La commande de ces onduleurs nécessite des techniques avancées pour garantir une performance optimale, en particulier en termes de réponse dynamique et de stabilité. L'objectif de notre mémoire se concentre sur la simulation et l'évaluation de la commande dead-beat avancée pour un onduleur autonome. Les résultats des simulations montrent que l'approche dead-beat peut surpasser les techniques de commande traditionnelles, faisant d'elle une option prometteuse pour les applications d'onduleurs autonomes.

**Mots clés:** Contrôle dead-beat, Onduleur monophasé, Loi de commande.

---

## Abstract

Stand-alone inverters are crucial devices in energy conversion for applications such as uninterruptible power systems and renewable energy systems. Controlling these inverters requires advanced techniques to ensure optimal performance, particularly in terms of dynamic response and stability. The objective of our dissertation is to focus on the simulation and evaluation of advanced dead-beat control for a stand-alone inverter. Simulation results show that the dead-beat approach can outperform traditional control techniques, making it a promising option for stand-alone inverter applications.

**Keywords:** Dead-beat control, Single phase inverter, Control law.

---

A decorative horizontal border with rounded ends, resembling a scroll or a ribbon, framing the text.

## **"Liste des Acronymes&Symboles"**

**Liste des Acronymes & Symboles**

PV	Photovoltaïques
DC	Direct current (Courant continue)
PI	Correcteur, Proportionnel Intégrateur
I	Le courant de sortie de cellule
$I_d$	Le courant de diode
$I_p$	Le courant de résistance shunt
$I_{SC}$	Courant de cellule solaire (source de courant)
$I_0$	Courant de saturation inverse de la diode
q	Charge de l'électron
k	Constante de Boltzmann
T	Température absolue
$V_{OC}$	Tension maximale en circuit ouvert
$P_{max}$	Puissance maximale fournie par la cellule
MPPT	Maximum Power Point Tracking
DC-DC	Convertisseur DC-DC électronique haute fréquence
AC	Courant alternatif
$D_i$	Diode
$C_i$	Condensateur
$S_i$	Interrupteur (commutation)
R	Résistance
$I_D$	Courant de diode (A)
L	Inductance
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
$V_{dc}$	Source de tension continue
$i_c$	Courant dans la capacité
$i_R$	Courant dans la Résistance
$i_L$	Courant dans l'inductance
$T_i$	Interrupteur
$T_e$	Période d'échantillonnage
$V_{inv}$	Tension de sortie de l'onduleur

$\Delta T(k)$	Largeur d'impulsion
$k^e$	Intervalle d'échantillonnage
$V_c$	Tension de sortie nominale
E	Tension continue
L	Inductance du filtre
R	Résistance
$F_s$	Fréquence d'échantillonnage



**"Liste des Figures & Tableaux"**

Liste des Figures & Tableaux

N°	Figures	Pages
<b>Chapitre I : "Généralités sur les systèmes photovoltaïques"</b>		
<b>Fig. I.1.</b>	Schéma de principe de la conversion photoélectrique	<b>07</b>
<b>Fig. I.2.</b>	Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	<b>08</b>
<b>Fig. I.3.</b>	Cellules, module et panneau photovoltaïques	<b>09</b>
<b>Fig. I.4.</b>	Circuit équivalent cellule solaire	<b>10</b>
<b>Fig. I.5.</b>	Relations entre la courbe ( $I$ vs $V$ ) et la courbe ( $P$ vs $V$ ).	<b>11</b>
<b>Fig. I.6.</b>	Couplage direct générateur photovoltaïque-charge	<b>15</b>
<b>Fig. I.7.</b>	Système photovoltaïque avec stockage	<b>16</b>
<b>Fig. I.8.</b>	Chaîne de conversion photovoltaïque autonome	<b>17</b>
<b>Fig. I.9.</b>	Fonctionnalités générales des systèmes photovoltaïques connectés au réseau	<b>17</b>
<b>Chapitre II : "Les onduleurs photovoltaïques monophasés ainsi leurs contrôle"</b>		
<b>Fig. II.1.</b>	Conversion continue-alternative	<b>21</b>
<b>Fig. II.2.</b>	Onduleur demi-pont monophasé	<b>25</b>
<b>Fig. II.3.</b>	Onduleur à pont complet monophasé	<b>26</b>
<b>Fig. II.4.</b>	Filtre type L	<b>27</b>
<b>Fig. II.5.</b>	Filtre type LC	<b>27</b>
<b>Fig. II.6.</b>	Schéma du filtre LCL	<b>28</b>
<b>Fig. II.7.</b>	Représentation du circuit d'un onduleur monophasé à pont complet	<b>29</b>
<b>Fig. II.8.</b>	Modèle d'espace d'état d'un onduleur monophasé	<b>30</b>
<b>Fig. II.9.</b>	Classification des techniques de contrôle classiques	<b>31</b>
<b>Fig. II.10.</b>	Classification des techniques de contrôle avancées	<b>31</b>
<b>Fig. II.11.</b>	Commande linéaire d'un onduleur monophasé	<b>32</b>
<b>Fig. II.12.</b>	Les différentes techniques de commandes	<b>33</b>
<b>Fig. II.13.</b>	Schéma synoptique de la MLI	<b>34</b>
<b>Fig. II.14.</b>	Exemple de la configuration MLI unipolaire avec les états des interrupteurs 1 et 4, simulé avec PSIM	<b>35</b>

<b>Fig. II.15.</b>	Structure d'un régulateur PI	<b>36</b>
<b>Fig. II.16.</b>	Représente le principe de génération des ordres de commande	<b>37</b>
<b>Fig. II.17.</b>	Principe de génération des signaux de commande	<b>38</b>
<b>Fig. II.18.</b>	Résultat de simulation par PSIM de commande	<b>38</b>

**Chapitre III : "Contrôle avancé (Dead-beat) D'un Onduleur Autonome"**

<b>Fig. III.1.</b>	Schéma d'un onduleur monophasé avec la commande proposé	<b>45</b>
<b>Fig. III.2.</b>	MLI triangulo-sinusoïdale	<b>46</b>
<b>Fig. III.3.</b>	Schéma de base du système proposé	<b>47</b>
<b>Fig. III.4.</b>	Schéma de base, la tension et le courant $i_L$ par PSIM	<b>48</b>
<b>Fig. III.5.</b>	Diagrammes de bode de la fonction de transfert avec variation de charge R par PSIM	<b>49</b>
<b>Fig. III.6.</b>	Modèle MLI à deux niveaux,(a) Alternance positive, (b) Alternance négative.	<b>50</b>
<b>Fig. III.7.</b>	Contrôle dead-beat par PSIM	<b>52</b>
<b>Fig. III.8.</b>	La tension de sortie onduleur	<b>53</b>
<b>Fig. III.9.</b>	La tension de référence vs la tension de condensateur	<b>53</b>
<b>Fig. III.10.</b>	Allure courant du condensateur	<b>54</b>
<b>Fig. III.11.</b>	Allure de courant de la charge	<b>54</b>
<b>Fig. III.12.</b>	Forme de la tension de condensateur	<b>55</b>
<b>Fig. III.13.</b>	Allure de courant de charge mesuré	<b>55</b>
<b>Fig. III.14.</b>	Allure courant du condensateur après l'insertion de R	<b>55</b>

N°	Tableaux	Pages
----	----------	-------

**Chapitre III : "Contrôle avancé (Dead-beat) D'un Onduleur Autonome"**

<b>Tab. III.1.</b>	Schéma d'un onduleur monophasé avec la commande proposé	<b>45</b>
<b>Tab. III.2.</b>	Paramètres de l'onduleur	<b>52</b>



**"Sommaire"**

## Sommaire

---

### Sommaire

Liste des Acronymes et Symboles	i
Liste des Figures et Tableaux	v
Sommaire	vi
Introduction Générale	01

### Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1.Introduction	05
I.2. Généralité « Générateur photovoltaïques (PV) »	05
I.3.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	06
I.3. 1. Avantages	06
I.3. 2. Inconvénients	06
I.4. Principe d'une cellule photovoltaïque	06
I.5. Assemblage des cellules PV	08
I.6. Modélisation électrique d'une cellule PV	09
I.7. Puissance d'une cellule photovoltaïque	11
I.8. Architecture des systèmes PV	14
I.8.1. Système photovoltaïque autonome	15
I.8.2. Système photovoltaïque connecté au réseau	17
I.9.Conclusion	18

### Chapitre II : Les onduleurs photovoltaïques monophasés ainsi leurs contrôle

II.1. Introduction	20
II.2.Généralités sur les onduleurs photovoltaïques monophasés	20
II.2.1. Description	20
II.2.2. Applications des onduleurs	21
II.2. 3.Classification des onduleurs	22
II.3. Onduleur autonome	23
II.4.Types d'onduleurs autonomes	24
II.4. 1.Onduleur monophasée en demi-pont	24

## Sommaire

---

II.4. 2. Onduleur à pont complet monophasé	25
II.4. 3. Onduleur non autonome	26
II.5. Le filtre	26
II.5. 1. Filtre L	26
II.5. 2. Filtre LC	27
II.5. 3. Filtre LCL	28
II.6. Modélisation d'un onduleur monophasé	28
II.7. Techniques de commandes d'un convertisseur DC/AC	31
II.7.1. La technique de commande classique	32
II.7.1. 1. Commande linéaire d'un onduleur monophasé	32
II.7.1. 2. Commande non linéaire d'un onduleur monophasé	36
II.7.2. La technique de commande avancée	39
II.8. Conclusion	42

### **Chapitre III: Commande avancé (Dead-beat) d'un onduleur autonome**

III.1. Introduction	44
III.2. Onduleur monophasé	44
III.3. Système étudié	45
III.4. Résultats de simulation	51
III.5. Conclusion	56
Conclusion générale	57
Références	59



**" Introduction Générale"**

### Introduction Générale

Les onduleurs autonomes jouent un rôle crucial dans les systèmes de conversion d'énergie, en particulier dans les applications où la continuité et la qualité de l'alimentation électrique sont essentielles. Ces dispositifs convertissent la puissance continue (DC) provenant de sources telles que les panneaux solaires en puissance alternative (AC) utilisable par les appareils électriques domestiques, industriels et commerciaux. L'importance des onduleurs autonomes est amplifiée dans les contextes des énergies renouvelables et de l'autoconsommation, où ils facilitent l'intégration des sources d'énergie intermittentes dans le réseau électrique ou dans des systèmes isolés. [1]

Le contrôle des onduleurs autonomes présente de nombreux défis techniques. Ces défis incluent la gestion des variations de charge, la compensation des perturbations, la garantie de la stabilité du système et l'optimisation de l'efficacité énergétique. Un contrôle inadéquat peut entraîner des problèmes tels que des distorsions harmoniques, des fluctuations de tension et une dégradation des performances globales du système. Par conséquent, un contrôle avancé et efficace est indispensable pour assurer la fiabilité et la robustesse des onduleurs autonomes.[2-3]

Le développement des techniques de commande et contrôle avancé pour les onduleurs autonomes sont essentiels pour répondre aux exigences croissantes des systèmes modernes d'alimentation électrique. Ces techniques permettent de répondre efficacement aux besoins des énergies renouvelables, des micro-réseaux et des solutions d'autoconsommation, en garantissant une alimentation électrique stable, efficace et de haute qualité. En outre, elles favorisent l'intégration des technologies vertes et la transition vers des systèmes énergétiques durables et résilients.[4]

Les commandes avancées des onduleurs autonomes sont des techniques de contrôle sophistiquées utilisées pour réguler le comportement de systèmes complexes, tels que les processus industriels, les systèmes électriques et les systèmes mécaniques. Elles permettent d'obtenir des performances supérieures en termes de précision, de rapidité de réponse, de rejet des perturbations et de robustesse par rapport aux commandes classiques. [4]

La commande par dead-beat est une stratégie avancée de régulation de la tension de sortie utilisée dans les onduleurs autonomes. Cette méthode se révèle particulièrement efficace dans les systèmes d'alimentation électrique exigeant une précision élevée et une réactivité rapide face aux variations de charge. Elle représente une approche efficace de contrôle pour les onduleurs autonomes, offrant une tension de sortie de haute qualité avec une réactivité rapide et une grande précision. Son utilisation est particulièrement bénéfique dans les systèmes d'alimentation électrique nécessitant une fiabilité accrue et une efficacité énergétique optimale.[5]

Le contrôle des onduleurs autonomes présente de nombreux défis techniques. Ces défis incluent la gestion des variations de charge, la compensation des perturbations, la garantie de la stabilité du système, et l'optimisation de l'efficacité énergétique. Un contrôle inadéquat peut entraîner des problèmes tels que des distorsions harmoniques, des fluctuations de tension, et une dégradation des performances globales du système. Par conséquent, un contrôle avancé et efficace est indispensable pour assurer la fiabilité et la robustesse des onduleurs autonomes.[6]

L'objectif principal de notre mémoire de master est d'appliquer le contrôle avancé des onduleurs autonomes afin d'améliorer la performance dynamique et statique de ces dispositifs. Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé de la manière suivante :

Le premier chapitre comprend une généralité sur les systèmes photovoltaïques, une description de la cellule solaire, ainsi qu'une brève description des onduleurs.

Le second chapitre rappelle brièvement la description des onduleurs monophasés, puis aborde les commandes conventionnelles et avancées des onduleurs, telles que les approches linéaires et non linéaires.

Le dernier chapitre se concentre sur la commande dead-beat de l'onduleur monophasé, débutant par la modélisation de l'onduleur. Ensuite, il explore le dimensionnement d'un filtre LC conçu pour atténuer les hautes fréquences de la tension de sortie du convertisseur DC/AC. Par la suite, il détaille la mise en œuvre de la commande dead-beat. Enfin, il présente les résultats de simulations réalisées avec PSIM, confirmant l'efficacité du contrôle dead-beat appliqué à l'onduleur monophasé autonome.

Nous concluons notre travail par une conclusion générale qui synthétise l'ensemble de notre étude.

## **Chapitre I**

**"Généralités sur les systèmes photovoltaïques"**

**I.1. Introduction**

L'énergie renouvelable est une désignation donnée à l'énergie obtenue à partir de sources illimitées telles que la lumière du soleil, le vent, les marées, l'hydrogène et la chaleur géothermique.

C'est une énergie renouvelable (renouvelée naturellement), disponible en permanence et dont la quantité n'est pas affectée par la consommation humaine.

Les énergies renouvelables sont devenues une méthode de production d'électricité essentielle dans les zones éloignées et rurales.

Ces énergies, provenant de sources comme le soleil, le vent et la géothermie, est disponible de manière illimitée et renouvelée naturellement.

Elle est devenue essentielle pour la production d'électricité dans les zones éloignées et rurales, offrant une solution économique et fiable grâce aux panneaux solaires.

L'industrie s'est concentrée depuis 1995 sur les centrales photovoltaïques intégrées au réseau électrique, soutenue par divers secteurs de fabrication et d'installation.

Les cellules solaires convertissent efficacement la lumière du soleil en électricité, sans pièces mobiles ni pollution, et peuvent alimenter des systèmes autonomes ou être connectées au réseau électrique. [7-8]

Ce chapitre contient un aperçu des systèmes PV en deux étapes :

✚ Description de la cellule solaire (première étape du processus de conversion de l'énergie solaire en électricité), ainsi qu'une explication des paramètres associés à ses performances.

✚ Brèves descriptions des onduleurs.

**I.2. Généralité « Générateur photovoltaïques (PV) »**

Le système photovoltaïque est un ensemble d'éléments qui sert à la production d'électricité à partir du rayonnement solaire. Un générateur PV alimente une charge continue ou alternative via une interface d'électronique de puissance.

Le composant de base de ce système s'appelle cellule. Il produit de l'énergie électrique à chaque fois qu'il reçoit de l'éclairement. Le développement de la production d'électricité photovoltaïque se développe beaucoup au niveau domestique en particulier dans les pays où les problèmes environnementaux sont pris au sérieux (Allemagne, Suisse...) et dans les pays en voie de développement.[9]

### I.3. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque présente plusieurs avantages et inconvénients:[6]

#### I.3.1. Avantages

Les avantages de l'énergie photovoltaïque sont multiples :

- ✚ La production de cette énergie est propre,
- ✚ Les systèmes photovoltaïques sont très fiables,
- ✚ L'énergie photovoltaïque Particulièrement attractive pour leur opération silencieuse,
- ✚ Modulaires, Ses composants sont adaptés à un usage architectural et esthétique (implantés sur ou en toiture ou de façade, sous forme de brise-soleil...),
- ✚ Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé,
- ✚ Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes,
- ✚ Technologie encore émergente, son coût lui permet d'être souvent compétitif par rapport aux solutions classiques dans les sites éloignés du réseau électrique ne demandant pas de très grosse quantité d'électricité fournie, ou dans des sites urbains lorsqu'elle évite des coûts de raccordement au réseau électrique public.

#### I.3.2. Inconvénients

- ✚ Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable,
- ✚ Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé,
- ✚ S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente,
- ✚ Le rendement réel de conversion d'un module est faible,
- ✚ Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans),
- ✚ Pollution à la fabrication.

### I.4. Principe d'une cellule photovoltaïque

L'élément de base de la transformation lumière-électricité est la cellule photovoltaïque, elle est découverte en 1954 [10] en examinant la sensibilité d'une plaquette de silicium correctement

préparée à la lumière du soleil. Parmi les premières applications figurait celle de l'alimentation des satellites spatiaux.

Le succès de la cellule solaire dans l'espace a conduit à des applications commerciales de la technologie photovoltaïque. L'alimentation photovoltaïque la plus simple a été utilisée avec de nombreux appareils de faible puissance tels que les montres-bracelets et les petites calculatrices [11-12].

Des systèmes plus complexes ont été développés pour fournir de l'électricité aux habitations domestiques.

Les cellules solaires sont conçues pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique dans un processus de conversion en une seule étape. Cette conversion a lieu sans l'utilisation de réactions chimiques ou de pièces mobiles. Les cellules solaires sont essentiellement des jonctions semi-conductrices sous illumination.

L'énergie des photons visibles est suffisante pour exciter les électrons liés dans les solides jusqu'à des états d'énergie plus élevés. La lumière génère des paires électron-trou des deux côtés de la jonction entre l'émetteur de type n et dans la base de type p. Les électrons générés (de la base) et les trous (de l'émetteur) diffusent vers la jonction et sont balayés par le champ électrique. [13]

Les électrons excités génèrent une différence de potentiel ou force électromotrice entre les bornes de la cellule solaire.

Les électrons excités reviennent rapidement à leur état fondamental. Cependant, le dispositif photovoltaïque est conçu pour extraire les électrons excités pour alimenter un circuit externe (charge), (voir figure I.1).

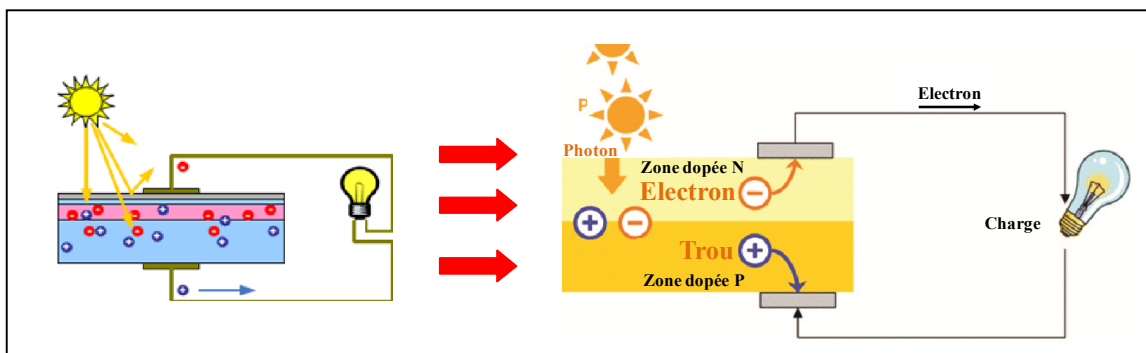


Figure I.1. Schéma de principe de la conversion photoélectrique.

L'efficacité de la cellule solaire dépend des matériaux absorbant la lumière et du mode de connexion au circuit externe. Par conséquent, la surface est traitée afin de refléter le moins possible de lumière visible – elle apparaît ainsi en bleu foncé ou en noir.

Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces. [14]

Les courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque représentent la variation du courant qu'elle produise en fonction de la tension à ces borne, depuis le court-circuit jusqu'au circuit ouvert.

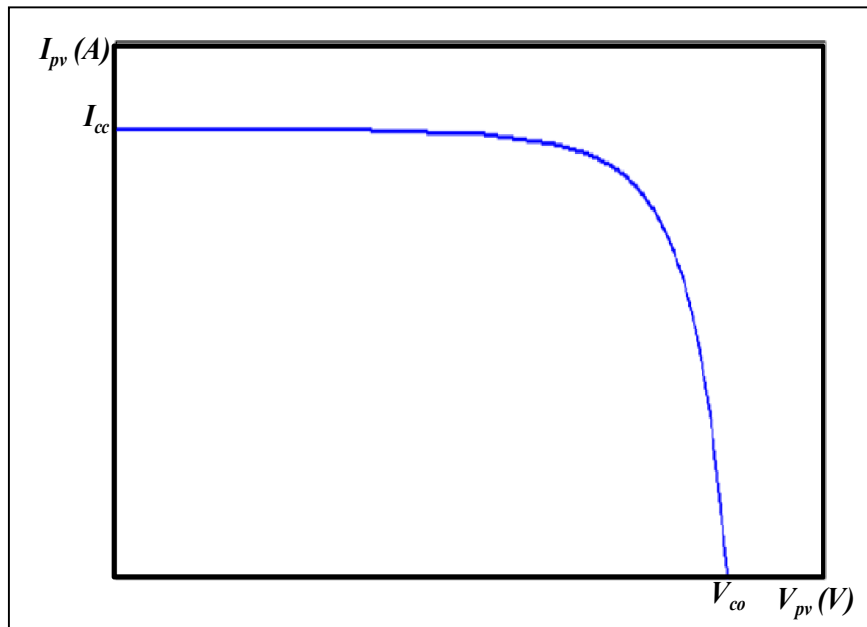


Figure I.2. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.

### I.5. Assemblage des cellules PV

La cellule photovoltaïque a une surface à peu près 150 cm<sup>2</sup>, typiquement produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Cette faible puissance est insuffisante pour la plupart des applications photovoltaïques domestiques ou industrielles.

Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque. [15]

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

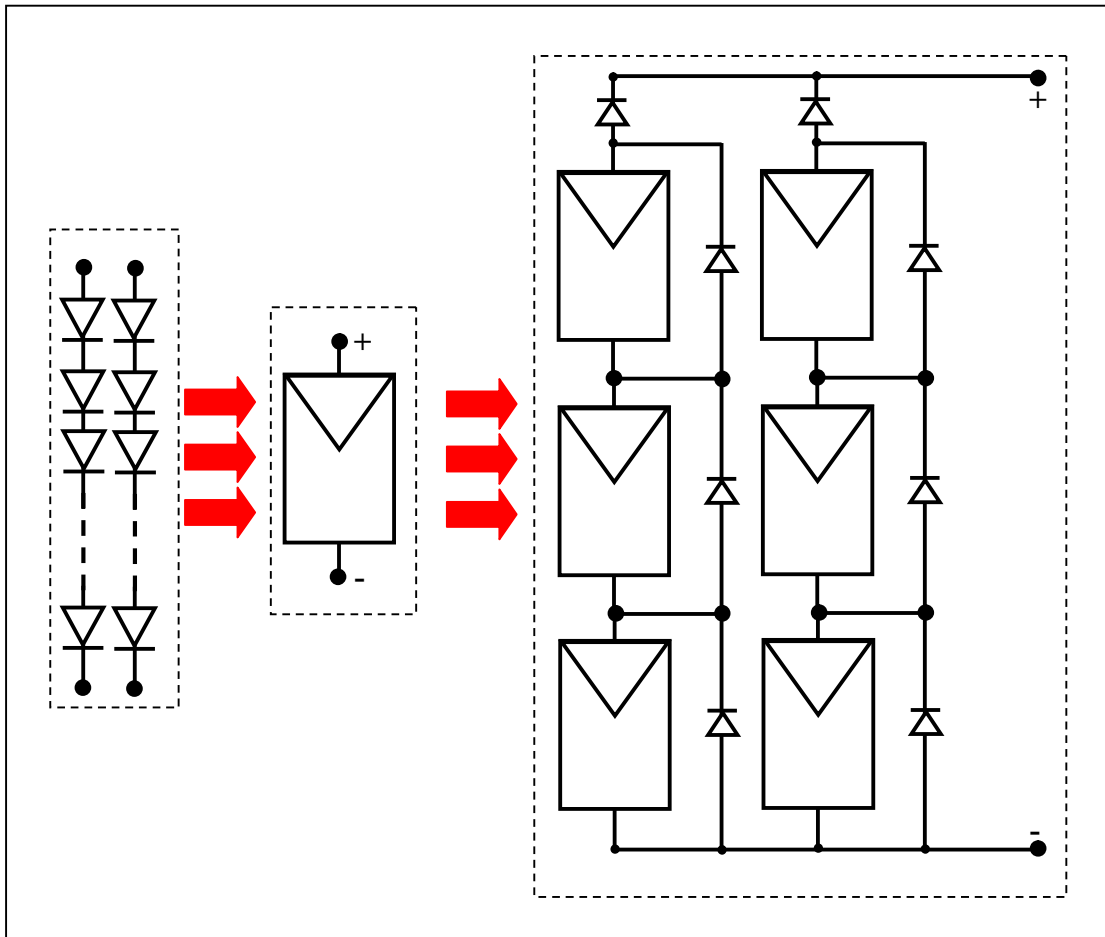


Figure I.3. Cellules, module et panneau photovoltaïques.

### I.6. Modélisation électrique d'une cellule PV

Les cellules solaires ont des propriétés non linéaires car elles sont formées à partir d'une jonction p-n.

Afin de comprendre le comportement électronique de la cellule solaire, il est utile de créer un circuit équivalent à base de composants électriques dont les comportements sont bien connus. Un tel circuit équivalent est représenté sur la figure I.4.

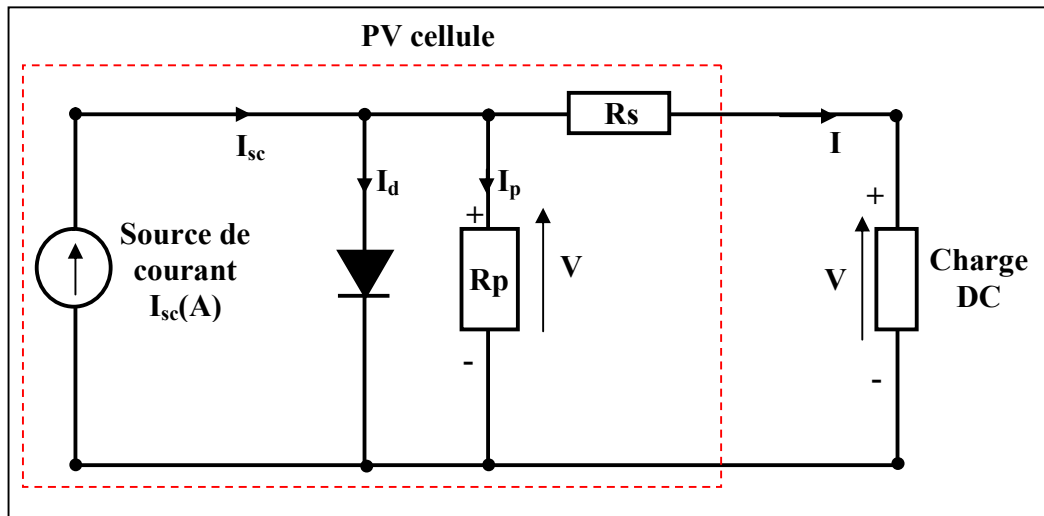


Figure I.4. Circuit équivalent cellule solaire.

Ce circuit équivalent a une relation courant-tension à sa sortie. Dans certains cas, l'approximation permet de dessiner un circuit équivalent d'une cellule solaire en termes de cellule solaire idéale représentée par une source de courant en parallèle avec diode en négligeant les résistances (en considérant la résistance shunt égale à l'infini et la résistance série égale à zéro) [3,5,16]. Mais il n'y a pas de cellule solaire idéale dans la pratique.

Une expression mathématique du circuit équivalent de la cellule solaire peut être obtenue à partir de la loi actuelle de Kirchhoff donnée par (I.1):

$$I_{sc} = I_d + I_p + I \quad (I.1)$$

Où :

$I$  : Le courant de sortie de cellule,

$I_d$  : Le courant de diode,

$I_p$  : Le courant de résistance shunt.

Le courant à travers chaque élément de circuit équivalent est régi par la tension à travers eux, de sorte que le courant de diode est donné par l'équation I.2.

$$I_d = I_0 \left( e^{qV_d/kT} - 1 \right) \quad (I.2)$$

$$V_d = V + I.R_s \quad (I.3)$$

Où :

$I_0$  :est le courant de saturation inverse de la diode.

$e$ : est la charge de l'électron,

$k$ : est la constante de Boltzmann

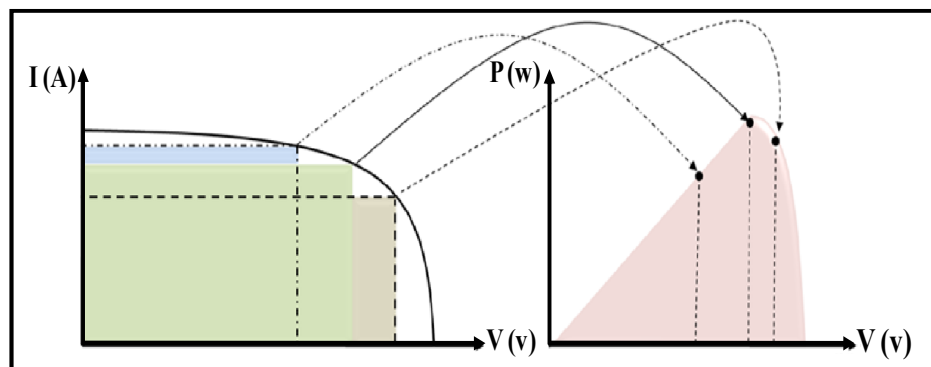
$T$ :est la température absolue. A  $25^0 C$  , le facteur  $q/kT \approx 0.0259 \text{ volt}^{-1}$

En remplaçant les équations I.2 et I.3 en I.1 et en réorganisant les termes, une équation caractéristique de la cellule solaire peut être dérivée comme dans l'équation I.4, qui relie les paramètres de la cellule solaire à la tension et au courant de sortie [13].

$$I = I_{SC} - I_0 (e^{qV_d/kT} - 1) - \frac{V_d}{R_p} \quad (\text{I.4})$$

### I.7. Puissance d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire est caractérisée par sa tension maximale en circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) à courant de sortie nul et son courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ) à tension de sortie nulle. La cellule ne génère aucune puissance en court-circuit ou en circuit ouvert. La cellule délivre une puissance maximale  $P_{max}$  lorsqu'elle fonctionne à un point de la caractéristique où le produit  $I.V$  a une valeur maximale. Les formes de courbe ( $V \text{ vs. } I$ ) et ( $V \text{ vs. } P$ ) sont illustrées à la figure I.5, et la position du point de puissance maximale représente la plus grande surface du rectangle.[12]



**Figure I.5.** Relations entre la courbe ( $I \text{ vs. } V$ ) et la courbe ( $P \text{ vs. } V$ ).

L'efficacité d'une cellule solaire est définie comme la puissance  $P_{max}$  fournie par la cellule au point de puissance maximale dans des conditions de test standard, divisée par la puissance du rayonnement incident sur elle. Les conditions les plus fréquemment utilisées sont : éclairement de  $100 \text{ mW/cm}^2$ , spectre standard [13] et température de  $25^0 C$ . L'utilisation de cette valeur

d'éclairement standard est particulièrement pratique car le rendement de la cellule en pourcentage est alors numériquement égal à la puissance de sortie de la cellule en  $[mW/cm^2]$ .

L'irradiance solaire et la température des cellules représentent l'effet net de la variation des caractéristiques des cellules solaires. Chaque valeur donnée d'irradiance solaire et de température de cellule donnera une caractéristique unique à la cellule.

La température ( $T$ ) affecte l'équation caractéristique via le terme exponentiel. Lorsque la température augmente, l'amplitude du terme exponentiel dans l'équation caractéristique diminue. La valeur de  $I_0$  est exponentiellement proportionnelle à la température. L'effet net de l'augmentation de la température est de réduire la tension en circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) de manière linéaire. L'ampleur de cette réduction est inversement proportionnelle à  $V_{OC}$ . Autrement dit, les cellules avec des valeurs plus élevées de  $V_{OC}$  subissent de plus petites réductions de tension avec l'augmentation de la température [13]. La quantité de courant de cellule solaire  $I_{SC}$  augmente légèrement avec l'augmentation de la température en raison d'une augmentation du nombre de porteurs générés thermiquement dans la cellule. L'effet global de la température sur l'efficacité de la cellule peut être calculé en utilisant ces facteurs en combinaison avec l'équation caractéristique, et cela dépend également de la façon dont la cellule est fabriquée. Cependant, étant donné que le changement de tension est beaucoup plus fort que le changement de courant, l'effet global sur l'efficacité a tendance à être similaire à celui sur la tension.

#### ❖ A Suivi du point de puissance maximale (MPPT)

Les systèmes de générateur PV ont deux problèmes majeurs [2,16] :

- ✚ L'efficacité de conversion de la production d'énergie électrique est très faible (par exemple 17%) [3,4], en particulier dans des conditions de faible irradiation,
- ✚ La quantité d'énergie électrique générée par les panneaux solaires change continuellement avec les conditions météorologiques.

De plus, la caractéristique de la cellule solaire ( $V$  vs.  $I$ ) est non linéaire et varie avec l'irradiation et la température. En général, le point de puissance maximale (MPPT) est un point unique sur la courbe ( $V$  vs.  $I$ ) ainsi que sur la courbe ( $V$  vs.  $P$ ) comme le montre la Figure I.5. La puissance fournie par un module PV peut être maximisée à l'aide d'un système de contrôle de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Un tel système se compose d'un conditionneur de puissance pour interfacer la sortie PV à la charge, et d'une unité de contrôle, qui pilote le

conditionneur de puissance pour extraire la puissance maximale d'un générateur PV. En conséquence, le système PV fonctionnera avec une efficacité maximale et produira sa puissance de sortie maximale.

Les cellules PV ont un point de fonctionnement unique où les valeurs du courant ( $I$ ) et de la tension ( $V$ ) de la cellule se traduisent par une puissance de sortie maximale (MPPT). Ces valeurs correspondent à une résistance de charge particulière égale à  $V/I$ . La cellule PV a une relation non linéaire entre le courant et la tension, et le MPPT se produit au coude de la courbe, où la résistance de charge est égale à la résistance équivalente Thevenin de la cellule. En fonctionnement, la tension générée aux bornes du panneau PV variera car le suivi du point de puissance maximale (MPPT) ajuste automatiquement la puissance prélevée sur le panneau, en maintenant cette puissance au maximum pour les conditions dominantes. MPPT utilise un circuit de contrôle pour rechercher ce point et permet ainsi au circuit convertisseur d'extraire la puissance maximale disponible d'une cellule.

L'emplacement du MPPT ne peut pas être trouvé facilement de manière analytique, mais peut être localisé soit par des modèles numériques, soit par des algorithmes de recherche. Par conséquent, des techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont nécessaires pour maintenir le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque à son MPPT. De nombreuses techniques MPPT ont été proposées dans la littérature [7-13]:

- ✚ Les méthodes Perturber et Observer,
- ✚ Méthodes de conductance incrémentale,
- ✚ Algorithme d'escalade,
- ✚ Contrôle du courant de court-circuit,
- ✚ Contrôle de tension en circuit ouvert.

La puissance maximale est transférée à partir d'un panneau solaire lorsque l'impédance de la charge qu'il pilote est adaptée de manière optimale à son impédance de source. De plus, l'impédance de la source du panneau varie également au fur et à mesure que les conditions de fonctionnement changent, et par conséquent, les systèmes PV plus sophistiqués utilisent un suiveur de point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser les conditions de charge du panneau à son niveau de transfert de puissance de crête. En fonctionnement, la tension générée aux bornes du panneau PV varie à mesure que le MPPT ajuste automatiquement la puissance

prélevée sur le panneau, en maintenant cette puissance au maximum pour les conditions existantes.

Le MPPT est un convertisseur DC-DC électronique haute fréquence. Il prend l'entrée DC des panneaux solaires, la transforme en AC haute fréquence et la reconvertisse en une tension et un courant DC différents pour faire correspondre exactement les panneaux à la charge.

Les MPPT fonctionnent à des fréquences de commutation relativement élevées, généralement comprises entre 20 et 80 kHz [7-13].

L'avantage du circuit haut fréquence est qu'ils peuvent être conçus avec des transformateurs à haut rendement et de petits composants.

La puissance de sortie d'un panneau solaire varie considérablement avec des conditions de charge variables, étant donné un éclairage constant sur la surface du panneau. Le convertisseur DC-DC à haut rendement peut présenter une charge électrique optimale à un panneau ou à un groupe solaire et peut produire une tension adaptée à la charge. La charge idéale pour un panneau solaire spécifique dépend du MPPT du panneau solaire.

### **I.8. Architecture des systèmes PV**

L'énergie électrique produite par les modules photovoltaïques est utilisée principalement dans deux domaines d'applications : les installations photovoltaïques en site isolé 'Autonome', ou bien ceux qui sont connectés au réseau. Ces deux applications ont des fonctions très particulières et mettent en œuvre des chaînes de conversion très différentes. [17]

#### **❖ Les systèmes de stockages**

Le stockage d'énergie représente une part importante dans un système photovoltaïque en site isolé ou pour une utilisation autonome.

Dans la plus part des cas, le stockage au moyen de batteries représente la technologie la plus rentable. Les batteries utilisées sont habituellement des batteries plomb – acide.

La technologie des batteries plomb – acide bénéficie de leurs faibles coûts par rapport à d'autres technologies et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent, car cette technologie est la plus ancienne. [18]

La nécessité du stockage est essentielle à chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis du rapport d'énergie externe.

Le stockage d'énergie répond au besoin de la demande de charge pour une durée relativement longue, qui peut aller d'un jour à des semaines. [18]

A cause de la nature stochastique des ressources renouvelables, les accumulateurs doivent pouvoir résister sans dommage à de nombreux cycles de charge et de décharge.

La durée de vie de batteries est fortement liée à l'état de charge, au nombre de cycles de charge/décharge, à la température, aux phénomènes de corrosion, condition d'utilisation,.. etc.

### I.8.1. Système photovoltaïque autonome

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité avoir besoin du réseau électrique.

Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé.

La structure la plus simple des systèmes autonomes est le couplage direct où le générateur photovoltaïque est directement relié à la charge continue (Figure I.6).

Dans cette configuration, la charge ne peut être opérationnelle que pendant les périodes d'ensoleillement suffisant.

Ce qui est faisable pour des applications qui n'ont pas besoin de fonctionner la nuit ou dans l'obscurité comme le pompage de l'eau. [19]

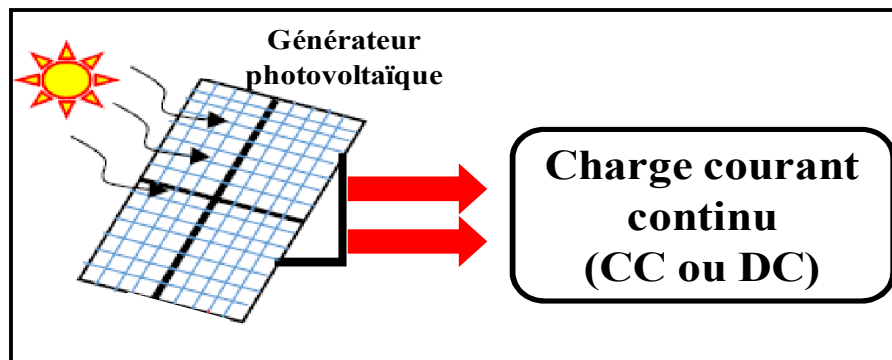


Figure I.6. Couplage direct générateur photovoltaïque-charge.

Pour des applications qui ont besoin de l'énergie électrique même la nuit et lors des moments d'obscurité, un système de stockage peut être additionné au système.

L'énergie générée par le générateur PV est stockée dans l'accumulateur d'énergie en vue d'être employée au moment du manque de l'éclaircissement.

En effet, c'est presque toujours la batterie qui dure le moins longtemps dans une application photovoltaïque.

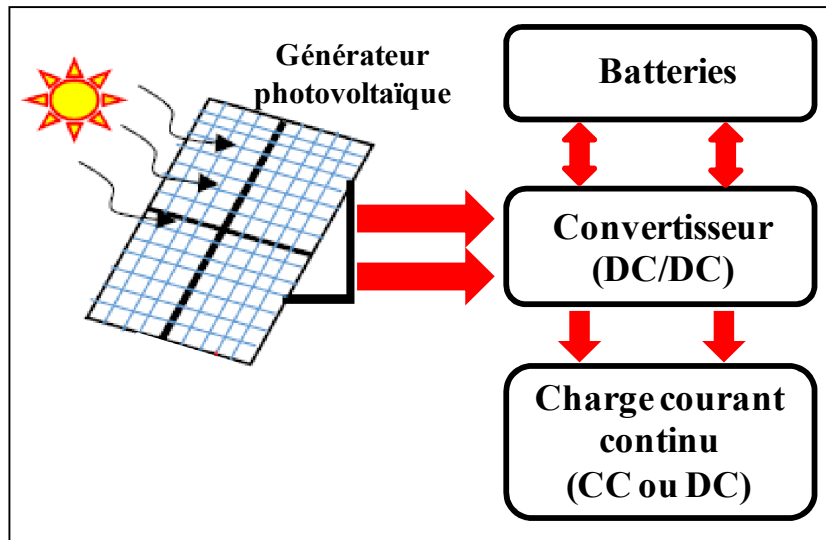


Figure I.7. Système photovoltaïque avec stockage.

Un système photovoltaïque est un dispositif utilisé pour fournir de l'énergie électrique alternative à partir d'irradiations solaires afin d'être utilisée par l'homme. Le système est constitué généralement des éléments suivants: [21]

- ✚ Le champ photovoltaïque, composé d'un ensemble de module orientés et interconnectés en série et en parallèle, qui recueillent les radiations lumineuses du soleil et les transforment en courant continu à basse tension.
- ✚ Un accumulateur, qui stock l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et permet de disposer de courant électrique la nuit ou les jours nuageux.
- ✚ Un régulateur de charge, c'est un dispositif électronique qui surveille l'état de charge des accumulateurs, il les protège contre éventuelles surcharges et contre les décharges profondes.
- ✚ Un convertisseur à pilotage MPPT, c'est un dispositif électronique qui assure que le système travaille toujours à puissance maximale.
- ✚ Un onduleur, est un dispositif électronique qui assure la conversion de la tension continue d'entrée en tension alternative de sortie.
- ✚ Charge : l'utilisation.

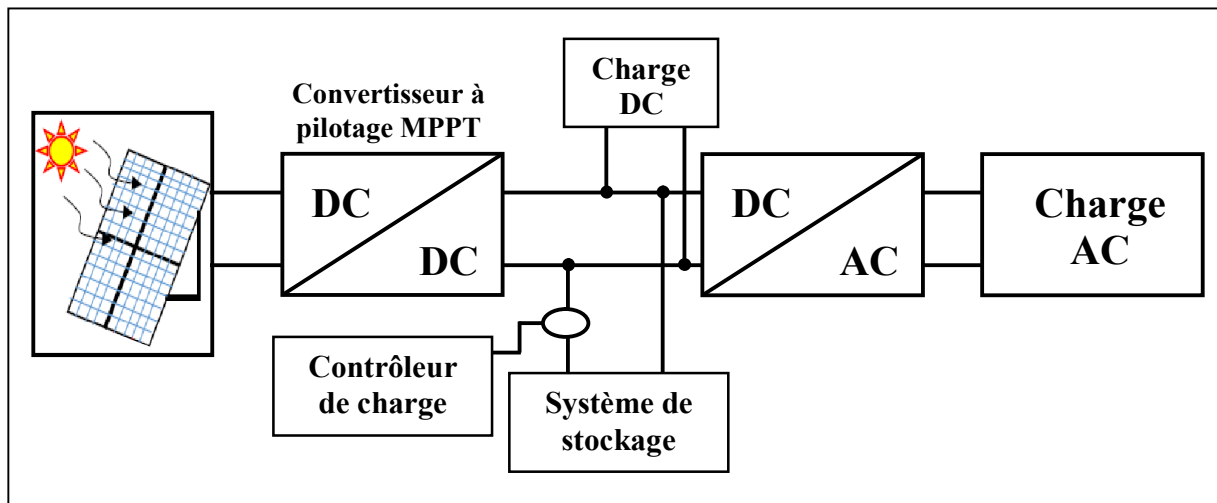


Figure I.8. Chaîne de conversion photovoltaïque autonome.

### I.8.2. Système photovoltaïque connecté au réseau

Ayant comme but final la production d'énergie, une installation photovoltaïque nécessite la mise en place d'une chaîne de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique basée sur l'effet photovoltaïque.

Quelle que soit son architecture, cette chaîne de conversion peut se décomposer en plusieurs sous-systèmes délimités selon leurs fonctionnalités.

Un premier aperçu d'un schéma conceptuel des systèmes photovoltaïques connectés au réseau (figure I.9), identifiant les principaux sous-systèmes fonctionnels et leurs fonctions générales.

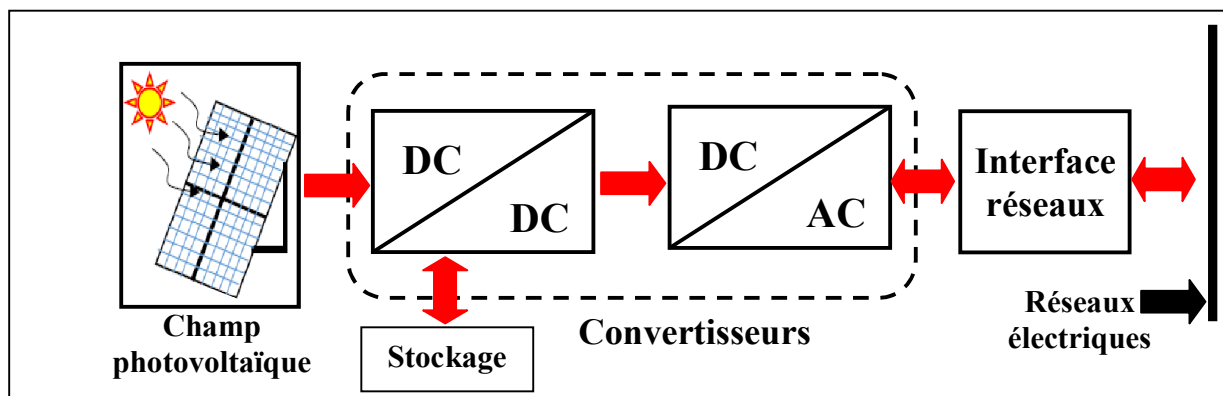


Figure I.9. Fonctionnalités générales des systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

L'énergie électrique photovoltaïque est injectée au réseau de distribution comme une source d'appoint, elle assure une quantité d'énergie demandée par le consommateur. La topologie (figure. I.9) est constituée d'un ensemble de modules photovoltaïques (champ photovoltaïque) qui assurent la conversion de l'énergie de la lumière en électricité. Le convertisseur continu-continu (hacheur) s'occupe à la fois de transférer le maximum de puissance et la charge des batteries. Le convertisseur continu alternatif assure la conversion du courant continu vers le courant alternatif exploitable dans le réseau.[20]

### **I.9. Conclusion**

Les systèmes photovoltaïques représentent une solution prometteuse pour la production d'électricité propre et renouvelable.

En somme, les systèmes photovoltaïques représentent une solution viable et essentielle pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux auxquels le monde est confronté aujourd'hui. Leur déploiement à grande échelle, associé à des politiques favorables et à des avancées technologiques continues, peut jouer un rôle crucial dans la transition vers un avenir énergétique plus durable et équitable.

## **Chapitre II**

**"Les onduleurs photovoltaïques monophasés ainsi  
leurs contrôle"**

**II.1. Introduction**

Les onduleurs photovoltaïques monophasés sont des dispositifs utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour convertir le courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) utilisable.

Ces onduleurs sont adaptés pour les installations résidentielles ou de petite taille où une seule phase électrique est utilisée.

Ils jouent un rôle crucial en assurant que l'électricité générée par les panneaux solaires peut être intégrée efficacement dans le réseau électrique domestique ou commercial. [21]

Dans ce chapitre on présente en premier temps une brève description des onduleurs monophasés, suite description des commandes conventionnels et avancées des onduleurs comme linéaire et non linéaire. Enfin, on s'intéresse par la commande dead-beat d'un onduleur monophasé qui est l'objectif de notre travail.

**II.2. Généralités sur les onduleurs photovoltaïques monophasés**

Les onduleurs photovoltaïques monophasés sont des composants essentiels des systèmes photovoltaïques. Voici quelques généralités à leur sujet :

**II.2.1. Description**

Un onduleur est un dispositif électronique qui convertit une entrée continue en une sortie alternative de manière statique. La configuration du circuit de puissance d'un onduleur se compose de dispositifs de puissance à semi-conducteurs qui fonctionnent comme des commutateurs statiques.

L'onduleur dispose également d'un circuit de commande de commutation qui fournit les impulsions nécessaires pour allumer et éteindre chaque élément de commutation statique avec la synchronisation et la séquence correctes.

Ces commutateurs sont actionnés de manière répétitive de telle sorte que la source continue aux bornes d'entrée de l'onduleur apparaisse comme alternative à ses bornes de sortie.

La tension /courant à l'entrée d'un onduleur peut être sortie d'une batterie, issue des panneaux solaires, piles a combustible out tension continue redressé.[22]

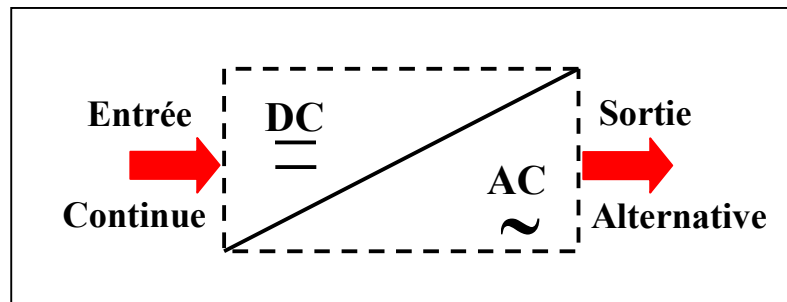


Figure II.1. Conversion continue-alternative.

La forme d'onde de sortie d'un onduleur idéal doit être sinusoïdale mais en pratique elle peut prendre la forme:

- ✚ Onde carrée,
- ✚ Onde carrée modifiée,
- ✚ Sinusoïdale modifiée.

### II.2.1. Applications des onduleurs

Les onduleurs ont une variété d'applications dans de nombreux domaines, principalement liés à la conversion de courant continu en courant alternatif. Voici quelques-unes des applications les plus courantes des onduleurs :

- ✚ **Systèmes photovoltaïques:** Les onduleurs sont essentiels dans les systèmes photovoltaïques pour convertir le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif utilisable pour alimenter les appareils électriques dans les foyers, les entreprises et les infrastructures.
- ✚ **Alimentations de secours:** Les onduleurs sont utilisés dans les systèmes d'alimentation de secours pour fournir de l'électricité en cas de panne de courant. Ces onduleurs stockent généralement de l'énergie dans des batteries et la libèrent sous forme de courant alternatif en cas de besoin.
- ✚ **Applications automobiles:** Dans les véhicules électriques et hybrides, les onduleurs sont utilisés pour convertir l'électricité de la batterie en courant alternatif pour alimenter le moteur électrique et d'autres composants électroniques du véhicule.
- ✚ **Applications industrielles:** Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles pour alimenter des moteurs électriques, des pompes, des compresseurs et d'autres équipements nécessitant un courant alternatif.

✚ **Applications informatiques:** Les onduleurs sont utilisés dans les systèmes informatiques pour fournir une alimentation de secours afin de protéger les équipements sensibles contre les interruptions de courant et les fluctuations de tension.

✚ **Électroménagers:** Certains appareils électroménagers, tels que les réfrigérateurs, les climatiseurs et les systèmes de chauffage, utilisent des onduleurs pour convertir le courant continu en courant alternatif nécessaire à leur fonctionnement.

✚ **Énergies renouvelables:** Outre les systèmes photovoltaïques, les onduleurs sont utilisés dans d'autres technologies d'énergie renouvelable telles que les éoliennes et les systèmes de stockage d'énergie, où ils convertissent l'électricité produite en courant alternatif pour une utilisation sur le réseau.

Donc, les onduleurs sont des composants essentiels dans une variété d'applications où la conversion entre courant continu et courant alternatif est nécessaire.

Leur utilisation s'étend des systèmes photovoltaïques aux applications automobiles, industrielles, informatiques, domestiques et de stockage d'énergie, contribuant ainsi à la fourniture d'électricité fiable et efficace dans de nombreux contextes différents.[6]

### **II.2.2. Classification des onduleurs**

Les onduleurs peuvent être classés en deux groupes selon le domaine d'application de l'onduleur;

✚ Onduleurs monophasés,

✚ Onduleurs triphasés.

Le niveau du signal de sortie:

✚ Deux niveaux,

✚ Trois niveaux.

Les onduleurs statiques peuvent être classés dans l'une des catégories suivantes, sur la base du type de sortie alternatif:

✚ Onduleurs de source de tension,

✚ Onduleurs source de courant,

✚ Onduleurs de commande de courant,

✚ Onduleurs à commande de phase.

Le mode de commutation:

- ✚ Autonome «isolé»,
- ✚ Non autonome «connecté au réseau».

### **II.3. Onduleur autonome**

Un onduleur autonome, également connu sous le nom d'onduleur hors réseau ou onduleur autonome, est un type spécifique d'onduleur conçu pour fonctionner indépendamment du réseau électrique principal. Contrairement aux onduleurs connectés au réseau, qui nécessitent une alimentation constante pour fonctionner, les onduleurs autonomes sont capables de générer et de fournir de l'électricité même en l'absence d'une source externe.

Voici quelques points clés à retenir sur les onduleurs autonomes :

- ✚ **Fonctionnement hors réseau:** Les onduleurs autonomes sont conçus pour fonctionner de manière autonome, c'est-à-dire sans être connectés au réseau électrique principal. Ils sont souvent utilisés dans des applications où l'accès au réseau est limité ou inexistant, comme les zones rurales éloignées, les sites isolés ou les installations mobiles telles que les véhicules de camping ou les bateaux.
- ✚ **Stockage d'énergie:** Pour fonctionner de manière autonome, les onduleurs autonomes sont généralement associés à des systèmes de stockage d'énergie tels que des batteries. Ces batteries sont chargées par des sources d'énergie renouvelable telles que des panneaux solaires, des éoliennes ou des générateurs diesel, et l'énergie stockée est ensuite utilisée par l'onduleur pour alimenter les charges électriques.
- ✚ **Applications diverses:** Les onduleurs autonomes sont utilisés dans une variété d'applications, y compris les installations résidentielles hors réseau, les systèmes de secours pour les urgences, les communications mobiles, les stations météorologiques et les équipements de surveillance à distance.
- ✚ **Gestion de l'énergie:** Les onduleurs autonomes nécessitent souvent une gestion intelligente de l'énergie pour optimiser l'utilisation des ressources disponibles, maximiser l'autonomie du système et garantir un fonctionnement fiable. Cela peut inclure des algorithmes de contrôle avancés pour gérer la charge et la décharge des batteries, ainsi que la commutation entre les différentes sources d'énergie.

✚ **Fiabilité et durabilité:** Étant donné qu'ils opèrent de manière autonome, les onduleurs hors réseau doivent être robustes, fiables et capables de fonctionner dans des conditions environnementales variées. La fiabilité et la durabilité sont donc des considérations essentielles lors de la sélection et de l'installation d'un onduleur autonome.

Les onduleurs autonomes sont des composants essentiels des systèmes d'alimentation hors réseau, fournissant une source d'électricité fiable et flexible dans des environnements où l'accès au réseau électrique principal est limité ou indisponible. Ils sont utilisés dans une variété d'applications et nécessitent une gestion intelligente de l'énergie pour optimiser leur performance et leur autonomie.

On appelle onduleur un convertisseur statique qui permet des échanges d'énergie entre une entrée continue et une sortie alternative. Onduleur est autonome quand il impose sa propre fréquence à la charge. [6]

#### II.4. Types d'onduleurs autonomes

Il existe différents types d'onduleurs autonomes, chacun adapté à des applications spécifiques et offrant des fonctionnalités différentes. Voici les principaux types d'onduleurs autonomes:

##### II.4.1. Onduleur monophasée en demi-pont

L'onduleur en demi-pont a deux éléments de commutation statiques contrôlés, qui sont étiquetés  $S_1$  et  $S_2$  et dont chacun a une diode antiparallèle. Comme le montre la figure II.2, l'entrée DC du demi-pont doit être une alimentation divisée. Cela signifie qu'à côté de la borne positive et de la borne négative, la borne de potentiel moyen, étiquetée 0, doit être disponible. Si la source de tension à potentiel moyen n'est pas disponible, deux condensateurs, étiquetés  $C_1$  et  $C_2$ , peuvent être connectés en série à travers la source courant continu DC, comme illustré à la figure II.2. La charge peut être résistive, inductive, capacitive, etc.

Pour faire fonctionner l'onduleur afin de fournir une sortie alternative de fréquence, les interrupteurs  $S_1$  et  $S_2$  sont allumés et éteints alternativement, chaque interrupteur étant maintenu allumé pendant une demi-période du courant alternatif, tandis que l'autre est maintenu éteint. Il est important de s'assurer que les deux interrupteurs ne sont jamais allumés simultanément à aucun moment. Si cela se produit, cela équivaut à un court-circuit à travers l'entrée DC, entraînant un courant excessif et des dommages possibles aux éléments de commutation. Pour

cette raison, il est d'usage dans les onduleurs pratiques de prévoir un "temps mort" après la désactivation d'un interrupteur et l'activation de l'autre. Si la charge est purement résistive, le courant et la tension seront en phase, mais l'amplitude du courant dépend de la valeur de la résistance.

Supposons maintenant une charge inductive pure de sorte que le fonctionnement de l'onduleur sera impossible car il n'y a pas de chemins alternatifs pour le courant. Lorsque  $S_1$  est désactivé, le courant ne peut pas tomber à zéro instantanément, à cause de l'inductance  $L$ , qui a stocké de l'énergie. La solution à ce problème consiste donc à utiliser des diodes en parallèle avec des dispositifs de commutation. Au cours de la première demi-période lorsque  $S_1$  est allumé, si le courant est négatif, la diode  $D_2$  devient polarisée en direct et s'allume, et pendant la seconde demi-période lorsque  $S_2$  est allumé, si le courant est positif, la diode 1 devient polarisée en direct et s'allume et la borne a se connectera instantanément au terminal 0.[21]

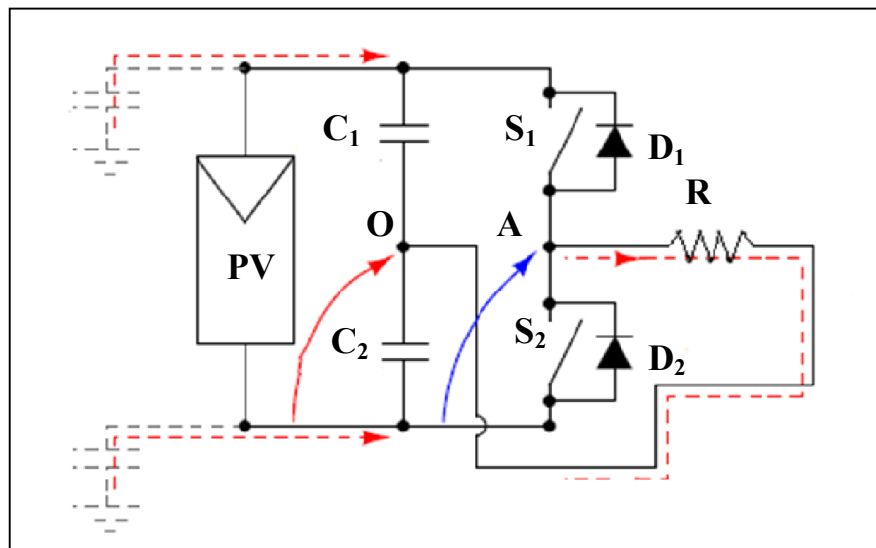


Figure II.2. Onduleur demi-pont monophasé.

#### II.4.2. Onduleur à pont complet monophasé

L'onduleur à pont complet comporte quatre dispositifs de commutation constitués chacun d'un interrupteur commandé et de sa diode antiparallèle. Les commutateurs  $S_1$  et  $S_2$  sont activés et maintenus activés pendant une demi-période du courant alternatif. Ensuite,  $S_1$  et  $S_2$  sont bloqués et les interrupteurs  $S_1'$  et  $S_2'$  sont maintenus fermés pendant la durée de la demi-période de tension négative.

Cet onduleur est préféré à une puissance nominale plus élevée. Le principal avantage de ce type d'onduleur est qu'avec la même entrée DC, la sortie maximale de l'onduleur en pont complet est le double de celle de l'onduleur en demi-pont. Cela implique que pour une même puissance, le courant de sortie et le courant de commutation sont la moitié de ceux de l'onduleur demi-pont. La figure II.3 montre un onduleur à pont complet monophasé, où il y a également quatre diodes en parallèle avec le dispositif de commutation.[21]

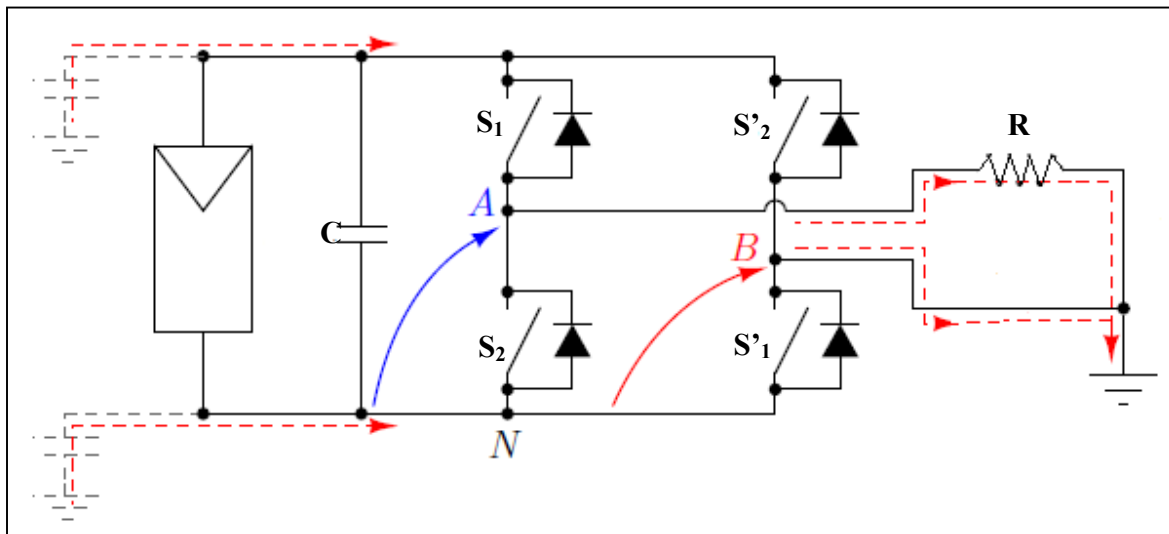


Figure II.3. Onduleur à pont complet monophasé.

#### II.4.3. Onduleur non autonome

On dit qu'un onduleur n'est pas autonome si l'énergie nécessaire à la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif, qui est par conséquent un réseau actif. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif

#### II.5. Le filtre

Effectivement, l'utilisation d'un filtre de sortie passe-bas est souvent nécessaire dans les onduleurs pour filtrer les harmoniques et autres interférences électromagnétiques, afin d'obtenir une sortie de fréquence fondamentale propre et stable. Voici une brève description des principaux types de filtres utilisés dans les onduleurs :

##### II.5.1. Filtre L

Le filtre L est le type le plus simple de filtre passe-bas et se compose simplement d'une inductance (L) en série avec la charge illustré à la figure II.4. Ce filtre est efficace pour atténuer

les harmoniques élevés mais peut présenter une résonance à certaines fréquences, ce qui peut nécessiter des ajustements supplémentaires.

Une grande inductance entraîne une taille de filtre plus grande et un coût plus élevé. La chute de tension élevée sur la grande inductance aggrave la dynamique du système. [23]

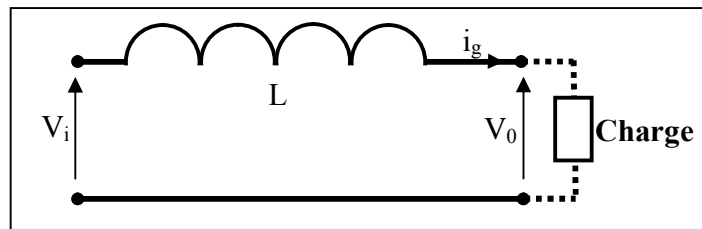


Figure II.4. Filtre type L

### II.5.2. Filtre LC

Le filtre LC est un filtre passe-bas plus avancé qui utilise à la fois une inductance (L) et un condensateur (C).

Il est plus efficace pour atténuer les harmoniques que le filtre L seul et peut être conçu pour résonner à une fréquence spécifique afin d'optimiser sa performance.

Il est illustré à la figure II.5, est un filtre de second ordre. Le processus de conception du filtre LC est assez simple. Le compromis de la conception est qu'une capacité plus élevée peut aider à réduire le coût de l'inductance.

Cependant, le système peut rencontrer un courant d'appel et un flux de courant réactif élevé dans le condensateur à la fréquence fondamentale [23]. Si un onduleur est relié au réseau via un filtre LC, la fréquence de résonance du filtre devient dépendante de l'impédance du réseau. [21]

Cependant, le filtre LC convient parfaitement aux onduleurs autonomes en raison de sa taille compacte et de ses bonnes performances d'atténuation.

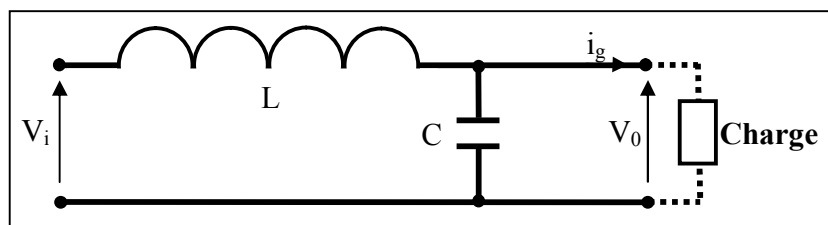


Figure II.5. Filtre type LC.

### II.5.3. Filtre LCL

Le filtre LCL est un filtre passe-bas encore plus sophistiqué qui ajoute un autre élément : une résistance (R) en parallèle avec le condensateur (C). Ce type de filtre est conçu pour réduire encore davantage les harmoniques et peut offrir une meilleure suppression des résonances indésirables.

Le filtre LCL de troisième ordre, illustré à la Figure II.6, est largement utilisé avec les onduleurs connectés au réseau en raison de sa forte atténuation au-delà de la fréquence de résonance. Comparé au filtre LC, le filtre LCL offre une meilleure capacité de découplage entre le filtre et l'impédance du réseau [23]. De nombreuses recherches sont menées sur ce sujet.

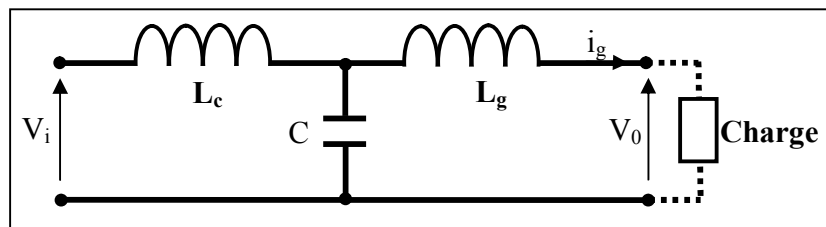


Figure II.6. Schéma du filtre LCL.

Finalement, pour tous les onduleurs, un filtre de sortie passe-bas est nécessaire pour obtenir la sortie de fréquence fondamentale. Généralement, il existe différents types de filtres utilisés pour les onduleurs. Chaque type de filtre a ses propres caractéristiques et avantages, et le choix du filtre approprié dépendra des exigences spécifiques de l'application, telles que le niveau d'atténuation des harmoniques requis, la taille et le coût du système, ainsi que les contraintes de conception et de performance. En général, les filtres plus complexes comme les filtres LC et LCL offrent une meilleure suppression des harmoniques mais peuvent être plus coûteux à mettre en œuvre et nécessiter une conception et une calibration plus précises.

### II.6. Modélisation d'un onduleur monophasé

Les onduleurs monophasés peuvent être classifiés en onduleurs en demi-pont ou en onduleurs en pont complet (pont en H). De plus, suivant la nature de la source d'entrée (source de tension ou source de courant), on distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant. Dans notre thèse, nous avons opté pour un onduleur monophasé autonome et connecté au réseau en pont complet.

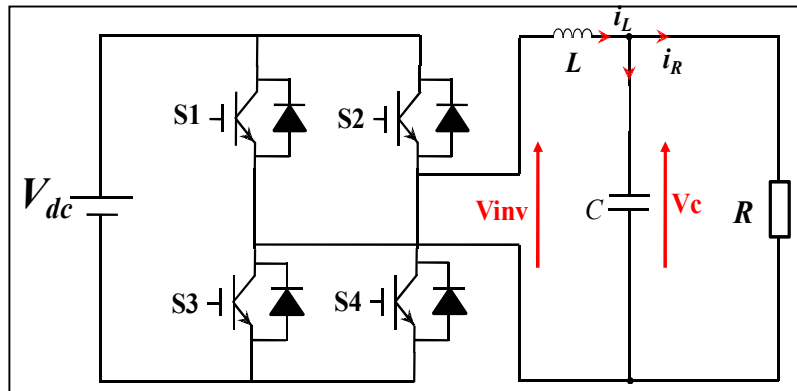


Figure II.7. Représentation du circuit d'un onduleur monophasé à pont complet.

Le schéma d'un onduleur de tension monophasé en pont complet, connecté à une charge à travers un filtre LC, est illustré par la figure II.7.

L'entrée de l'onduleur est connectée à une source de tension continue  $V_{dc}$  (bus continu), tandis que sa sortie est connectée à une charge monophasée. Les symboles  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  et  $S_4$  désignent les signaux de commande (états de commutations) de chaque interrupteur. Ils prennent une valeur de 1 pour un état fermé et une valeur de 0 pour un état ouvert.

On suppose que les couples d'interrupteurs ( $S_1, S_4$ ) et ( $S_2, S_3$ ) sont complémentaires. Le filtre de sortie LC, constitué d'une inductance  $L$  et d'un condensateur  $C$ , est utilisé pour avoir un courant et une tension de sortie sinusoïdaux.

Suivant le schéma donné par la figure II.7 et en utilisant la loi des nœuds et des mailles, nous obtenons deux cas possibles:

✚ Dans un cas où l'interrupteur  $S_1$  et  $S_4$  sont ouverts,  $S_2$  et  $S_3$  sont fermés (cas 1) :

On a :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}V_{dc} - \frac{1}{L}V_C \tag{II.1}$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}V_C \tag{II.2}$$

Avec  $V_{dc}$  source de tension continue produite par une production d'énergie renouvelable.

Ainsi, nous pouvons en déduire le modèle d'état de forme:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ V_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/L \\ 0 \end{pmatrix} V_{dc} \tag{II.3}$$

Dans le cas où l'interrupteur  $S_1$  et  $S_4$  sont fermés,  $S_2$  et  $S_3$  sont ouverts (cas 2)

On a:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}V_{dc} - \frac{1}{L}V_C \tag{II.4}$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}V_C \tag{II.5}$$

Ainsi, nous pouvons en déduire le modèle d'état de forme:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ V_C \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1/L \\ 0 \end{pmatrix} V_{dc} \tag{II.6}$$

On définit les variables d'état comme étant:

- ✚ le courant dans l'inductance de charge que l'on dénote  $i_L$ ,
- ✚ La tension aux bornes du condensateur que l'on dénote  $V_C$ .

Le modèle dynamique de la figure II.7 peut être représenté par l'équation suivante et le modèle d'espace d'état correspondant est illustré à la figure II.8. À partir de [21], la représentation de l'espace d'état de l'onduleur monophasé avec filtre est donnée : [1,21,24]

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \tag{II.8}$$

Avec comme matrice:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \tag{II.9}$$

$$B = \begin{pmatrix} 1/L \\ 0 \end{pmatrix} \tag{II.10}$$

$$U(t) = \beta V_{dc} \tag{II.11}$$

Où  $\beta$  est le signal de commande compris dans l'intervalle [-1 1]

En utilisant les équations différentielles ci-dessus, le modèle équivalent de l'onduleur considéré est schématisé par la figure II.8.

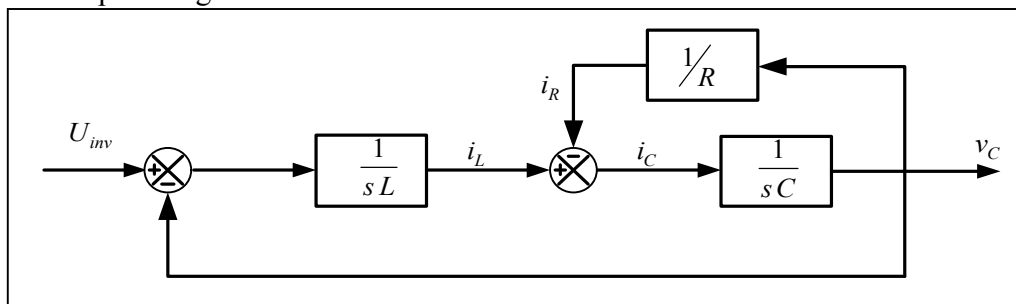


Figure II.8. Modèle d'espace d'état d'un onduleur monophasé.

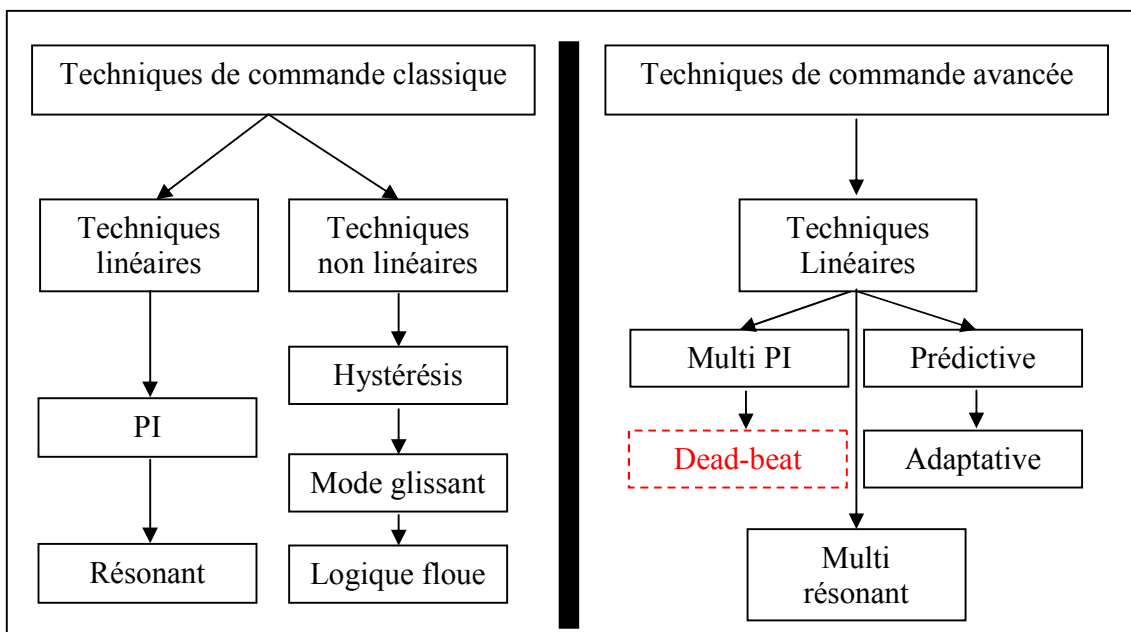
## II.7. Techniques de commandes d'un convertisseur DC/AC

La commande d'un convertisseur DC/AC est une tâche complexe qui englobe la régulation simultanée de la tension et de la fréquence de sortie de l'onduleur, en fonction à la fois de la tension et de la fréquence d'entrée, ainsi que des exigences de la charge connectée.

Il existe plusieurs techniques de commande pour les convertisseurs DC/AC, telles que la technique de commande classique, la technique de commande avancées, Les techniques de commande utilisées doivent être également révisées pour vérifier que les performances exigées dans les différentes applications sont atteintes.

A présent, les contrôles avancés apparaissent comme une évolution des contrôles classiques (voir figure II.9 et figure II.10) car ils sont basés sur les mêmes structures étendues ou renforcées pour la correction des signaux. Ainsi, toutes les structures de contrôle avancées analysées dans cette étude sont numériques et travaillent à fréquence fixe.[1]

Ces contrôles doivent atteindre des performances très exigeantes du point de vue de la dynamique et de la bande passante dans sous contrainte de fréquence de commutation modérée et où le retard numérique devient critique.



**Figure II.9.** Classification des techniques de contrôle classiques.

**Figure II.10.** Classification des techniques de contrôle avancées.

### II.7.1. La technique de commande classique

Les méthodes traditionnelles (classiques) de contrôle pour les onduleurs monophasés reposent généralement sur deux approches principales, la modulation de largeur d'impulsion (MLI) et la régulation de la tension. La régulation de tension représente l'approche la plus élémentaire, consistant à ajuster la tension de sortie de l'onduleur à l'aide d'une boucle de rétroaction de commande de tension. Cependant, cette méthode ne permet pas un contrôle précis du courant de sortie et peut conduire à des distorsions harmoniques significatives.

#### II.7.1.1. Commande linéaire d'un onduleur monophasé

La commande linéaire d'un onduleur monophasé est une technique de commande en boucle fermée qui permet de réguler la tension de sortie de l'onduleur avec une grande précision. Cette technique est utilisée dans les applications où une tension de sortie précise et stable est requise, telles que les applications d'électronique de puissance et les systèmes de régulation de la tension.

Le principe de la commande linéaire consiste à réguler la tension de sortie de l'onduleur en fonction de la tension d'entrée et de la charge connectée, en utilisant un régulateur de tension linéaire. Le régulateur de tension linéaire est un dispositif électronique qui régule la tension de sortie de l'onduleur en ajustant la tension de référence.[25]

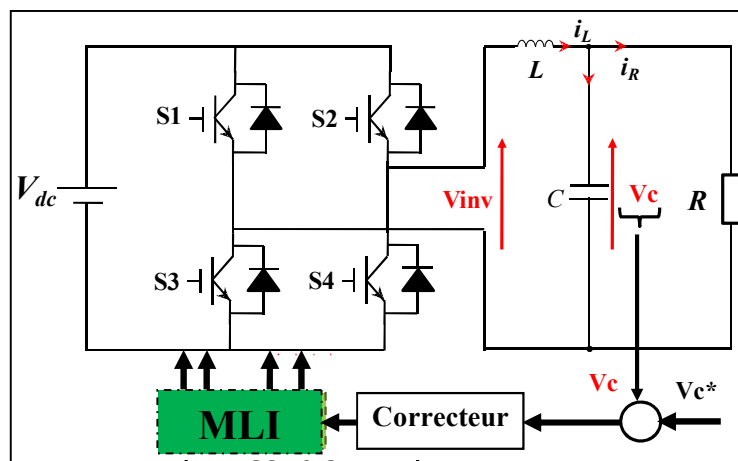


Figure II.11. Commande linéaire d'un onduleur monophasé

Le régulateur de tension linéaire est généralement contrôlé par un microcontrôleur qui analyse la tension et le courant de sortie de l'onduleur en temps réel, et ajuste la tension de référence pour maintenir une tension de sortie stable et précise.

La commande linéaire présente plusieurs avantages, notamment une précision élevée, une faible distorsion harmonique et une bonne stabilité en régulation de tension. Cependant, elle présente également quelques inconvénients, tels qu'une faible efficacité énergétique et une complexité de mise en œuvre plus élevée que les techniques de commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

### ✚ La commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Consiste à produire un signal MLI afin de réguler la largeur des impulsions de la tension de sortie de l'onduleur. Ce signal est dérivé d'un signal de référence qui détermine la tension de sortie souhaitée, offrant ainsi une régulation précise et stable de la tension de sortie. La modulation de largeur d'impulsion permet de déplacer les harmoniques de la tension de sortie vers des fréquences plus élevées, ce qui facilite le filtrage. En augmentant le nombre d'impulsions, chaque alternance de tension de sortie est formée, permettant de modifier la valeur fondamentale de la tension de sortie. Elle offre également la possibilité de moduler la forme de la tension pour obtenir une forme d'onde s'approchant de la sinusoïde. La génération des signaux de commande de la modulation est généralement effectuée en temps réel.

Pour détecter en temps réel les moments de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on utilise soit une électronique de commande analogique, numérique, ou une combinaison des deux simultanément. La modulation de largeur d'impulsion nous permet d'effectuer cette détection. Pour garantir une détection en temps réel des instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, plusieurs techniques de modulation de largeur d'impulsion peuvent être envisagées. Parmi celles-ci, on peut citer la modulation sinus-triangle, la modulation en pleine onde, et la modulation vectorielle (SVM : Modulation de vecteur d'espace).

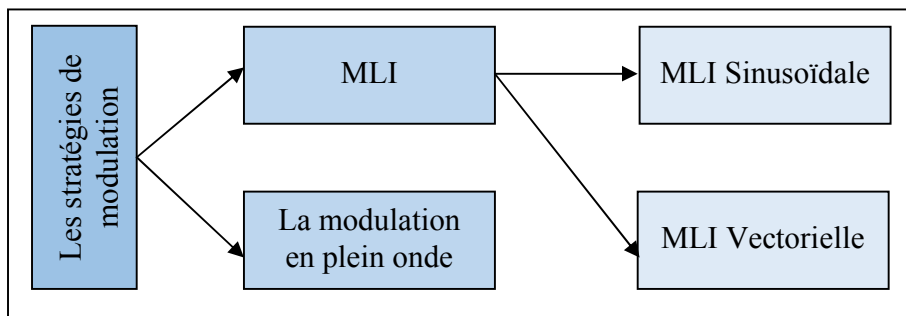


Figure II.12. Les différentes techniques de commandes.

Ce sujet a été largement abordé dans plusieurs études de recherche [26-27]. On distingue deux techniques : la MLI inter-sective et la MLI vectorielle. On notera à ces sujets, qu'une très intéressante monographie a été faite dans la référence [21].

### ✚ Fonctionnement d'une modulation à largeur d'impulsion (MLI)

La modulation par largeur d'impulsion (MLI) est une méthode ou technique de modulation de tension largement employée dans les convertisseurs DC/AC, notamment les onduleurs.

La MLI opère en ajustant la durée des impulsions de tension à une fréquence prédéfinie, également connue sous le nom de fréquence de commutation.

Voici le fonctionnement général d'une MLI :

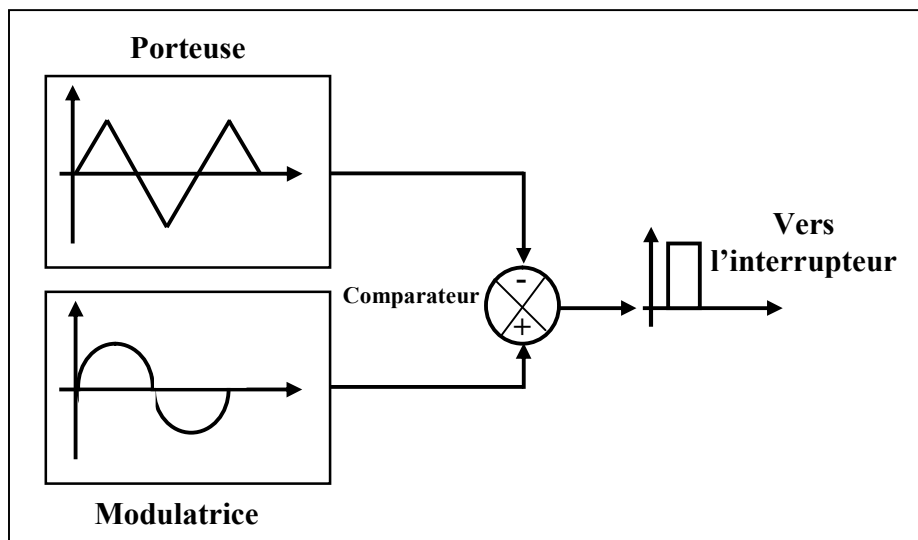


Figure II.13. Schéma synoptique de la MLI.

### ✚ Caractéristiques de la modulation

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

#### ❖ Le coefficient de réglage

Qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse.

Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion:

$$M_v = \frac{V_m}{V_p} \quad (\text{II.12})$$

❖ **L'indice de modulation**

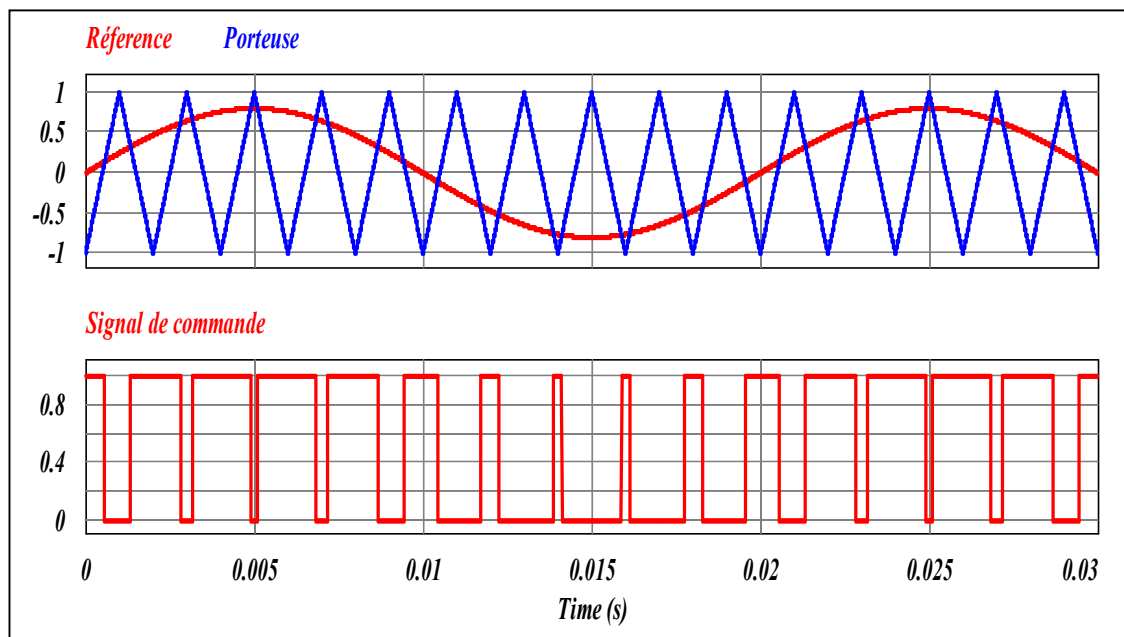
Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante :

$$M_f = \frac{f_m}{f_p} \quad (\text{II.13})$$

❖ **Comparaison**

Le signal de référence est confronté à une onde triangulaire de fréquence fixe, agissant en tant que signal de porteuse ou onde de modulation. Cette comparaison est effectuée à chaque cycle du signal de porteuse, produisant ainsi un signal de commande MLI.

Selon le résultat de la comparaison, le signal de commande MLI est généré en ajustant la largeur des impulsions de tension de sortie de l'onduleur. Si le signal de référence dépasse l'onde de modulation, la largeur de l'impulsion est accrue ; en revanche, si le signal de référence est inférieur à l'onde de modulation, la largeur de l'impulsion est diminuée.



**Figure II.14.** Exemple de la configuration MLI unipolaire avec les états des interrupteurs 1 et 4, simulé avec PSIM.

✚ **Le régulateur proportionnel intégral (PI)**

La régulation PI représente l'une des techniques de commande classiques les plus répandues dans le domaine des onduleurs monophasés.

Cette approche implique l'ajustement de la commande de l'onduleur en fonction de la tension de sortie mesurée et de la tension de référence grâce à un contrôleur proportionnel-intégral (PI). Le contrôleur PI permet de réguler la commande de l'onduleur de manière à minimiser la différence entre la tension de sortie mesurée et la tension de référence, tout en atténuant les oscillations et les fluctuations de la commande. Le réglage des paramètres du contrôleur PI revêt une importance capitale pour garantir une réponse rapide et stable. De nombreuses recherches ont été menées pour optimiser les performances de la régulation PI, notamment en ce qui concerne la régulation de la tension et du courant de sortie, la suppression des perturbations, la compensation des effets de la charge, et d'autres aspects. Ces résultats sont disponibles dans des publications scientifiques et des ouvrages spécialisés portant sur les onduleurs et leur commande.[28]

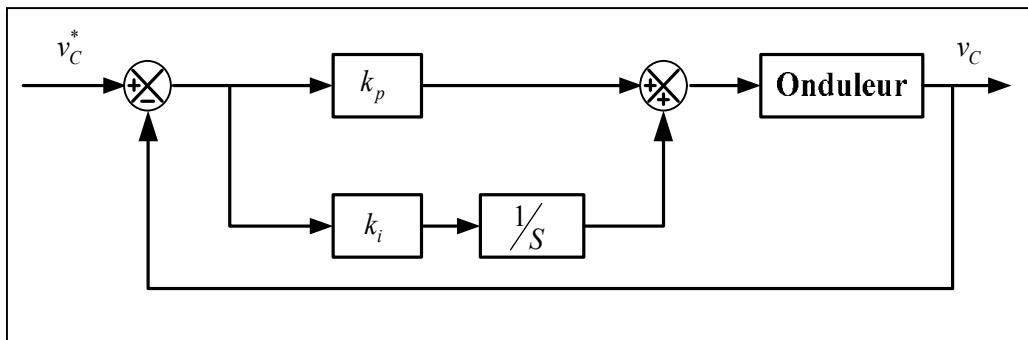


Figure II.15. Structure d'un régulateur PI.

#### ❖ **Avantage**

- La commande PI est une méthode de commande simple et facile à mettre en œuvre, ce qui la rend économique,
- La commande PI permet une régulation précise de la tension de sortie de l'onduleur, ce qui peut être important pour certaines applications,
- La commande PI est robuste et peut fonctionner efficacement dans des conditions de charge variable et des perturbations externes.

#### ❖ **Inconvénients**

- La commande PI ne prend pas en compte les changements dynamiques rapides de la charge, ce qui peut entraîner des fluctuations de la tension de sortie,
- La commande PI est moins efficace que les méthodes de commande avancées, qui peuvent fournir une régulation plus précise et plus rapide de la tension de sortie,

- La commande PI ne peut pas compenser les perturbations de la tension d'entrée, ce qui peut affecter la qualité de la tension de sortie.[6]

### II.7.1.2. Commande non linéaire d'un onduleur monophasé

Les commandes non linéaires peuvent offrir des performances supérieures à celles des commandes linéaires, mais elles peuvent être plus complexes à mettre en œuvre et à régler. De plus, les commandes non linéaires peuvent nécessiter une puissance de calcul supplémentaire pour exécuter les algorithmes de commande.

#### ✚ Commande par hystérésis

La commande par hystérésis est une commande conventionnelle en tout ou rien faisant partie des commandes non linéaires.

Elle consiste à maintenir la tension dans une bande qui enveloppe la référence donnée. En effet, l'ordre de commutation est fourni par un comparateur appelé bande d'hystérésis qui génère la différence entre la tension de référence et celui produit par l'onduleur, cet ordre sera délivré quand l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure.

Cette stratégie assure une commande satisfaisant de la tension sans exiger une connaissance poussée du modèle ou des paramètres du système à contrôler. Le Figure II.16 explique le principe de la commande par hystérésis pour l'onduleur monophasé.[21]

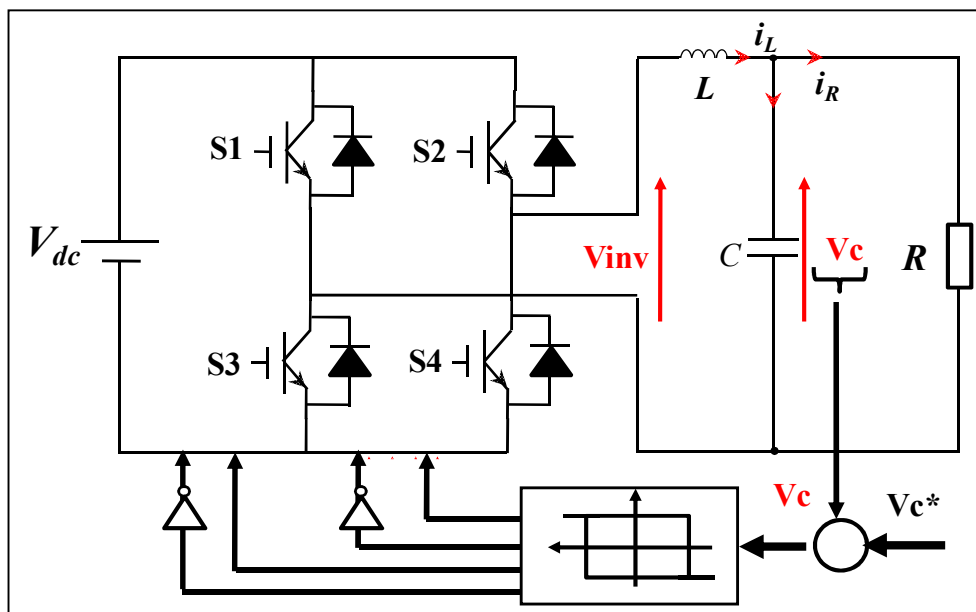
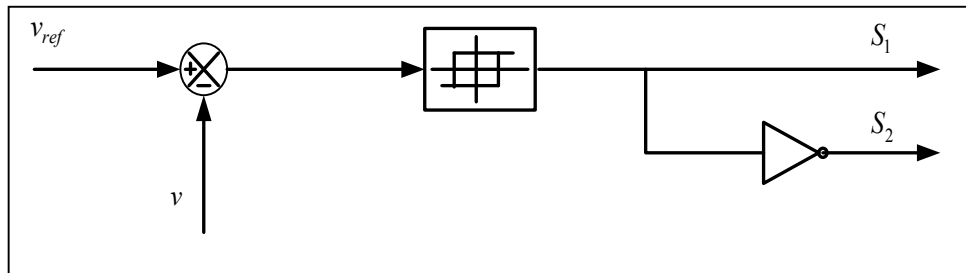


Figure II.16. Représente le principe de génération des ordres de commande.

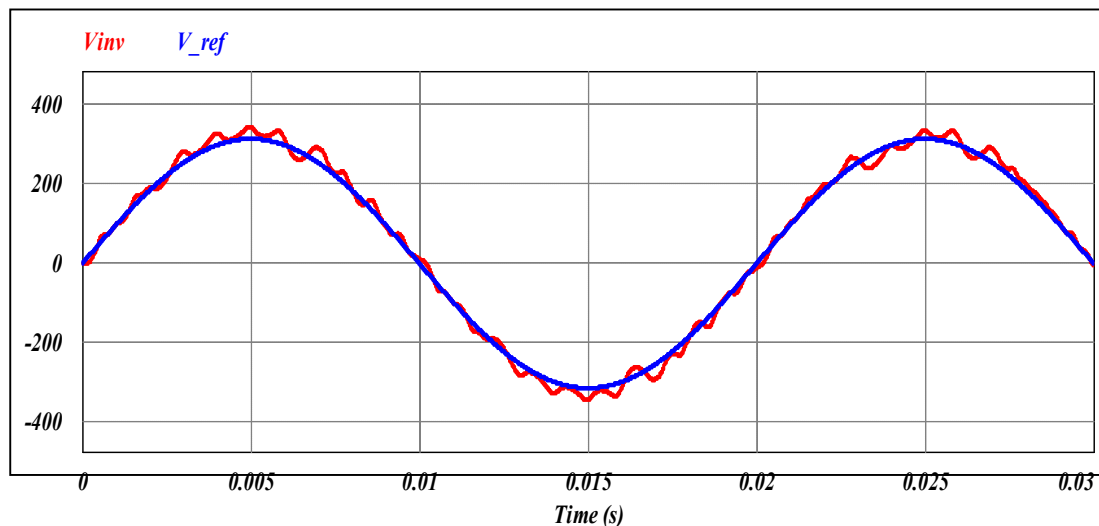
Néanmoins, la configuration de cette commande se réalise en déterminant la largeur de la bande, généralement fixée à environ 5% de la tension nominale.

Au cours d'une période de découpage, les tensions instantanées générées par l'onduleur induisent des ondulations de tension triangulaire, qui sont exploitées pour l'auto-commutation de l'onduleur au moyen d'une chaîne à hystérésis, remplaçant ainsi le modulateur.



**Figure II.17.** Principe de génération des signaux de commande.

La figure II.17 représente les états de commutation des interrupteurs de puissance selon le principe de l'hystérésis. Lorsque la tension produite par l'onduleur est supérieure ou égale à la limite supérieure d'hystérésis, la sortie du comparateur est nulle, ce qui signifie que ( $S_1=0$ ,  $S_2=1$ ). De même, lorsque la tension produite par l'onduleur est inférieure ou égale à la limite inférieure d'hystérésis, la sortie du comparateur est égale à 1, donc ( $S_1=1$ ,  $S_2=0$ ). Ainsi, le courant produit par l'onduleur est équilibré à l'intérieur de la bande d'hystérésis en fonction de la tension de référence.



**Figure II.18.** Résultat de simulation par PSIM de commande.

Cette méthode de commande présentée dans la figure II.18 est largement considérée comme l'une des plus appropriées pour diverses applications basées sur des onduleurs contrôlés en tension, notamment les entraînements électriques et les filtres actifs. Elle est donc largement connue et très couramment utilisée en raison des nombreux avantages qu'elle offre en termes de robustesse et de facilité de mise en œuvre. De plus, elle offre une réponse rapide en régime dynamique ainsi qu'une stabilité et une précision satisfaisantes. La largeur de la bande d'hystérésis constitue le seul paramètre de régulation dans cette méthode, déterminant ainsi l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation, qui demeure inconnue et variable.

Malgré ses avantages, cette technique est mal perçue par les industriels en raison de l'irrégularité et de l'impossibilité de contrôler la fréquence de changement d'état des interrupteurs, ce qui entraîne la génération d'un spectre d'harmoniques étendu et très perturbé, difficilement filtrable.

### **II.7.2. La technique de commande avancée**

La commande avancée d'un onduleur autonome implique l'utilisation de techniques plus sophistiquées pour assurer un contrôle précis et efficace de l'onduleur, surtout dans des conditions variables et imprévisibles. Voici quelques aspects clés de cette technique de commande:

#### **✚ Contrôle prédictif**

Le contrôle prédictif est une technique avancée qui anticipe les variations futures de la charge et ajuste la commande de l'onduleur en conséquence. Cela permet d'anticiper et de compenser les variations de charge avant qu'elles ne se produisent, assurant ainsi une régulation plus rapide et plus précise de la tension et de la fréquence de sortie.

#### **✚ Contrôle adaptatif**

Le contrôle adaptatif ajuste automatiquement les paramètres de commande de l'onduleur en fonction des changements dans les conditions de fonctionnement, permettant ainsi une adaptation continue aux variations de charge et de réseau.

#### **✚ Contrôle dead-beat d'un onduleur monophasé**

Le contrôle dead-beat d'un onduleur monophasé est une méthode avancée qui vise à obtenir une réponse dynamique optimale en minimisant le temps de réponse et en éliminant complètement l'erreur de suivi. Cette technique de commande offre une régulation précise de la

tension de sortie de l'onduleur et garantit une performance optimale du système dans des conditions variables et imprévisibles.

Le contrôle dead-beat est une méthode de commande employée dans les onduleurs, offrant un contrôle extrêmement précis et rapide de la tension et du courant de sortie. Cette approche assure une régulation particulièrement précise de ces paramètres, même face à des variations significatives de la charge.

La stratégie de contrôle repose sur la prédiction, au début de chaque période d'échantillonnage, du signal de commande à appliquer en fonction de la consigne, de la sortie actuelle et des paramètres du système physique, dans le but de minimiser l'erreur.

Lorsque le signal de commande est sélectionné pour annuler l'erreur de courant à la fin de la période d'échantillonnage suivante, cette approche est qualifiée de contrôle à réponse pile, communément désignée sous le terme Dead-beat Control en anglais. [6]

Il ne s'agit pas strictement d'un type de correcteur, mais plutôt d'une méthode de réglage basée sur un type de réponse souhaitée.

Avantage principal du contrôle Dead-beat réside dans sa rapidité, puisque la sortie atteint la valeur de référence après seulement deux périodes d'échantillonnage, ce qui en fait le contrôle numérique le plus rapide selon [21].

Cependant, cette rapidité peut entraîner un retard de réponse induisant une erreur inacceptable en haute fréquence, d'où la nécessité d'utiliser des techniques de compensation de ce retard.

En outre, ce type de contrôle présente un inconvénient notable : en se basant sur le modèle du système, il se montre très sensible aux variations paramétriques, aux incertitudes du système et au bruit, ce qui peut induire des erreurs de précision [29].

Bien que les contrôles Dead-beat soient étudiés depuis longtemps, ce problème demeure toujours actuel de nos jours.

Les techniques Dead-beat sont très utilisées pour des applications où l'on a besoin d'une grande dynamique, tant en repère fixe comme en repère tournant, comme c'est le cas pour le filtrage actif. [24]

**✚ Principe de Contrôle dead-beat d'un onduleur monophasé**

Le principe du contrôle dead-beat d'un onduleur monophasé repose sur l'idée d'atteindre rapidement et précisément la consigne de tension de sortie en éliminant complètement l'erreur de suivi en un temps minimal, c.a.d le contrôle dead-beat d'un onduleur monophasé vise à minimiser l'erreur de suivi en ajustant le signal de commande de manière à annuler complètement cette erreur en un temps minimal, assurant ainsi une régulation rapide et précise de la tension de sortie de l'onduleur.

Le principe fondamental de cette méthode de commande consiste à éliminer l'erreur de régulation en un seul cycle d'échantillonnage, d'où son appellation "dead-beat", signifiant "sans retard". Le contrôle dead-beat s'appuie sur la prédiction de l'état futur de la charge grâce à une approche de commande prédictive. Cette anticipation permet de prévoir la tension de sortie de l'onduleur pour le prochain cycle d'échantillonnage.

La stratégie de contrôle dead-beat intègre un régulateur à boucle fermée qui surveille en temps réel la tension de sortie de l'onduleur et la compare à la tension de référence. En fonction de l'écart entre la tension de sortie mesurée et la tension de référence, le contrôleur calcule la commande de tension adéquate pour corriger cet écart.

La tension de sortie de l'onduleur est réglée par l'activation de dispositifs de commutation, comme des transistors, qui sont contrôlés par le signal de commande de tension. Le contrôle dead-beat représente une méthode de commande extrêmement rapide et précise permettant de réguler la tension de sortie de l'onduleur en temps réel. Cette approche est largement utilisée dans divers domaines, notamment les systèmes de contrôle de moteurs, les onduleurs pour les énergies renouvelables et les systèmes d'alimentation de précision.[6]

**✚ Synthèse des lois de contrôle dead-beat d'un onduleur monophasé**

La stratégie de contrôle dead-beat d'un onduleur monophasé assure une régulation précise de la tension et du courant de sortie en temps réel. Ce système de contrôle repose sur une boucle fermée utilisant des algorithmes adaptés à une évaluation discrète du temps.

Cette approche implique le calcul des valeurs de tension et de courant de sortie de l'onduleur à partir des grandeurs d'entrée, en se basant sur des équations mathématiques simples.

Elle utilise un modèle mathématique décrivant l'onduleur et la charge, permettant de prédire le comportement de l'onduleur en temps réel.

La loi de contrôle dead-beat exploite ce modèle mathématique pour anticiper la réaction de l'onduleur face à une commande donnée. En utilisant cette anticipation, elle détermine la valeur de tension de sortie optimale à appliquer à l'onduleur, grâce à un algorithme de contrôle adapté à une évaluation discrète du temps. Cette approche permet une régulation rapide et précise de la tension de sortie, même face à des fluctuations importantes de la charge.[6]

Enfin, la commande avancée d'un onduleur autonome implique l'utilisation de techniques sophistiquées telles que la commande vectorielle, le contrôle prédictif, la commande par logique floue, le contrôle adaptatif et le contrôle en boucle fermée avec rétroaction optimisée. Ces techniques permettent d'assurer un contrôle précis et efficace de l'onduleur dans des conditions variables et imprévisibles, contribuant ainsi à une performance optimale du système.

## **II.8. Conclusion**

Les onduleurs photovoltaïques monophasés jouent un rôle crucial dans la conversion de l'énergie solaire en électricité utilisable. Le contrôle classique de ces onduleurs, notamment par modulation de largeur d'impulsion (MLI) et commande de tension, constitue une approche robuste largement utilisée pour assurer une régulation précise de la tension de sortie. Cependant, ces techniques peuvent présenter des limitations en termes de réponse dynamique et de sensibilité aux perturbations.

Pour relever ces défis, le contrôle avancé des onduleurs monophasés intègre des stratégies plus sophistiquées telles que la commande dead-beat, qui constitue l'objet principal de notre mémoire de master. Cette approche vise à améliorer la performance, la stabilité et la robustesse des systèmes en anticipant les variations de charge, en réduisant les temps de réponse et en atténuant les effets des perturbations.

**Chapter III**

**"Commande avancé (Dead-beat) D'un Onduleur  
Autonome"**

### III.1. Introduction

Le contrôle des onduleurs est crucial pour convertir efficacement le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) avec une qualité de tension optimale. Il joue un rôle vital dans diverses applications telles que la production d'énergie renouvelable, les systèmes d'alimentation sans coupure (UPS), et les réseaux de distribution d'énergie. Un contrôle précis permet de garantir une tension de sortie stable et sinusoïdale, minimisant ainsi les perturbations et améliorant la performance globale des systèmes électriques.[21]

L'objectif principal de la commande est de produire une tension de sortie quasi sinusoïdale aux bornes du condensateur du filtre LC. En temps discret, le contrôle dead-beat est particulièrement intéressant, car il peut minimiser les écarts entre les valeurs de référence et les valeurs mesurées. À mesure que le nombre d'échantillons tend vers l'infini, l'erreur se réduit à zéro, permettant à l'onduleur de bénéficier d'une réponse dynamique rapide.[24]

Ce chapitre est organisé de la manière suivante : la première partie présente un aperçu du contrôleur dead-beat ainsi que les formulations du contrôle dead-beat, tandis que la deuxième partie expose les résultats des simulations du contrôle dead-beat.

### III.2. Onduleur monophasé

Un onduleur monophasé est un dispositif électronique utilisé pour convertir le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) monophasé. Il est couramment utilisé dans les systèmes d'énergie renouvelable, les alimentations sans coupure (UPS) et les applications domestiques pour fournir une alimentation électrique stable et de haute qualité. Les onduleurs monophasés assurent une régulation précise de la tension de sortie, ce qui est crucial pour le bon fonctionnement des appareils électriques et pour minimiser les perturbations.

L'onduleur monophasé proposé, illustré à la figure III.1, est composé d'un onduleur à pont en H connecté à une charge via un filtre LC.

Les transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) sont sélectionnés comme éléments de commutation pour réaliser le transfert d'énergie et la conversion de puissance. La tension produite par le convertisseur étant hachée, il est nécessaire d'ajouter un filtre LC à la sortie de l'onduleur pour lisser cette tension. Ce filtre doit réguler le courant  $i_L$  traversant l'inductance  $L$  et la tension  $V_C$  aux bornes du condensateur  $C$ , afin de minimiser les perturbations dues à la charge.

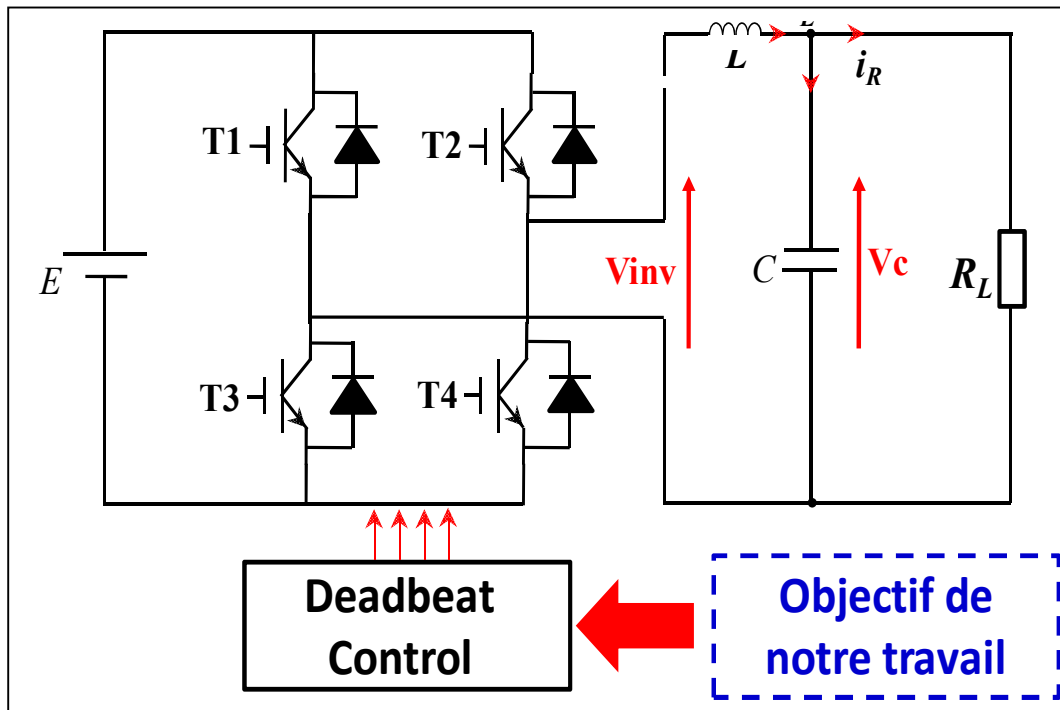


Figure III.1. Schéma d'un onduleur monophasé avec la commande proposé

### III.3. Système étudié

Le convertisseur DC/AC utilisé est de type pont en H. Chacun des deux bras de ce convertisseur est composé de deux interrupteurs: l'un commandé pour l'ouverture et l'autre pour la fermeture, chacun équipé de diodes antiparallèles pour garantir la continuité du courant de la charge pendant la phase de roue libre.

Tableau III.1. Les configurations possibles.

		Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
<b>Bras 1</b>	T1	Passant	Passant	Bloqué	Bloqué
	T3	Bloqué	Bloqué	Passant	Passant
<b>Bras 2</b>	T2	Passant	Bloqué	Passant	Bloqué
	T4	Bloqué	Passant	Bloqué	Passant
<b>Tension <math>V_{inv}</math></b>		$V_{inv} = 0$	$V_{inv} = +E$	$V_{inv} = -E$	$V_{inv} = 0$

Le tableau III.1 illustre les états respectifs des interrupteurs qui respectent toutes les règles fondamentales définissant les états bloqués ou passants des interrupteurs dans un bras de commutation.

Le contrôle de l'onduleur repose sur la méthode de modulation de largeur d'impulsions (MLI), car elle est simple à mettre en œuvre et offre une fréquence de commutation fixe. La MLI d'une cellule de commutation est obtenu en comparant un signal triangulaire (porteuse) déterminant la fréquence de découpage avec le signal de modulation. Plusieurs techniques existent selon que le signal triangulaire soit symétrique ou non (dent de scie montante ou descendante) et selon que le signal de référence soit échantillonné ou non. La figure suivante illustre une MLI centrée (signal triangulaire symétrique) et échantillonnée: le signal de modulation est fixé au début de la période à la valeur atteinte par la sinusoïde de référence à la demi-période du signal triangulaire.

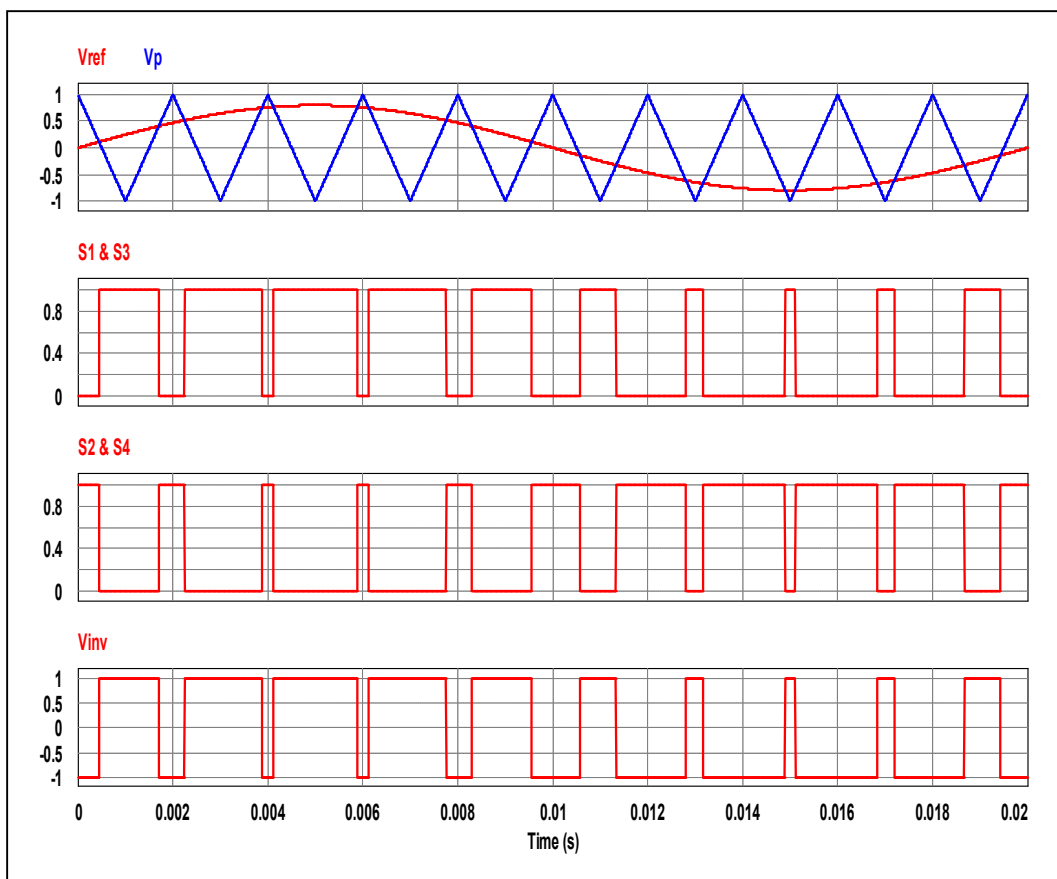


Figure III.2. MLI triangulo-sinusoidale.

L'onduleur monophasé est constitué de deux bras en demi-pont. Si les interrupteurs de puissance sont supposés parfaits, le système (source-onduleur-filtre-charge) est alors représenté par le modèle linéaire du second ordre de la figure ci-dessous :

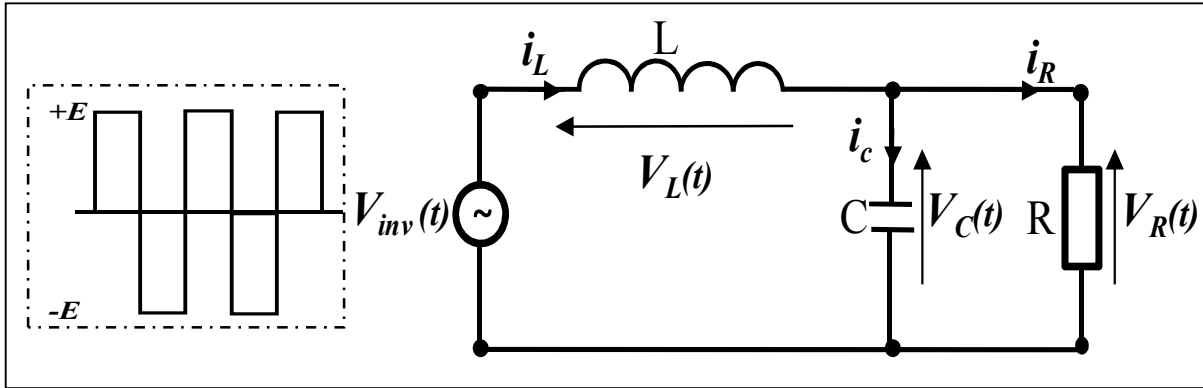


Figure III.3. Schéma de base du système proposé.

D'après la figure III.3 ci dessus, et en utilisant la loi de Kirchhoff, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{inv}(t) = V_L(t) + V_C(t) \\ i_L(t) = i_c(t) + i_R(t) \end{cases} \quad (III.1)$$

Par l'équation (III.1) nous avons :

$$v_{int}(t) = LC\ddot{v}_C(t) + \frac{L}{R}\dot{v}_C(t) + v_C(t) \quad (III.2)$$

En appliquant la transformation de Laplace, on obtient :

$$v_{int}(s) = (LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1)v_C(s) \quad (III.3)$$

La fonction de transfert du filtre LC est donnée ce dessous:

$$\frac{V_C(s)}{V_{inv}(s)} = \frac{1/LC}{s^2 + \frac{1}{CR}s + \frac{1}{LC}} \quad (III.4)$$

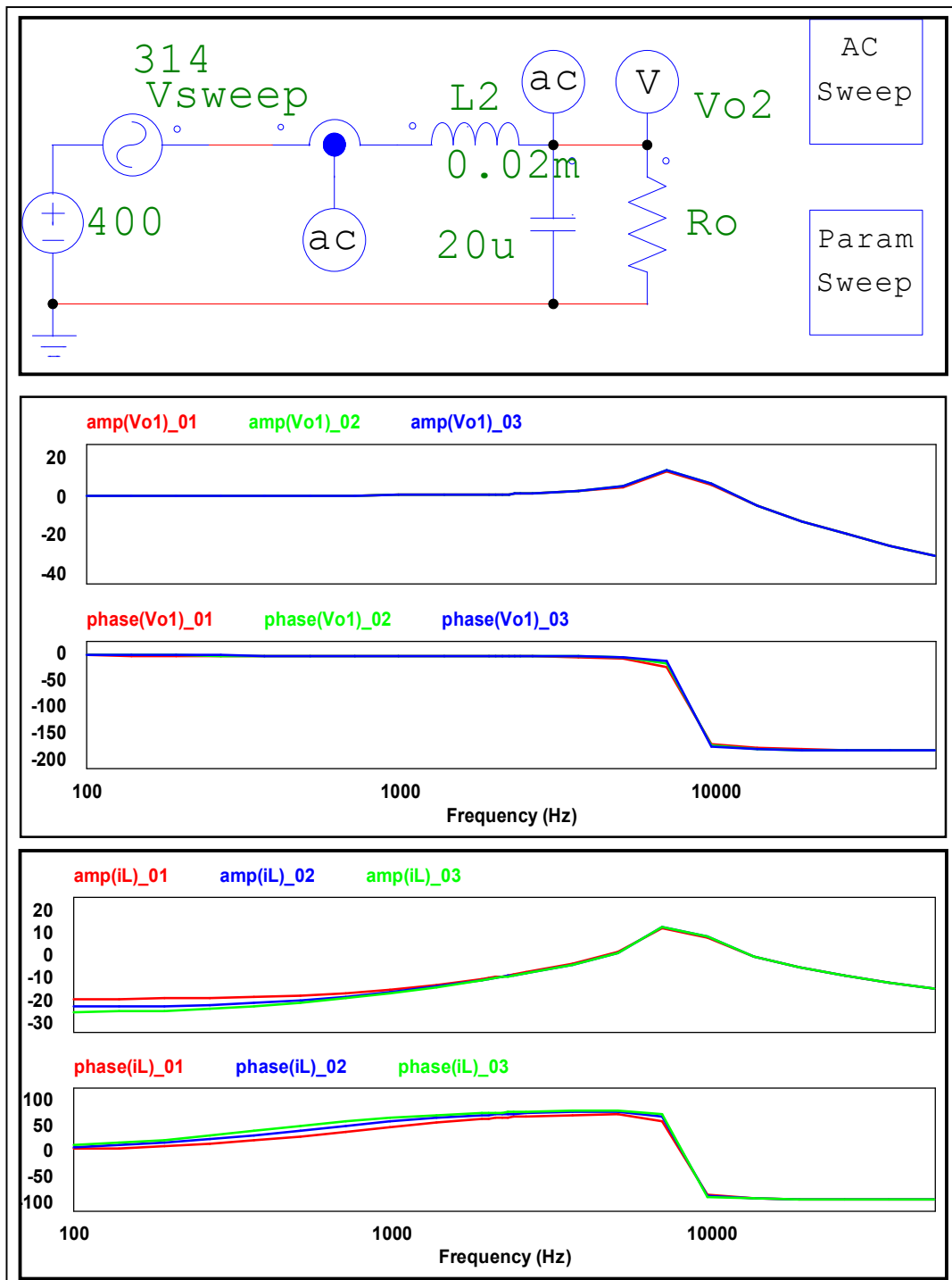
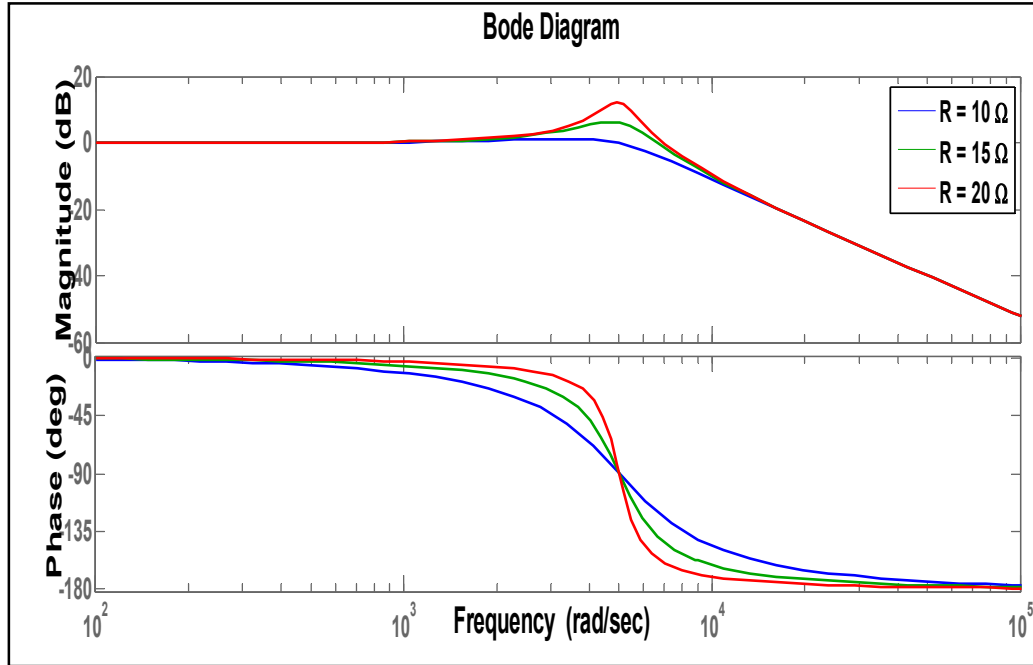


Figure III.4. Schéma de base, la tension et le courant  $i_L$  par PSIM.

La figure III.5 présente le diagramme de bode de la fonction de transfert  $\frac{V_C}{V_{inv}}$  pour différentes valeurs de charge R.

Le diagramme de bode est un outil puissant et polyvalent pour l'analyse et la conception des systèmes de contrôle, aidant à assurer des performances optimales et une stabilité fiable.



**Figure III.5.** Diagrammes de bode de la fonction de transfert avec variation de charge R par PSIM.

Cette figure démontre l'effet de résonance à la fréquence de 1 kHz, qui s'accroît avec l'augmentation de la valeur de R. De faibles gains et déphasages sont observés autour de la fréquence fondamentale.

De plus, un gain de -40 dB est obtenu à la fréquence de commutation du convertisseur, fixée à 10 kHz. Ainsi, seule la composante fondamentale de la tension passera, tandis que les hautes fréquences du contenu harmonique seront filtrées.

La représentation de ce système dans l'espace d'état est donnée par :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (\text{III.5})$$

$x(t)$  : est le vecteur d'état tel que :

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

Avec :

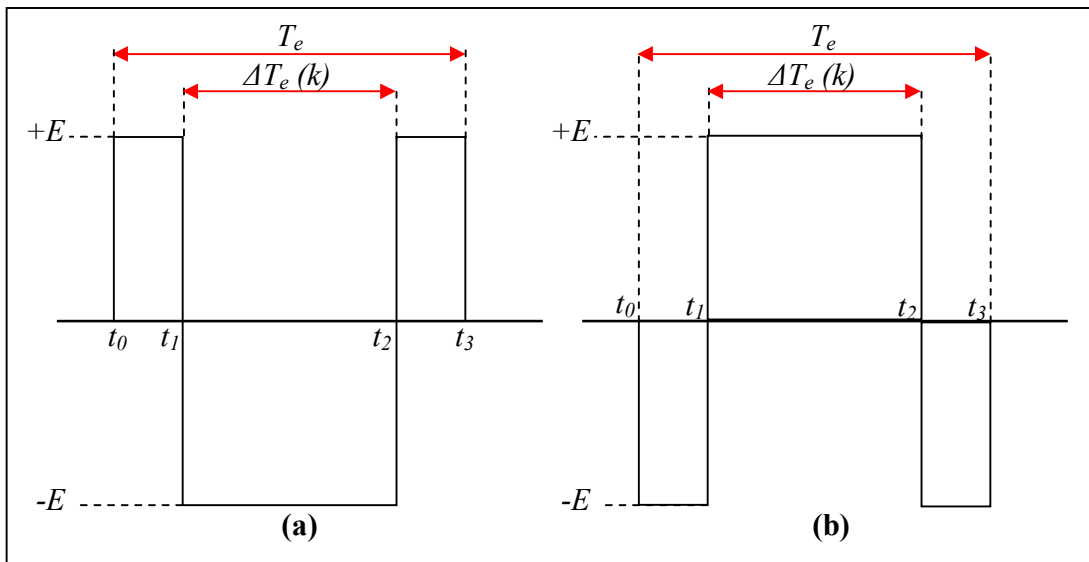
$$\begin{cases} x_1(t) = v_C(t) \\ x_2(t) = \dot{v}_C(t) \end{cases} \quad (III.6)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = -\frac{1}{LC}x_1(t) + \frac{1}{RC}x_2(t) + \frac{1}{LC}v_{int}(t) \end{cases} \quad (III.7)$$

Donc :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{LC} & \frac{1}{RC} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{LC} \end{pmatrix}$$

La figure suivante montre les formes d'onde de  $V_{inv}(t)$  pendant une période d'échantillonnage  $T_e$ :



**Figure III.6.** Modèle MLI à deux niveaux, (a) Alternance positive, (b) Alternance négative.

$V_{inv}$  est la tension de sortie de l'onduleur et a deux valeurs +E ou -E comme illustré à la Figure (III.6).

L'équation du système à temps discret des modèles de commutation à deux leviers est la suivante [21] :

$$x(t) = \exp[A(t-t_0)]x(t_0) + \int \exp[A(t-\tau)]Bv_{inv}(\tau)d\tau \quad (III.8)$$

Ainsi l'équation d'état discrète de à  $t_0$   $t_1$  et  $t_2$   $t_3$  est:

$$X[(k+1)T_e] = \exp[AT_e] X(k) + \exp\left[A\frac{T_e}{2}BE\Delta T(k)\right], E\Delta T(k) = v_{inv}(\tau) \quad (\text{III.9})$$

À partir de l'équation ci-dessous, nous déterminerons la valeur de la durée à appliquer à tout moment pour générer les signaux de commande des interrupteurs.  $\Delta T(k)$  représente la largeur d'impulsion dans le  $k^e$  intervalle d'échantillonnage.

En supposant que les trois termes exponentiels de l'équation III.9 sont approximés à l'aide du développement en série de puissances:

$$A_k = \exp[AT] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T^2}{2LC} & T - \frac{T^2}{2RC} \\ \frac{-1}{LC} + \frac{T^2}{2RLC^2} & 1 - \frac{T}{RC} + \left(\frac{1}{R^2C^2} + \frac{1}{LC}\right)\frac{T^2}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Ainsi, pour remédier à ce problème, une méthode de commande prédictive par battement est proposée. Dans cette méthode, l'entrée de commande au  $k^{th}$  intervalle d'échantillonnage est prédite en utilisant les valeurs du système au  $(k-1)^{th}$  intervalle d'échantillonnage. Le signal de modulation MLI, c'est-à-dire la tension de sortie de référence de l'onduleur, est calculé en utilisant la tension de référence  $v_{ref}$ , le courant réel du condensateur  $i_c$ , et la tension de charge de sortie de l'onduleur  $v_{ch}$  au  $(k-1)^{th}$  intervalle d'échantillonnage. Cela peut être décrit de la manière suivante.

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{bmatrix} X(k) + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} E\Delta T(k) \quad (\text{III.11})$$

La première ligne de l'équation précédente fournit l'expression récurrente de la tension de sortie échantillonnée, qui est la suivante :

$$\Delta T = \frac{1}{g_1 E} (V_{ref}(k+1) - \phi_{11}x_1 - \phi_{12}x_2) \quad (\text{III.12})$$

#### III.4. Résultats de simulation

Pour évaluer l'efficacité de la technique de contrôle proposée, des simulations ont été réalisées. La fréquence de commutation de l'onduleur a été fixée à 10 kHz, et la période d'échantillonnage de l'algorithme a été définie à 0,0001 s. Les paramètres de conception de

l'onduleur sont détaillés dans le tableau III.2. Les résultats de ces simulations fournissent des indications précieuses sur les performances et la robustesse de la méthode de contrôle dans des scénarios variés.

Cette simulation présentée dans la figure III.6 vise à évaluer les performances d'un contrôle dead-beat, utilisant PSIM comme outil de modélisation. Le contrôle dead-beat est une technique de commande qui cherche à obtenir une réponse transitoire aussi rapide que possible, en ramenant le système à son état d'équilibre en un nombre fini d'intervalles d'échantillonnage. Contrairement aux méthodes conventionnelles, le contrôle dead-beat ne nécessite pas de modèle interne du système, ce qui simplifie sa mise en œuvre et le rend particulièrement adapté aux applications où la vitesse de réponse est cruciale.

Tableau III.2. Paramètres de l'onduleur.

Paramètre	Valeur
Tension de sortie nominale $V_c$	220 V
Tension continue $E$	400 V
Inductance du filtreur $L$	2 mH
Résistance $R$	20 $\Omega$
Condensateur de filtrage $C$	20 $\mu\text{F}$
Fréquence d'échantillonnage $F_s$	10 kHz

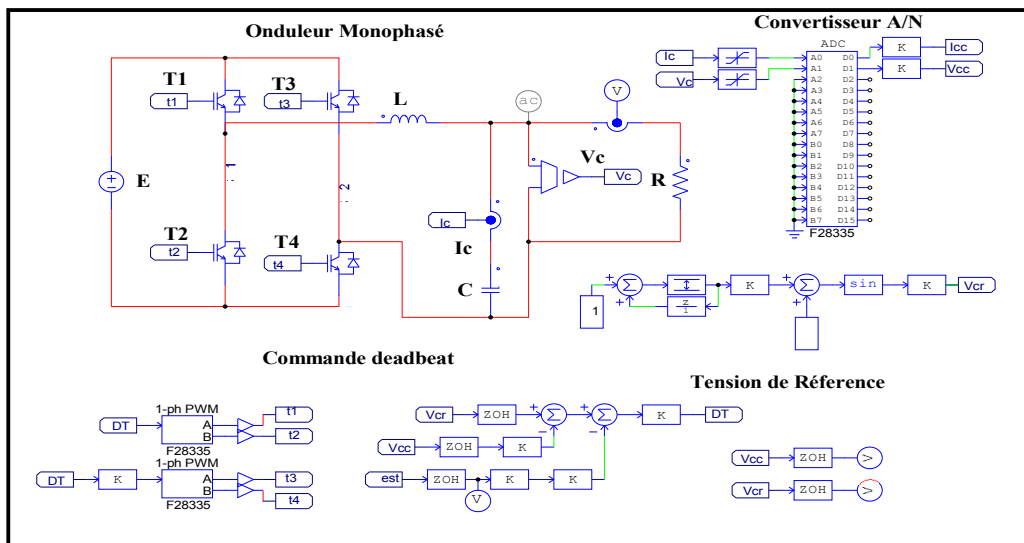


Figure III.7. Contrôle dead-beat par PSIM.

Les résultats de simulations présentées dans les figures (III.8-11) montrent la correspondance étroite entre la tension du condensateur et la référence suggère une régulation précise et réactive du système. L'observation d'une tension de condensateur suivant de près le profil de référence indique une réponse rapide aux variations de charge, témoignant de l'efficacité du contrôle dead-beat.

Quant à la sinusoïdalité du courant de charge, elle témoigne d'une distribution uniforme de la charge sur la période d'échantillonnage. Cette caractéristique est cruciale pour garantir une alimentation stable et pour réduire les harmoniques indésirables, assurant ainsi un fonctionnement en douceur du système.

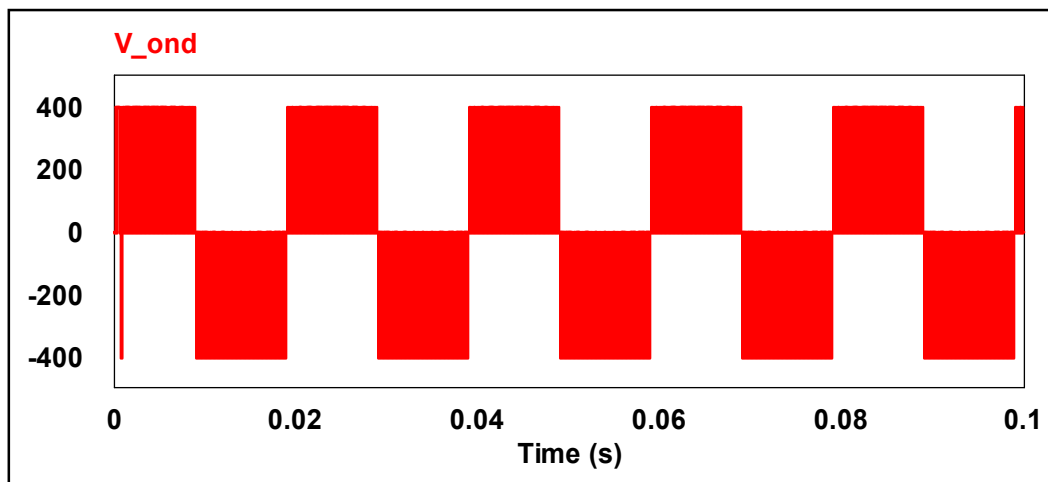


Figure III.8. La tension de sortie onduleur.

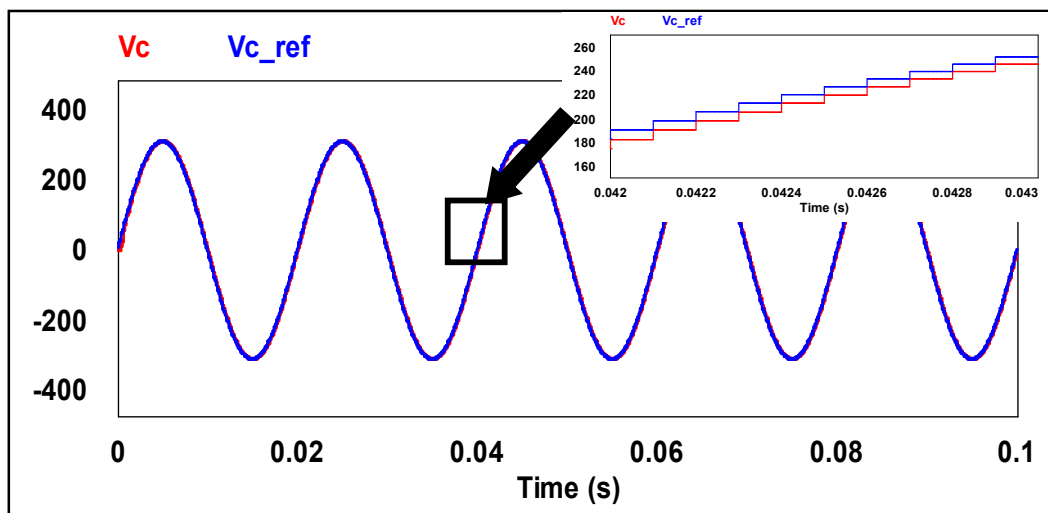


Figure III.9. La tension de référence vs la tension de condensateur.

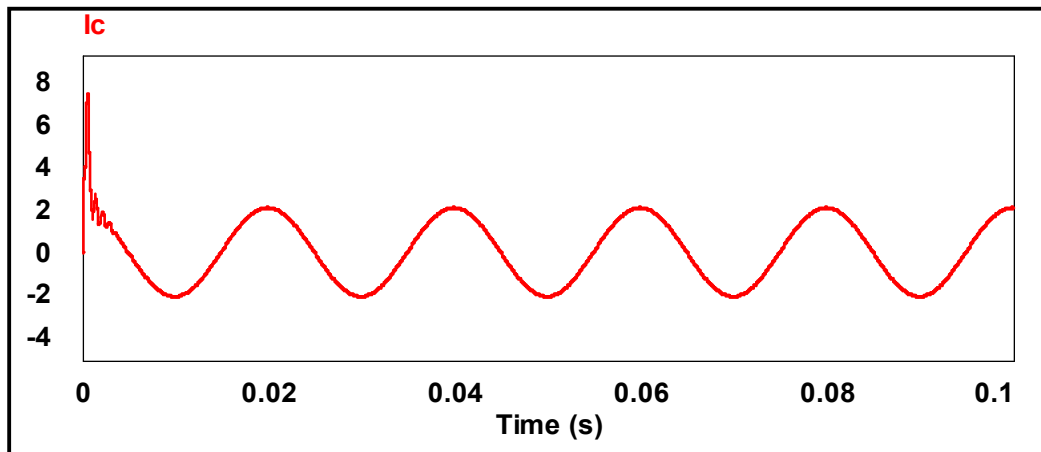


Figure III.10. Allure courant du condensateur

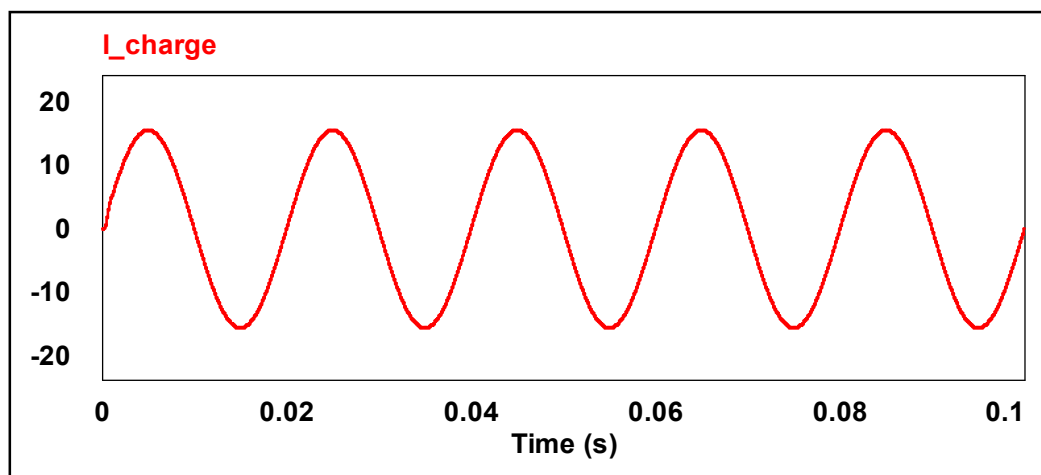


Figure III.11. Allure de courant de la charge.

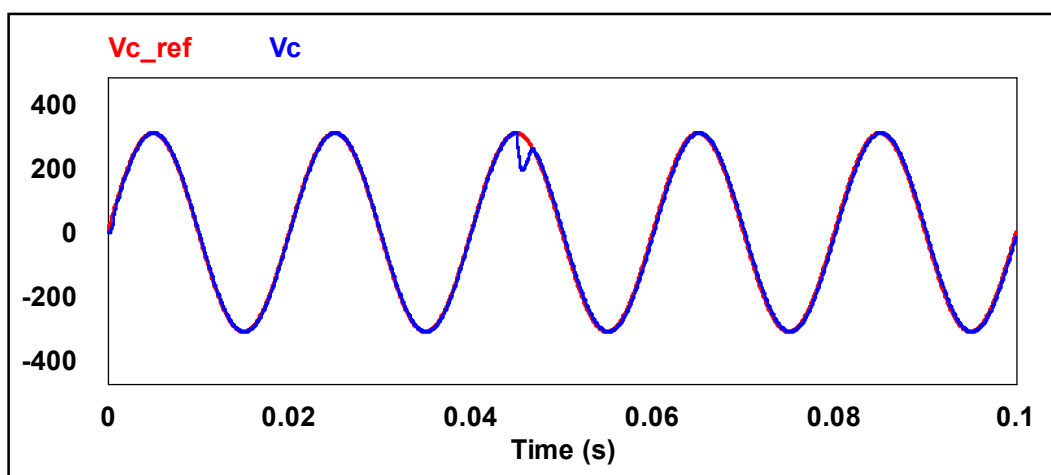


Figure III.12. Forme de la tension de condensateur.

L'ajout de la résistance  $R=20\ \Omega$  à  $t=0.045$  introduit un élément de perturbation dans le système. Cela peut être observé par des changements dans la réponse du circuit.

Étant donné que le contrôle dead-beat est conçu pour fournir une réponse rapide et précise, il serait intéressant d'évaluer comment le système gère cette perturbation et si les performances du contrôle sont affectées de manière significative.

Cette évaluation de la robustesse permettra de mieux comprendre les limites et les capacités du contrôle dead-beat dans des conditions réalistes et variées.

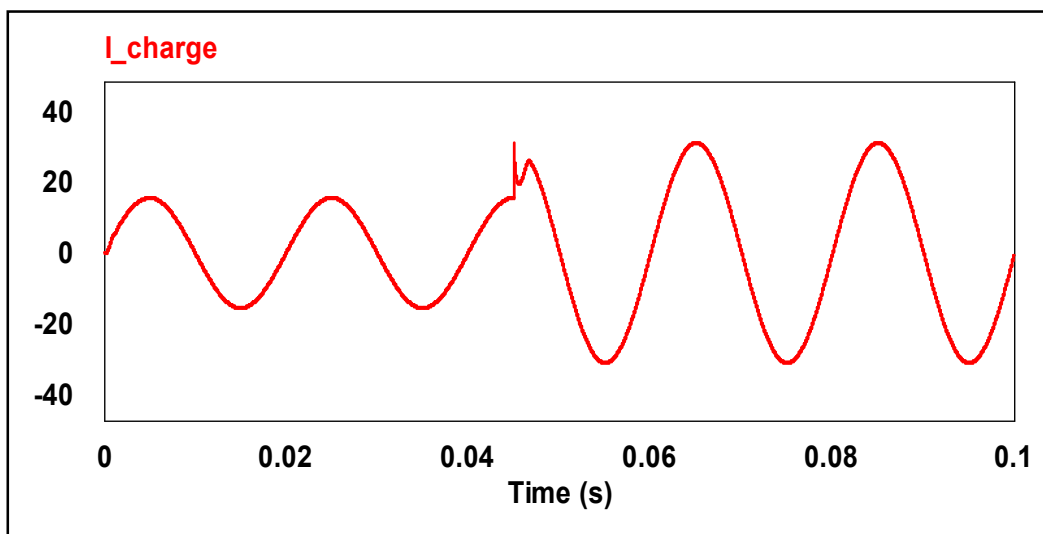


Figure III.13. Allure de courant de la charge mesuré.

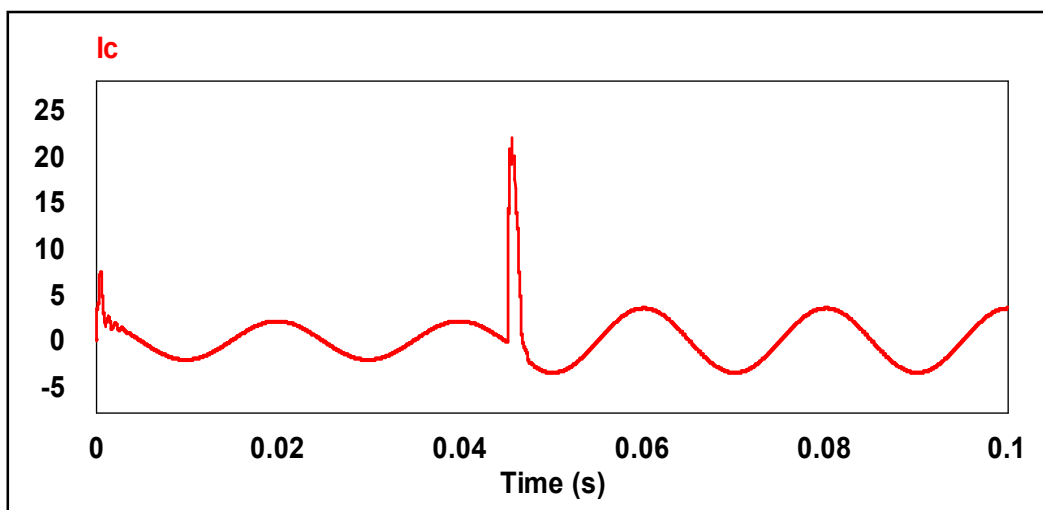


Figure III.14. Allure courant du condensateur après l'insertion de R.

Selon les résultats obtenus, la figure III.12 montre le courbe de la tension du condensateur sous une charge résistive, à  $t = 0,045$  s. Lorsque la charge est augmenté jusqu'à 100%, on observe une perte de tension que la commande récupère rapidement.

### **III.5. Conclusion**

Les résultats de la simulation montrent que le contrôle dead-beat offre une régulation précise et rapide de la tension du condensateur, suivant la référence. La sinusoïdalité du courant de charge confirme l'efficacité du contrôle dans la réduction des harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'alimentation électrique. Cette performance est maintenue même en présence de perturbations, telles que l'ajout d'une résistance de  $20 \Omega$  à  $t=0.045$  s, démontrant ainsi la robustesse du système.

L'insertion de la résistance a démontré que le contrôle dead-beat peut gérer efficacement les variations de charge sans compromettre la stabilité ni la précision de la réponse du système. Ces résultats indiquent que le contrôle dead-beat est une méthode viable et efficace pour les applications nécessitant une réponse rapide et une régulation précise, tout en simplifiant l'implémentation grâce à l'absence de la nécessité d'un modèle interne complexe.



**" Conclusion Générale "**

### Conclusion Générale

Les simulations réalisées ont mis en évidence l'efficacité et la robustesse de la commande dead-beat, révélant plusieurs résultats significatifs :

- ✚ La commande dead-beat assure un suivi précis de la référence de tension du condensateur, démontrant une régulation précise et efficace du système.
- ✚ La forme sinusoïdale du courant de charge atteste de l'efficacité du contrôle dans l'élimination des perturbations et la réduction notable des harmoniques, améliorant ainsi la qualité de l'alimentation électrique.
- ✚ Le système a réagi de manière stable et précise à l'ajout d'une résistance de  $20 \Omega$  à  $t=0.045$  s, démontrant sa capacité à gérer les variations de charge sans compromettre la stabilité ni la précision de la réponse, ce qui souligne la robustesse du contrôle dead-beat face aux perturbations.
- ✚ La simplicité d'implémentation de la commande dead-beat sous PSIM, sans besoin d'un observateur ou d'un modèle interne complexe, la rend accessible pour diverses applications.

Dans l'ensemble, la commande dead-beat s'est révélée être une technique de contrôle hautement performante, combinant précision et rapidité de réponse tout en assurant une robustesse élevée face aux perturbations. Ces caractéristiques en font une solution prometteuse pour une vaste gamme d'applications industrielles et technologiques nécessitant réactivité et fiabilité.

Ces résultats encourageants ouvrent la voie à de futures recherches et améliorations, notamment une étude comparative avec d'autres techniques de commande conventionnelles, afin d'explorer davantage les avantages et les limitations de la commande dead-beat dans divers contextes d'application.



**"Références Bibliographiques"**

### Références Bibliographiques

- [1] M. Saoudi, H. Benguesmia, A. Chouder, “Processor-in-the-Loop Validation of an Observer Current-based Dead-Beat Control for a Single-Phase UPS Inverter”, *Engineering, Technology and Applied Science Research (ETASR)*., vol. 13, no. 1, pp. 10158–10164, Feb. 2023.
- [2] F. Zebiri, “Contrôle non linéaire d’un onduleur a trois niveaux”, mémoire de magister, département d’électrotechnique, Université d’oran, 2012.
- [3] A.H. Abdelhak, “Contribution à l’étude des systèmes photovoltaïques avec stockage connectés au réseau”, Thèse de doctorat en science, département d’électrotechnique, université d’oran, 2016-2017.
- [4] L. Hassaine, I. Abadlia, A. Beddar, F. Abdoune, and M.R. Bengourina, “Contrôle Avancé des Onduleurs Photovoltaïques Connectés au Réseau”, *Journal of Renewable Energies (Revue des Energies Renouvelables)*, vol. 24, no. 2, pp. 181-201, Dec. 2021.
- [5] A. Hadj kaddour, M.H. Senoussaoui, “Implémentation de la commande ‘Dead-Beat’ en temps réel pour un onduleur de tension monophasé”, Mémoire de master, Département de génie électrique, Université de M’sila, juin 2020.
- [6] K. Belkacem, “Commande avec observateur de courant de charge d'un onduleur monophasé autonome. Mémoire de Master en Traitement de l'information et complexité du vivant”, *Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis*, p4, b2016.
- [7] B. Shahid, “L’énergie solaire photovoltaïque pour les ingénieurs concepteurs”, Press book, février 6, 2024.
- [8] A. Mesrane, M. Chikh, R. Sellam, “Guide Technique des Installations Solaires Photovoltaïques Autonomes et Raccordées au Réseau Basse Tension”, CEREFÉ, 2022.
- [9] “Énergie solaire photovoltaïque”, Wikipédia, L’encyclopédie libre.
- [10] S. Mekliche, “Etude et Simulation des paramètres électriques d’une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium”, Mémoire de master, Département d’Electronique, Université de Tizi-ouzou, Juin 2017.
- [11] “Des mini-modules Pérovskites en orbite autour de la terre”, Recherche et innovation, Publié le 16/05/2024.
- [12] M. Belarbi, “Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome”, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'oran, 2015.

- [13] C. Mahamat, “Analyse et commandes des convertisseurs multi-niveaux pour un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique”, Thèse de Doctorat, Université Paris Saclay (COmUE), 2018.
- [14] B.A. Khedim, M.Y. Ould Taleb Abderrahmane, “Etude de fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques”, Département de génie électrique et électronique, Mémoire de master, juin 2015.
- [15] F. Billel, “Etude d’un système Hybride (photovoltaïque –éolien) ”, Département de génie mécanique, Mémoire de master, juin 2015.
- [16] Y. Sedrati, H. Nouar, “ Implémentation de l'algorithme P&O pour un système photovoltaïque”, Département d’électronique et communication, Mémoire de master, juin 2016.
- [17] A.Gamni, “Etude et simulation d’un système photovoltaïque connecté au réseau électrique ( étude de cas réseau d’Adrar)”, Ingénieur d'Etat en électrotechnique, Master, Option : Physique énergétique, Université d’Adrar, 2012.
- [18] R. Kabouche, S. Harrouni, A. Talha, “Etude comparative des différentes techniques de stockage de l’énergie solaire photovoltaïque”, Revue des Energies Renouvelables SIENR’12 Ghardaïa, pp.115-129, 2012.
- [19] A. Ould Bahammou, “La synchronisation d’un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique”, Mémoire de master en physique énergétique et énergie renouvelable, Département des sciences de la matière, Université d’Adrar, 2017.
- [20] N. Papa Amadou, K. Achari, “ Production d’énergie électrique à partir d’un système photovoltaïque”, Mémoire de master en électromécanique, Département de Génie Electrotechnique et Automatique, Université d’Adrar, 2019.
- [21] M. Saoudi, “Modélisation et Commande des onduleurs multifonctionnels”, Thèse de doctorat en sciences, en génie électrique, université de M’sila, 2024.
- [22] Z. Ayachi, K. Djotni, “ Etude et simulation d’un onduleur de tension triphasé”, Mémoire de Licence, Département d’Electrotechnique, Université d’Annaba, 2021.
- [23] I. Alhamrouni, N. Zainuddin, M. Salem, N.H.A. Rahman, L. Awalin, “Design of single phase inverter for photovoltaic application controlled with sinusoidal pulse width modulation”, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, Vol.15, N°2, pp. 620-630, 2019.

- [24] M. Saoudi, H. Benguesmia, A. Chouder, “Efficient Deadbeat Control of Single-Phase Inverter with Observer for High Performance Applications”, *Przeglad Elektrotechniczny*, Vol.44, 2023.
- [25] B. Nicolas, “Contribution à la commande des convertisseurs statiques”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT),1996.
- [26] K. Kohlhase, “Modulation de largeur d'impulsion (PWM) : présentation et utilisation”, *Articles & Blogs*, 2020.
- [27] “Modulation de largeur d'impulsion”, *Licence Créative Commons*
- [28] O.N. Faqhruldin, E.F. El-Saadany, H.H. Zeineldin, “A universal islanding detection technique for distributed generation using pattern recognition”, *IEEE Trans Smart Grid*, Vol. 5, N°4, 2014.
- [29] A. Benyoucef, K. Kara, A. Chouder, S. Silvestre, Santiago, “Prediction based Deadbeat Control for Grid-connected Inverter with L-filter and LCL-filter”, *Electric Power Components and Systems*, Vol.42, N°12, pp.1266–1277, 2014.