

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : ELECTRONIQUE DES
SYSTEMES EMBARQUES

*Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de master académique
Par:*

SAIDI KAMEL

Intitulé

SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES CONNECTES AU RESEAU

Soutenu devant le jury composé de

Dr. DRIF Mahmoud

Dr. DJAZIA Kamel

Dr. BENHAMADOUCHE Abdelouahab

Dr. BOUHLAGHEM Ahmed

Université de M'sila

Université de M'sila

Université de M'sila

Université de M'sila

Président

Examineur

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2024/2025

Résumé

Ce travail présente un cas pratique de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. Ce travail présente un système de conversion photovoltaïque de moyenne puissance qui est raccordé au réseau électrique monophasé. Pour pouvoir atteindre cet objectif, nous avons présenté une étude non exhaustive des différentes topologies existantes, où nous avons choisi d'utiliser un système de conversion à deux étages basé sur l'utilisation des onduleurs multi-niveaux PUC5. Nous avons ensuite présenté la modélisation et le dimensionnement des différents composants du système qui associe un GPV. Nous avons, par la suite, choisi les éléments de commande qui s'y intègrent, alors nous avons choisi un algorithme MPPT P&O pour l'optimisation de la puissance, une PLL pour la synchronisation avec la tension du réseau, et nous avons principalement utilisé une commande par modèle prédictive (MPC) pour améliorer les performances et la commande de l'onduleur PUC. Les différents résultats de simulation ont montré l'efficacité du système, qui se traduit par la quantité élevée de la puissance active injectée et par un THD minimal du courant injecté dans le réseau électrique.

Mots clés : Système PV connecté au réseau, PUC5, Commande par modèle prédictive (MPC)

Abstract

This work presents a practical case of the use of photovoltaic energy. This work presents a medium-power photovoltaic conversion system that is connected to the single-phase electrical grid. To achieve this objective, we presented a non-exhaustive study of the various existing topologies, where we chose to use a two-stage conversion system based on the use of PUC5 multi-level inverters. We then presented the modeling and sizing of the various components of the system involving a photovoltaic generator. We then chose the control elements to be integrated, so we selected a P&O MPPT algorithm for power optimization, a PLL for synchronization with the grid voltage, and we mainly used MPC control to improve the performance and control of the PUC inverter. The various simulation results demonstrated the efficiency of the system, reflected in the high amount of active power injected and the minimal THD of the current injected into the power grid.

Keywords: Grid-connected PV system, PUC5, Model predictive control (MPC)

ملخص

يقدم هذا العمل دراسة حالة عملية في استخدام الطاقة الكهروضوئية. يعرض هذا العمل نظام تحويل كهروضوئي متوسط الطاقة متصل بشبكة الكهرباء أحادية الطور. ولتحقيق هذا الهدف، قدمنا دراسة غير شاملة لمختلف الطوبولوجيات الموجودة، حيث اخترنا استخدام نظام تحويل من مرحلتين يعتمد على استخدام محولات 5PUC متعددة المستويات. ثم قدمنا بعد ذلك نمذجة المكونات المختلفة للنظام وتحديد حجمها باستخدام محول GPV. ثم اخترنا بعد ذلك عناصر التحكم التي سيتم دمجها، فاخترنا خوارزمية P&O MPPT لتحسين الطاقة، و PLL للمزامنة مع جهد الشبكة، واستخدمنا بشكل أساسي التحكم التكميلي لتحسين أداء عاكس PUC والتحكم فيه. أظهرت نتائج المحاكاة المختلفة كفاءة النظام، وهو ما ينعكس في الكمية العالية من الطاقة النشطة المحقونة والحد الأدنى من THD للتيار المحقون في شبكة الطاقة.

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة، PUC5، التحكم في النموذج التنبؤي (MPC)

Remerciements

Nous remercions avant tous ALLAH qu'il nous a aidé

Pour réaliser ce modeste travail

Mes sincères remerciements et ma plus grande

Reconnaissance à mon encadreur monsieur abdelouahab

Benhamadouche enseignant au département d'électronique,

Mes Remercîments vont aussi a ceux qui m'ont fais l'honneur de

Juger mon travail, le président de jury et les examinateurs.

Je remercie également tous les enseignants du département

D'électronique pour leurs contributions à ma formation

Durant ma période d'étude.

Merci à tous qui ont contribué de près ou de loin à la

Réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents symboles d'affection et d'amour, qui

M'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long

Chemín, durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie

Afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents

Sans oublié mes très chères frères et mes sœurs.

Et toute ma famille

Et

Tous ceux que j'aime.

Sommaire

Introduction

Chapitre 1

1.	Introduction.....	3
2.	Le générateur photovoltaïque.....	3
2.1.	Association série des cellules PV.....	4
2.2.	L'association en parallèle des cellules	5
3.	Types d'installations photovoltaïques.....	6
3.1.	Installations autonomes	6
3.2.	Installations raccordées aux réseaux	7
4.	Exigences et défis des systèmes PV raccordés au réseau.....	8
5.	Technologies des convertisseurs de puissance pour les systèmes photovoltaïques en monophasé.....	9
6.	Onduleurs AC-Module sans transformateur (Convertisseurs PV intégrés au module).....	11
7.	Onduleurs à cordes en un seul étage sans transformateur.....	11
7.1.	Structures d'onduleurs dérivées de la topologie d'H-Bridge.....	12
7.1.1.	Première topologie de full-bridge	12
7.1.2.	Onduleur H5 (SMA).....	12
7.1.3.	Onduleur HERIC (Sunways).....	13
7.1.4.	Onduleur REFU.....	14
7.2.	Structures d'onduleurs dérivées de la topologie de NPC.....	14
7.2.1.	Point neutre clampé (NPC) Demi-pont Onduleur	15
7.2.2.	Onduleur conergy NPC.....	15
8.	Onduleurs photovoltaïques en trois phases	16
9.	Conclusion	16

Chapitre 2

1.	Introduction	17
2.	Système proposé.....	17
3.	Modélisation du système.....	18

3.1.	Générateur photovoltaïque.....	18
3.2.	Modélisation du convertisseur Boost.....	19
3.3.	Modélisation du filtre LCL.....	21
3.4.	Modélisation de la synchronisation au réseau.....	23
3.5.	Modélisation de l'onduleur PUC5.....	24
3.6.	Le fonctionnement d'un onduleur PUC5.....	25
4.	Modélisation de la commande.....	27
4.1.	Algorithme de recherche du point de puissance maximale« MPPT ».....	28
4.2.	Régulation de la tension du bus continu.....	30
4.3.	Stratégie de commande MPC (model prédictive control) utilisée.....	31
4.4.	Algorithme MPC.....	32
5.	Conclusion.....	34

Chapitre 3

1.	Introduction.....	35
2.	Caractéristique du générateur photovoltaïque.....	36
3.	Simulation de générateur PV et le hacheur Boost par commande MPPT.....	37
4.	Simulation du dispositif MPPT avec éclairement variable.....	40
5.	Simulation du système complet avec irradiance constante.....	42
6.	Simulation du système complet avec irradiance variable.....	44
7.	Conclusion.....	46

Conclusion

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1. Composantes d'un champ de modules photovoltaïques.....	3
Figure 2. Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.....	4
Figure 3. Caractéristique résultante du regroupement de ns cellules en série.....	4
Figure 4. Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.....	5
Figure 5. Caractéristique résultante du regroupement de Np cellules en parallèle.....	5
Figure 6. Installation PV autonome.....	6
Figure 7. Installations raccordées au réseau.....	7
Figure 8. Exigences d'un système PV connecté au réseau basé sur des convertisseurs de puissance....	8
Figure 9. Concepts de systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	10
Figure 10. Les systèmes photovoltaïques connectés monophasés	10
Figure 11. Un onduleur universel de module AC connecté à une seule étape avec un filtre LCL	11
Figure 12. Onduleur FB de base.....	12
Figure 13. Topologie des onduleurs H5 (SMA).....	13
Figure 14. Topologie HERIC (Sunways).....	13
Figure 15. La topologie d'onduleur REFU.....	14
Figure 16. Demi-pont serré neutre.....	15
Figure 17. Onduleur point neutre serré de Conergy	15

Chapitre 2

Figure 1. Blocs de contrôle généraux d'un système PV monophasé connecté au réseau.....	17
Figure 2. Structure de convertisseur Boost.....	19
Figure 3. Structure d'un filtre LCL.....	21
Figure 4. Structure de base d'un système PLL	23
Figure 5. Topologie PUC5	24
Figure 6. Le courant circulant pour chaque cas	25
Figure 7. Forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur à cinq niveau.....	27
Figure 8. Schéma d'adaptation entre un GPV et une charge	28
Figure 9. Signe de dP/dV à différentes positions de la caractéristique d'un GPV	29
Figure 10. : Algorithme de poursuite du point maximum de puissance MPPT/P&O	30
Figure 11. Contrôleur PI pour la régulation de la tension du bus continu.....	31
Figure 12. Contrôleur proposé pour le PUC5.....	31
Figure 13. Organigramme du calcul du vecteur de tension.....	34

Chapitre 3

Figure 1. Schéma de simulation globale système PV raccordé au réseau.....	35
Figure 2. Caractéristiques I(V) et P(V) du modèle du GPV avec éclairage variable.....	36
Figure 3. Caractéristiques I(V) à gauche et P(V) à droite du modèle de GPV à température variable..	37
Figure 4. Modèle de simulation MPPT avec Hacheur Boost.....	37
Figure 5. Paramètre du dispositif MPPT.....	38
Figure 6. La tension générée par le GPV (V_{pv}) avec Irradiance = $1000W/m^2$	38
Figure 7. Le courant généré par le GPV (I_{pv}) avec irradiance = $1000w/m^2$	39
Figure 8. La puissance générée par le GPV (P_{pv}) avec irradiance = $1000w/m^2$	39
Figure 9. Valeur de l'irradiance solaire de 0 à 1s.....	40
Figure 10. Tension de sortie V_{pv}	40
Figure 11. Courant de sortie I_{pv}	41
Figure 12. Puissance de sortie P_{pv}	41
Figure 13. Forme de la puissance active (à gauche) et la puissance réactive (à droite) injectées.....	42
Figure 14. La tension du bus continue et la tension au borne du condensateur C2	42
Figure 15. La forme du courant injecté dans le réseau et sa référence $I_g + I_{g_ref}$	43
Figure 16. La forme du courant injecté dans le réseau	43
Figure 17. Analyse FFT du courant injecté dans le réseau.....	43
Figure 18. Valeurs de l'irradiance solaire de 0 à 10s.....	44
Figure 19. Forme de la puissance active (à gauche) et la puissance réactive (à droite) injectées.....	44
Figure 20. Forme de la tension du bus continue et de la tension du condensateur C2.....	44
Figure 21. Analyse FFT du courant injecté dans le réseau.....	45

Introduction générale

Aujourd'hui, le monde dépend fortement des sources d'énergie non renouvelables telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Parallèlement, la production d'énergie représente un défi majeur pour les années à venir en raison de l'augmentation des besoins énergétiques, qui entraîne une augmentation de la pollution environnementale causée par les sources traditionnelles.

Pour résoudre cette crise, le monde a commencé à utiliser un autre type d'énergie, les énergies renouvelables, comme l'énergie éolienne, l'énergie solaire et la biomasse. Ces énergies se caractérisent par leur inépuisable potentiel et leur faible impact sur l'environnement [1].

Parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) devient de plus en plus compétitive par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. L'énergie photovoltaïque connectée au réseau est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus prometteuses et à la croissance la plus rapide au monde [2].

Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau sont généralement classés en deux catégories : à un étage et à deux étages de conversion. Le rendement de ces systèmes dépend non seulement des conditions de fonctionnement, mais aussi de l'ensemble de la chaîne de conversion. Cet objectif peut être atteint grâce à un choix judicieux des configurations ou topologies, un dimensionnement judicieux des composants et des techniques de contrôle efficaces.

Récemment, l'application du contrôle prédictif par modèle (MPC) aux systèmes de conversion d'énergie a fait l'objet de recherches approfondies, tant théoriques qu'expérimentales. Différentes techniques MPC ont été proposées pour contrôler les onduleurs multi-niveaux en fonctionnement connecté au réseau, permettant des performances élevées et une dynamique rapide.

L'objectif de ce travail est de concevoir un système de conversion photovoltaïque de contrôle efficace, basé sur la commande MPC. Les convertisseurs PUC sont considérés comme une topologie prometteuse pour interfacer le système photovoltaïque avec le réseau,

avec moins de filtres harmoniques et un rendement élevé. Contrairement aux autres topologies ce type convertisseur fournit une tension de sortie à cinq niveaux avec une seule source DC et six commutateurs de puissance.

Ce travail est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux systèmes PV, en particulier aux systèmes PV monophasés connectés au réseau, ainsi qu'aux topologies d'interface électronique de puissance pour ces systèmes et à leurs objectifs de contrôle.
- Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter l'architecture du système que nous proposons ainsi que les différents modèles de commande utilisés.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons le modèle de simulation du système proposé, ainsi que les simulations que nous avons effectuées pour la validation de notre travail.

Enfin, une conclusion générale et les perspectives proposées pour conclure ce travail de mémoire.

CHAPITRE II

MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTÉS AU RÉSEAU

1. Introduction

La modélisation d'un système photovoltaïque (PV) connecté au réseau est essentielle pour analyser et optimiser son fonctionnement. Elle permet de comprendre les interactions entre les panneaux solaires, les onduleurs, et le réseau électrique, tout en prenant en compte les variations environnementales et les exigences de régulation. La compréhension du fonctionnement du système est analysée pour permettre un fonctionnement optimal dans des conditions extrêmes.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents éléments de la modélisation qui permettent de rendre le système étudié fonctionnel avec les meilleures performances possibles. De ce fait, nous allons nous détailler les constituants matériels du systèmes ainsi que les éléments de commande tel que la MPPT ainsi qu'un description avancé de la commande que nous utilisons dans ce travail qui est la commande de model prédictive MPC.

2. Système proposé

L'architecture système que nous proposons pour concrétiser les objectifs de notre travail représenté dans par la Figure 1. Cette figure englobe de façon générale les éléments constituant un système PV à deux étages raccordés au réseau monophasé, ainsi que les différents types d'algorithmme de contrôle que nous allons incorporer dans la commande globale de ce système.

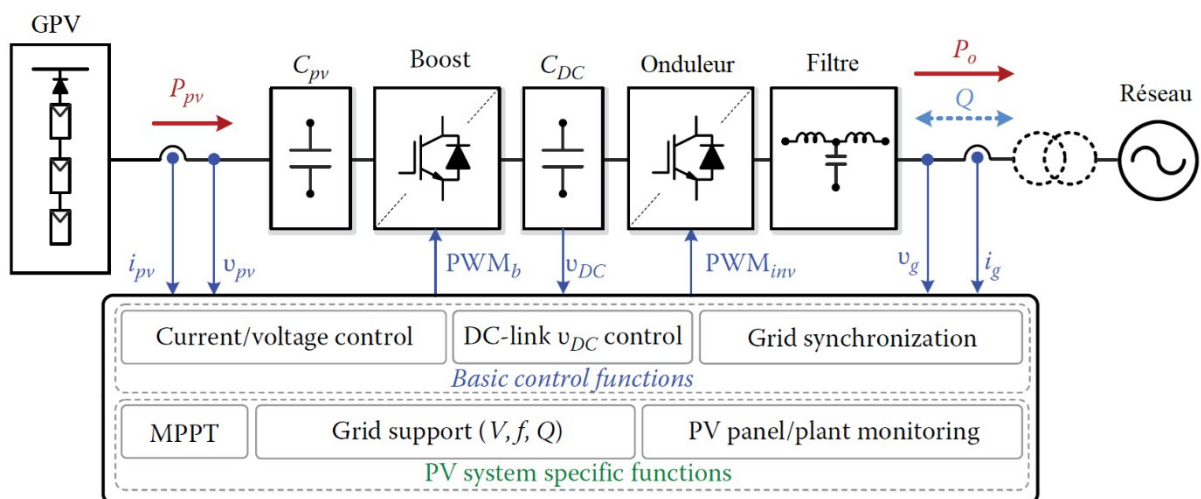


FIGURE 1. BLOCS DE CONTRÔLE GÉNÉRAUX D'UN SYSTÈME PV MONOPHASÉ CONNECTÉ AU RÉSEAU

Les éléments clés du modèle global du système photovoltaïque représenté par la Figure 1 sont:

- **Un générateur photovoltaïque (GPV) :** Formé de 16 modules de type. Nous avons étudié l'influence des paramètres extérieurs, l'éclairement et la température sur les caractéristiques (courant-tension, puissance tension). Ce générateur PV peut produire une puissance crête de 2500 Watt avec une tension au point MPP de 150 V.
- **Convertisseur continu/continu (Boost) :** Ce convertisseur est connu par le nom d'élévateur de tension, qui est l'étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge de sortie. Cette structure permet de tirer le maximum de puissance du GPV à travers des algorithmes bien adaptés qui lui permet de rechercher le point de puissance maximum (PPM) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque.
- **Convertisseurs Continu-Alternatif (Onduleur) :** concernant l'onduleur utilisé, c'est un onduleur monophasé à 5 niveaux de type « Packed U-Cell » (PUC5) a été utilisé. Il se compose de deux cellules chacune avec 3 interrupteurs de puissance (Mosfet, IGBT...).
- **Un filtre LCL :** Un filtre harmonique passe-bas est placé directement à la sortie du convertisseur, entre le pont et les charges / le réseau. Son utilité est de filtrer la fréquence de commutation (et les fréquences avoisinantes), ainsi que de protéger le convertisseur contre des transitoires. La meilleure alternative correspond au filtre LCL. C'est ce choix qui a été retenu ici. Il s'agit donc d'un filtre passe-bas du troisième ordre, qui offre une bonne atténuation même avec de faibles valeurs de $L_{1,2}$ et C , ainsi qu'une faible ondulation du courant de sortie [2].
- **Le réseau électrique :** Il représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude $V = 220V$ et de fréquence $f = 50Hz$.

3. Modélisation du système

3.1. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un ensemble de module photovoltaïque identique, ceci permet de générer une puissance suffisante pour l'injection du courant dans le réseau électrique. Aussi, il faut choisi un ensemble de module qui permettent d'atteindre une certaine tension qui permet une efficacité et des performances correctes pour l'implémentation d'un modèle de simulation fonctionnel.

3.2. Modélisation du convertisseur Boost

Le deuxième élément essentiel dans la conception d'un système de conversion photovoltaïque, et le convertisseur continu/continu, dans le système proposé nous utilisons un hacheur parallèle BOOST qui permet d'augmenter le niveau de la tension du générateur photovoltaïque à un niveau adéquat, ce qui est important lors de l'injection de u courant électrique dans le réseau monophasé.

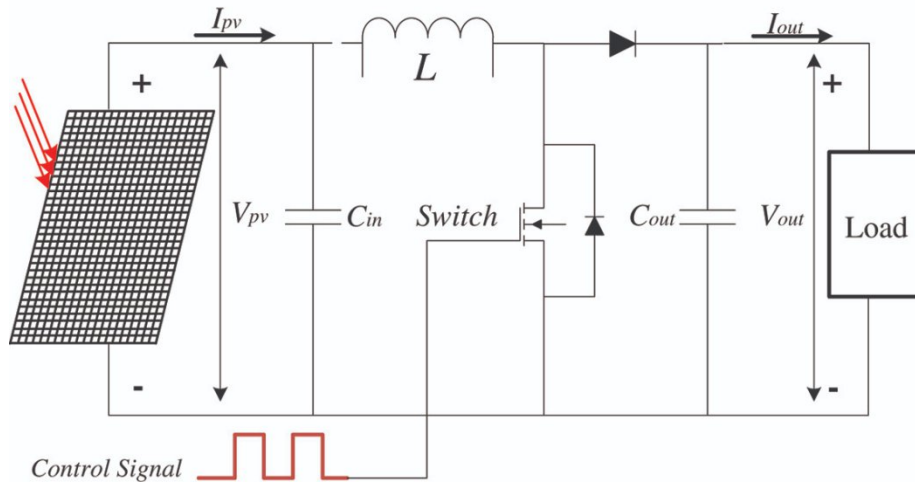


FIGURE 2. STRUCTURE DE CONVERTISSEUR BOOST

A. Sélection de l'inductance L

L'inducteur détermine la stabilité de la boucle du capteur de courant et l'ondulation du courant de l'inducteur. Le courant d'ondulation de l'inductance crête à crête est inversement proportionnel à la valeur de l'inducteur. Pour calculer l'inductance, ΔI_L a été supposé égal à 5% du courant d'entrée nominal du convertisseur élévateur DC-DC.

L'inductance, L_{DC} est calculé en utilisant la formule (II.1) :

$$L_{DC} = \frac{V_{PV}(V_{DC_{avg}} - V_{PV})}{\Delta I f_{DC} V_{DC_{avg}}} \quad (II.1)$$

Avec :

- $V_{DC_{avg}}$: la tension moyenne du bus continue qui alimente l'onduleur monophasé.
- f_{DC} : la fréquence de commutation du convertisseur Boost
- V_{PV} : la tension d'entrée vers le convertisseur Boost, c'est-à-dire tension de sortie du générateur photovoltaïque.
- ΔI : l'ondulation de courant. Ici, le système PV fonctionne à la puissance nominale.

B. Sélection de la capacité d'entrée

Le découplage du générateur PV se fait à travers une commande adéquate, et le condensateur permet de minimiser les ondulations du courant qui est tiré du générateur PV. C'est pourquoi une plus petite valeur de condensateur a été utilisée.

L'équation utilisée pour calculer C_{PV} est donnée par :

$$C_{PV} = \frac{V_{PV} D}{4 \Delta V_{PV} f_{DC}^2 L_{DC}} \quad (II.2)$$

Avec :

- D: Rapport cyclique du convertisseur Boost.
- V_{PV} : Tension moyenne aux bornes du générateur photovoltaïque,
- ΔV_{PV} : On suppose que l'ondulation de commutation de la tension du générateur photovoltaïque est à 10%.
- C_{PV} : est utilisé pour le découplage du G_{PV} afin de limiter V_{PV} à ΔV_{PV} .

C. Sélection de la capacité de sortie

La tension du bus continu V_{DC} , se compose d'une composante continue moyenne, V_{DCmoy} , ainsi que d'une ondulation de tension à 100 Hz.

L'expression pour l'ondulation de tension crête à crête de 100 Hz, ΔV_{DC} , du bus continu est donnée en (II.3).

$$\Delta V_{DC} = \frac{P_g}{C_{DC} V_{DCavg} \omega} \quad (II.3)$$

Avec :

- P_g : est la puissance active injectée dans le réseau.
- C_{DC} : est le condensateur du bus continu.
- ω : est la pulsation du fondamentale de la tension du réseau.
- V_{DCmoy} : est de 400 V, c'est la tension nécessaire pour pouvoir injecter un courant dans le réseau électrique.

Dans le système PV modélisé, le C_{DC} est calculé pour limiter l'ondulation de la tension ΔV_{DC} à environ 5% de V_{DCmoy}

3.3. Modélisation du filtre LCL

Pour connecter un système photovoltaïque au réseau, on utilise principalement des filtres L, LC, LCL, des filtres EMI, des filtres harmoniques passifs et des filtres actifs de puissance. Le choix du filtre dépend des exigences de qualité de l'énergie, du coût, de la complexité du système et des caractéristiques du réseau local. Le filtre LCL est aujourd'hui les plus répandus pour les systèmes PV résidentiels et industriels.

Le filtre LCL comprend deux inductances et un condensateur, tous connectés en parallèle (voir Figure 3), c'est-à-dire par phase. Dans les filtres LCL ci-dessus, R_g et L_g sont la résistance et l'inductance côté réseau. Et R_f et L_f représente l'inducteur côté onduleur. Aussi, nous avons un condensateur parallèle C_f et sa résistance de et R_d est la résistance l'amortissement passif [17].

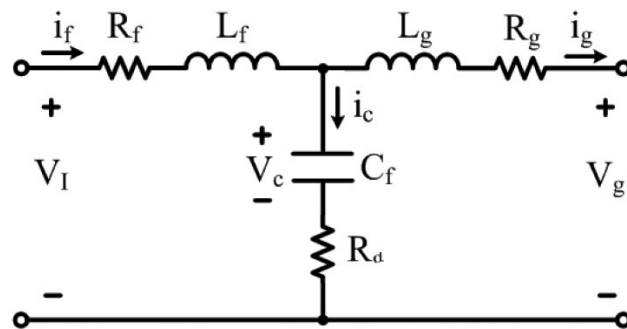


FIGURE 3. STRUCTURE D'UN FILTRE LCL

La première étape du calcul des composants du filtre est la conception de l'inductance côté onduleur L_f , qui peut limiter l'ondulation du courant de sortie jusqu'à 20% de l'amplitude nominale :

$$L_f = \frac{V_{DC}}{8\Delta I_{max} f_s} \quad (II.4)$$

Où ΔI_{max} est l'ondulation du courant à 10%.

$$\Delta I_{max} = 0.1 \frac{\sqrt{2} P_n}{V_r} \quad (II.5)$$

Avec :

$$V_{réseau} = 230 \text{ V}, 50 \text{ Hz}$$

$$V_{DC} = 400$$

L'inductance du côté réseau L_g , est déterminée par la valeur acceptable d'ondulation de commutation dans le réseau :

L'inductance totale ($L_f + L_g$) est sélectionnée en fonction de la chute de tension maximale à travers l'inductance, la chute maximale est limitée à 10% de la tension nominale :

$$V_{L_f+L_g} = I * X_{L_f+L_g} = I * 2\pi f * (L_f + L_g) \quad (\text{II.6})$$

$$I * 2\pi f * (L_f + L_g) = 10\% de \quad (\text{II.7})$$

D'où :

$$L_f + L_g = \frac{0.1V}{(S/V) 2\pi f} \quad (\text{II.8})$$

La conception de la capacité de filtrage découle du fait que la variation maximale du facteur de puissance acceptable par le réseau est de 5 %. La capacité du filtre peut donc être calculée comme une multiplication de la capacité de base du système C_b .

$$C_f = 0.05 \times C_b \quad (\text{II.9})$$

La capacité de base C_b se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$C_b = \frac{P_n}{\omega_n V_r^2} \quad (\text{II.10})$$

La dernière étape de la conception est le contrôle de la fréquence de résonance du filtre. La fréquence de résonance doit être éloignée de la fréquence du réseau et doivent être au minimum égal à la moitié de la fréquence de commutation, car le filtre doit avoir une atténuation suffisante de la fréquence de découpage du convertisseur. La fréquence de résonance du filtre LCL peut être calculée comme suit :

$$f_{\text{res}} = \sqrt{\frac{(L_f+L_g)}{L_f L_g C_f}} \quad (\text{II.11})$$

La plage de fréquences de résonance du filtre LCL doit satisfaire la condition de l'équation suivante :

$$10f_r \leq f_{\text{res}} \leq f_s \quad (\text{II.12})$$

Afin de réduire les oscillations et les états instables du filtre, il convient d'ajouter le condensateur avec une résistance connectée en série. Cette solution est parfois appelée « amortissement passif ». C'est simple et fiable, mais l'inconvénient c'est elle va augmenter les pertes de chaleur dans le système et cela diminue considérablement l'efficacité du filtre. La valeur de la résistance d'amortissement peut être calculée comme suit :

3.4. Modélisation de la synchronisation au réseau

Il convient de noter que le courant extrait du générateur photovoltaïque et qui est injecté doit être synchronisé avec la tension réseau, conformément aux normes en vigueur [18]. Par conséquent, la synchronisation au réseau est une tâche essentielle de surveillance du réseau, contribuant fortement aux performances dynamiques et à la stabilité de l'ensemble du système de contrôle. La synchronisation du réseau est même difficile dans les systèmes monophasés, car une seule variable (la tension réseau) peut être utilisée pour la synchronisation.

Il y'a plusieurs méthodes pour extraire les informations sur la tension du réseau comme la méthode du passage à zéro, la méthode de filtrage de la tension du réseau et les techniques de boucle à verrouillage de phase (PLL), qui sont des solutions importantes.

La Figure. 4 illustre la structure du système de synchronisation basé sur une boucle à verrouillage de phase (PLL). On peut observer que le système PLL comprend un détecteur de phase (PD), destiné à détecter la différence de phase, un filtre de boucle basé sur un PI (PI-LF) pour lisser la fréquence de sortie, et enfin un oscillateur commandé en tension (VCO). En conséquence, la fonction de transfert du système PLL [8] peut être obtenue comme :

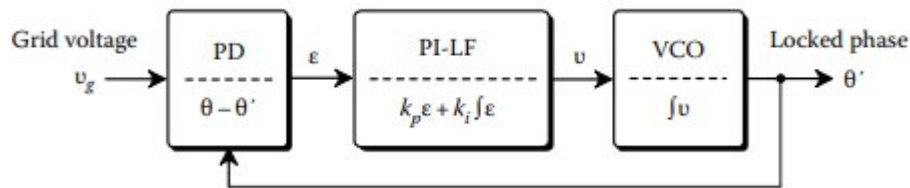


FIGURE 4. STRUCTURE DE BASE D'UN SYSTÈME PLL, OÙ $V_G = V_{GM} \cos(\theta)$ AVEC θ ÉTANT LA PHASE DE LA TENSION DU RÉSEAU ET θ' EST LA PHASE DE SORTIE (VERROUILLÉE).

$$G_{pll}(s) = \frac{\theta'(s)}{\theta(s)} = \frac{k_p s + k_i}{s^2 + k_p s + k_i} \quad (\text{II.13})$$

Il s'agit d'un système typique du second ordre, où k_p et k_i sont respectivement les gains proportionnel et intégral du PI-LF. On obtient ensuite respectivement le rapport d'amortissement ζ et la fréquence naturelle non amortie ω_n correspondants.

$$\zeta = \frac{k_p}{2\sqrt{k_i}} \text{ and } \omega_n = \sqrt{k_i} \quad (\text{II.14})$$

Ce paramètre permet d'ajuster les paramètres PI-LF en fonction du temps de stabilisation souhaité et du dépassement résultant.

3.5. Modélisation de l'onduleur PUC5

L'onduleur Packed U-Cell à 5 niveaux (PUC5) est une topologie d'onduleur multination conçu pour générer une forme d'onde de tension de sortie à cinq niveaux avec une qualité d'énergie élevée, une faible distorsion harmonique et un équilibrage efficace de la tension. Il est particulièrement remarquable pour sa stratégie de contrôle simple et son nombre réduit de composants par rapport aux autres onduleurs multi-niveaux, ce qui le rend adapté aux applications industrielles et d'énergie renouvelable.

La structure de l'onduleur PUC5 est illustrée à la figure 5. Il est composé de six commutateurs actifs et de deux liaisons DC. Chaque paire de commutateurs (S_1 et S_4 , S_2 et S_5 , S_3 et S_6) fonctionne de manière complémentaire. Chacun des deux commutateurs est connecté à un bus DC en tant que cellule U, et ces cellules constituent l'ensemble du convertisseur PUC.

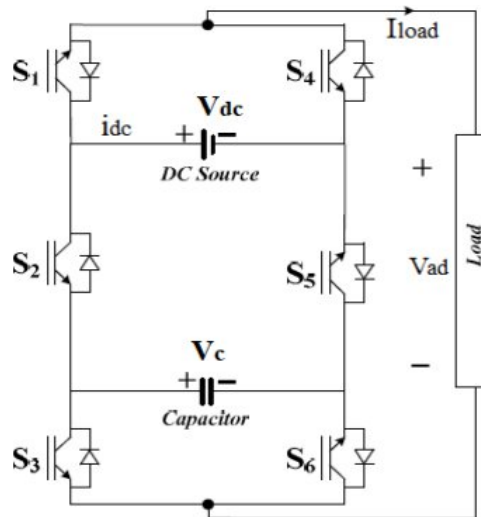


FIGURE 5. TOPOLOGIE PUC5

TABEAU 1. ÉTATS DE TENSION DU CONDENSATEUR PUC5.

Etat	S1	S2	S3	Tension de sortie (V_{ad})	Tension du condensateur
1	0	0	0	V_{dc}	Sans effet
2	0	0	1	$V_{dc}-V_c$	Charge
3	0	1	0	V_c	Décharge
4	0	1	1	0	Sans effet
5	1	0	0	0	Sans effet
6	1	0	1	$-V_{dc}$	Décharge
7	1	1	0	$-V_{dc}+V_c$	Charge
8	1	1	1	$-V_c$	Sans effet

3.6. Le fonctionnement d'un onduleur PUC5

Si un seul condensateur est utilisé, sept niveaux de tension de sortie peuvent être atteints. Ce qui permet d'obtenir cinq ou sept niveaux de tension à la sortie de l'onduleur. Dans ce cas, seuls six commutateurs à semi-conducteurs de puissance sont nécessaires à l'étage de puissance.

Dans la topologie MLI du PUC varie en fonction du rapport entre la tension du condensateur auxiliaire (V_c) et la tension de la source DC (V_{dc}). Le fonctionnement à cinq niveaux (PUC5) est obtenu en réglant la tension du condensateur auxiliaire (V_c) à la moitié de la tension d'entrée (V_{dc}) [23]. Les niveaux de tension de sortie et les états de commutation correspondants de PUC5 est présentés dans le tableau 1. Selon les cas de commutation, les figures 6(1) à (8) illustrent le courant circulant pour chaque cas, les commutateurs S_4 , S_5 et S_6 et S_1 , S_2 et S_3 sont respectivement complémentaires.

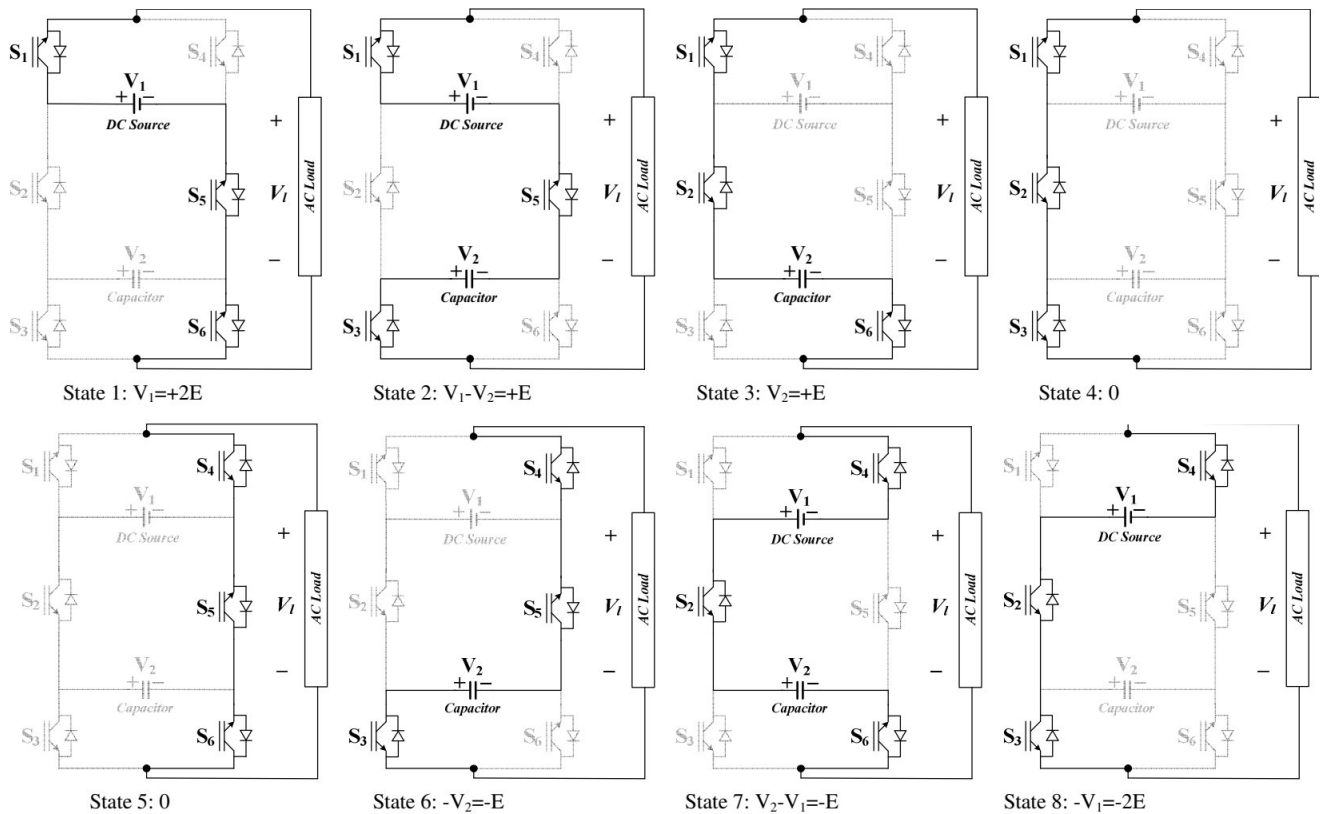


FIGURE 6. LE COURANT CIRCULANT POUR CHAQUE CAS .

Il est clair que les 8 états de commutation existants peuvent fournir différents chemins pour le courant circulant dans le système, y compris les sources de courant continu et la charge, mais en considérant le tableau 1, on observe que l'onduleur PUC a la capacité de fonctionner comme un onduleur à 5 niveaux en supposant que $V_1=2V_2=2E$, donc la forme

d'onde de tension de sortie à 5 niveaux comprend les niveaux 0, $\pm E$, $\pm 2E$. Dans ce cas, la tension du condensateur (V_C) est maintenue constante à la moitié de l'amplitude de la source de courant continu (V_{dc}). Le tableau 1 montre que six états de commutation sont disponibles pour produire trois niveaux, dont $-E$, 0 et $+E$, ce qui signifie qu'il existe des états de commutation redondants qui peuvent aider à trouver différents chemins pour faire circuler le courant à travers la charge.

Sur la base de la figure 6, il est clair que dans les états où la source de courant continu et le condensateur sont connectés en série avec la charge, le condensateur est chargé (états 2 & 7). D'autre part, sur certains trajets où le condensateur alimente la charge seule, il se décharge (états 3 & 6). Enfin, pour le reste des états, la tension du condensateur reste inchangée car il n'est connecté ni à la source de courant continu ni à la charge. Le tableau 1 indique les états de charge et de décharge du condensateur.

En ce qui concerne les états de charge (2 et 7), il est clair que le condensateur est chargé lorsqu'il est connecté en série à la source de courant continu et à la charge, et que la tension de la charge doit être égale à $\pm E$. Les équations suivantes peuvent donc être écrites :

$$V_1 = V_2 + V_1 \Rightarrow \begin{cases} 2E = V_2 + E \\ -2E = V_2 - E \end{cases} \Rightarrow |V_2| = E \quad (II.15)$$

Alors que la tension de la source est fixée à $2E$, le condensateur doit être chargé jusqu'à E pour produire la tension de charge de sortie appropriée. Cette condition ainsi que le temps de charge (décharge) obligent le condensateur à se charger jusqu'à la moitié de la valeur de la tension de la source.

Afin d'avoir des temps de charge et de décharge équivalents dans une période, l'état de commutation 2 est choisi pour connecter la source de courant continu au condensateur et le charger, tandis que d'autre part, le condensateur sera déchargé dans un demi-cycle négatif afin d'éviter la surcharge grâce à l'état de commutation 6 qui connecte le condensateur directement à la charge. La procédure mentionnée est indépendante de la fréquence de commutation et de la fréquence de la tension de sortie. Le temps de charge et de décharge du condensateur dépend uniquement de la valeur de la charge. Il a un effet direct sur la taille du condensateur qui doit être prise en compte dans le calcul des paramètres du système pour la conception d'une application spécifique. Les charges plus importantes nécessitent un condensateur plus petit dans la liaison DC et vice versa.

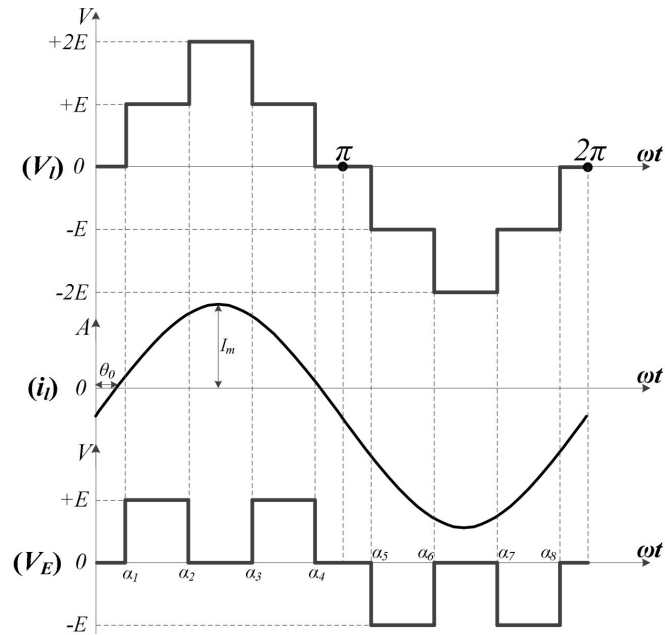


FIGURE 7. FORME D'ONDE DE LA TENSION DE SORTIE D'UN ONDULEUR À CINQ NIVEAU

Cette procédure d'auto-équilibrage de la tension peut être prouvée mathématiquement sur la base des relations énergétiques du condensateur. La Figure 7 montre un cycle des formes d'ondes de tension et de courant de sortie typiques de l'onduleur PUC5. V_E est une partie de la tension de sortie générée par le condensateur (+E ou -E), qu'il soit connecté à la charge seule en tant que chemin de décharge ou en série avec la source DC en tant que mécanisme de charge.

4. Modélisation de la commande

L'objectif du système que nous proposons dans ce travail est de pouvoir injecté le courant issu d'un générateur photovoltaïque dans le réseau électrique, comme décrit dans les précédents paragraphes nous utilisant essentiellement un hacheur de type boost, ainsi qu'onduleur à 5 niveaux de type PUC5. Ces éléments de puissance nécessitent des algorithmes adaptés afin de maintenir le fonctionnement, la stabilité et les performances du système.

Les éléments de commande que nous allons utiliser sont :

- Un algorithme MPPT pour l'extraction de la puissance maximale du générateur photovoltaïque,
- La régulation PI pour le maintien de la tension de référence sur le bus continu,
- La commande MPC pour l'injection du courant dans le réseau électrique.

4.1. Algorithme de recherche du point de puissance maximale « MPPT »

Les techniques MPPT sont l'une des tâches essentielles des systèmes de conversion photovoltaïques. Compte tenu des caractéristiques non linéaires courant-tension des panneaux photovoltaïques, la puissance maximale fournie par le réseau photovoltaïque se situe à un point de fonctionnement variable appelé point de puissance maximale (MPP). Il existe un grand nombre de publications traitant des différentes stratégies de contrôle MPPT, où la majorité des convertisseurs PV sont capables d'extraire la puissance disponible de l'installation PV avec des performances plus au moins efficace et sur une gamme variée d'irradiation et de température.

En réalité les techniques MPPT sont des dispositifs de puissance de type hacheur ou onduleur commandé par un algorithme MPPT (voir Figure 8), ceci afin de diriger le point de fonctionnement du couple GPV/Charge vers le point de puissance maximale de la caractéristique du GPV.

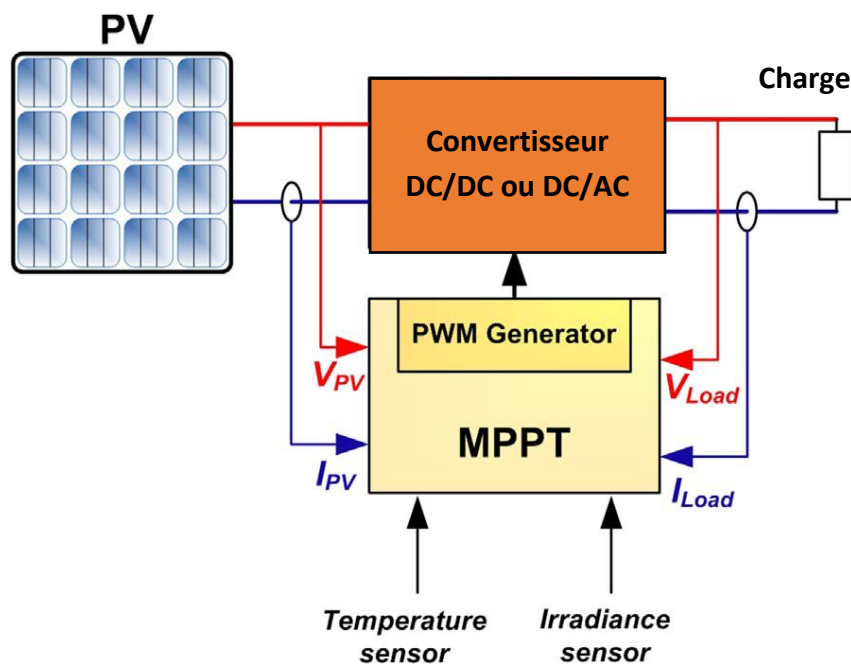


FIGURE 8. SCHÉMA D'ADAPTATION ENTRE UN GPV ET UNE CHARGE

Les algorithmes MPPT les plus fréquemment appliqués sont des méthodes d'escalade, telles que la perturbation et l'observation (P&O), et son implémentation alternative (avec un comportement identique), la conductance incrémentale. La technique P&O est l'algorithme MPPT le plus populaire pour les applications industrielles en raison du bon équilibre entre la complexité, la précision et la fiabilité.

La méthode P&O est basée sur la propriété selon laquelle la dérivée de la caractéristique puissance-tension du panneau PV est positive du côté gauche et négative du côté droit (voir figure 9), tandis qu'au MPP, il est établi que $\Delta P_{pv} > 0$. Pendant l'exécution du processus P&O MPPT, la tension et le courant de sortie du panneau PV sont échantillonnés périodiquement à des pas d'échantillonnage consécutifs afin de calculer la puissance de sortie correspondante et la dérivée de la puissance par rapport à la tension. Le processus MPPT est réalisé en ajustant le signal de référence du contrôleur PWM du convertisseur de puissance DC/DC. La figure 10 présente l'organigramme du MPPT P&O [19].

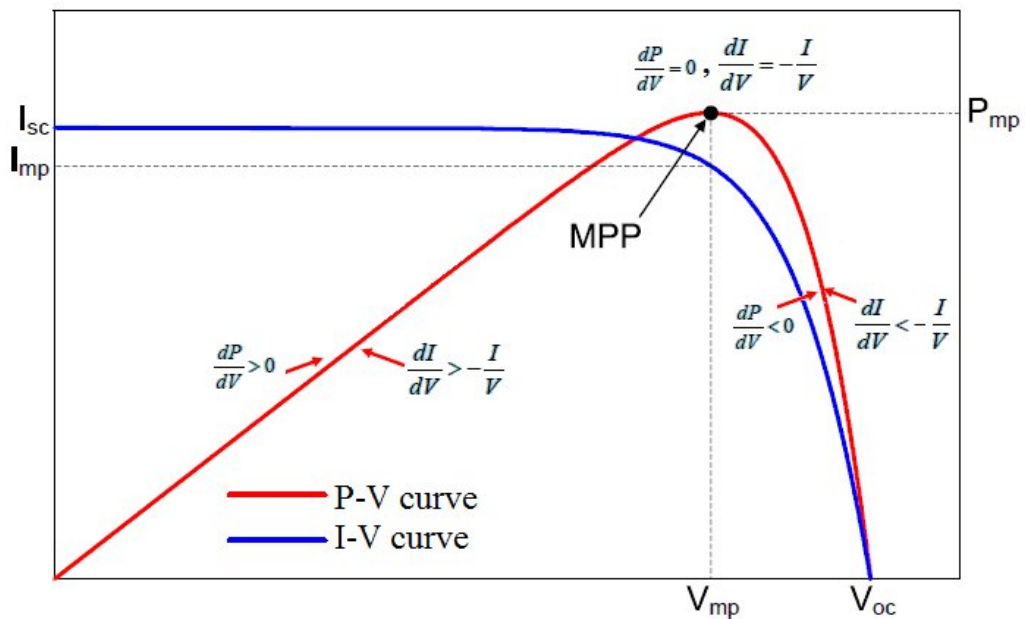


FIGURE 9. SIGNE DE DP/DV À DIFFÉRENTES POSITIONS DE LA CARACTÉRISTIQUE D'UN GPV

La Figure 10 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

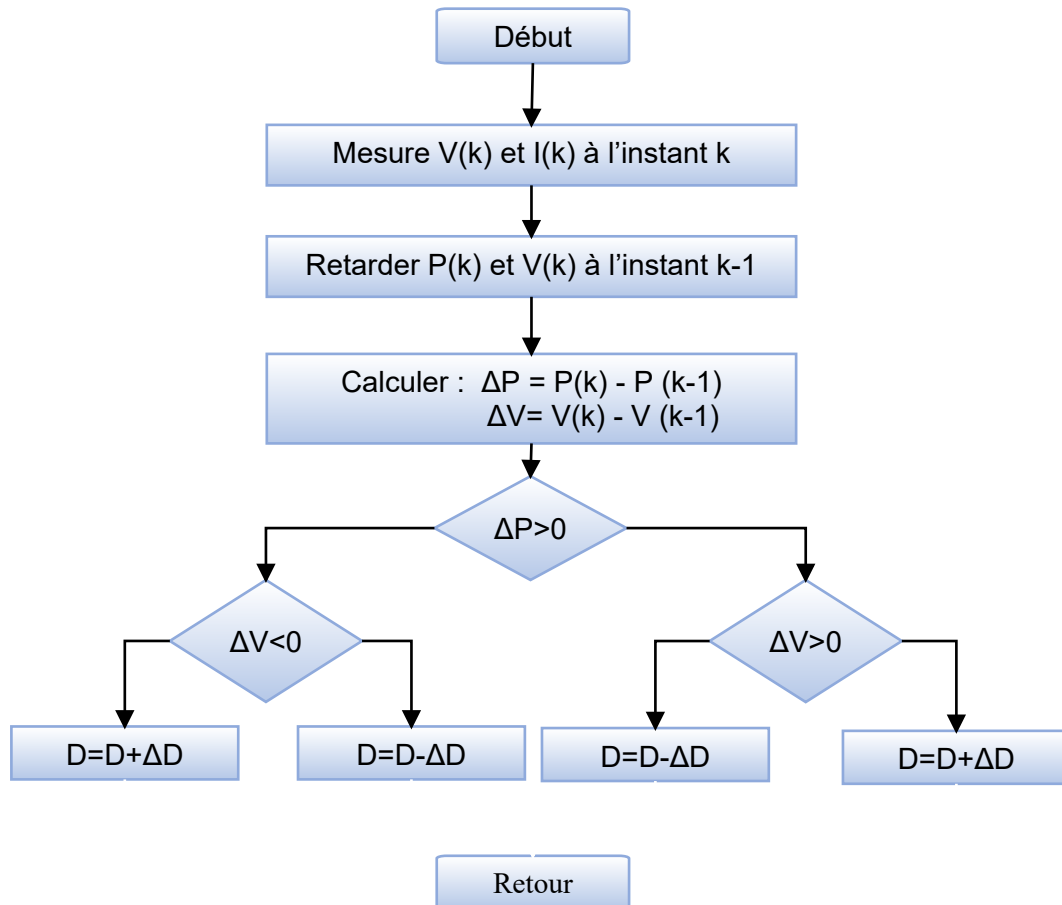


FIGURE 10. : ALGORITHME DE POURSUITE DU POINT MAXIMUM DE PUISSANCE MPPT/P&O

4.2. Régulation de la tension du bus continu

Le bus continu dans un onduleur photovoltaïque joue un rôle central en assurant la liaison entre la production d'énergie solaire en courant continu (DC) et sa conversion en courant alternatif (AC) injecté dans le réseau. Il sert de point d'interface et de stabilisation, en maintenant une tension continue relativement constante malgré les variations de la production photovoltaïque. Cette tension stable permet à l'onduleur de générer une tension alternative propre et synchronisée avec le réseau. Le bus continu intègre est principalement constitué de condensateurs pour filtrer les ondulations et stocker temporairement l'énergie, assurant ainsi pour l'onduleur une alimentation fluide et stable.

Pour maintenir un fonctionnement efficace pour garantir une tension du condensateur du bus continu adéquate, un contrôleur proportionnel-intégral (PI) est utilisé pour réduire la fluctuation de tension dans la liaison DC et réguler cette à une valeur de référence convenable. La Figure 11 montre le schéma du contrôleur PI, tel que l'entrée est l'erreur entre la tension du condensateur du bus continu V_{dc} et la valeur de référence V_{dc_ref} , la sortie du régulateur est l'amplitude du courant de référence du réseau I_{g_ref} [20].

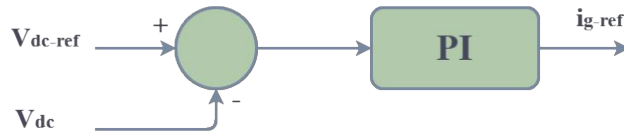


FIGURE 11. CONTRÔLEUR PI POUR LA RÉGULATION DE LA TENSION DU BUS CONTINU.

Le régulateur PI ($GPI(s)$) pour la tension du bus continu peut être exprimé comme suit :

$$GPI(s) = kp + \frac{ki}{s} \quad (II.16)$$

Où k_p et k_i sont respectivement le gain proportionnel et le gain intégral.

4.3. Stratégie de commande MPC (model prédictive control) utilisée

Il est important de mentionner que le principal défi du contrôle du PUC5 est de suivre au mieux la référence de courant du réseau tout en maintenant la tension du condensateur à sa valeur de référence. Aussi, il convient également de noter que les variables contrôlées (courant du réseau et tensions des condensateurs) sont interdépendantes et que toute variation de l'une d'elles peut affecter les autres. Cela signifie que si le PUC contrôle correctement l'une des variables ci-dessus, il peut entraîner une dégradation du contrôle des autres.

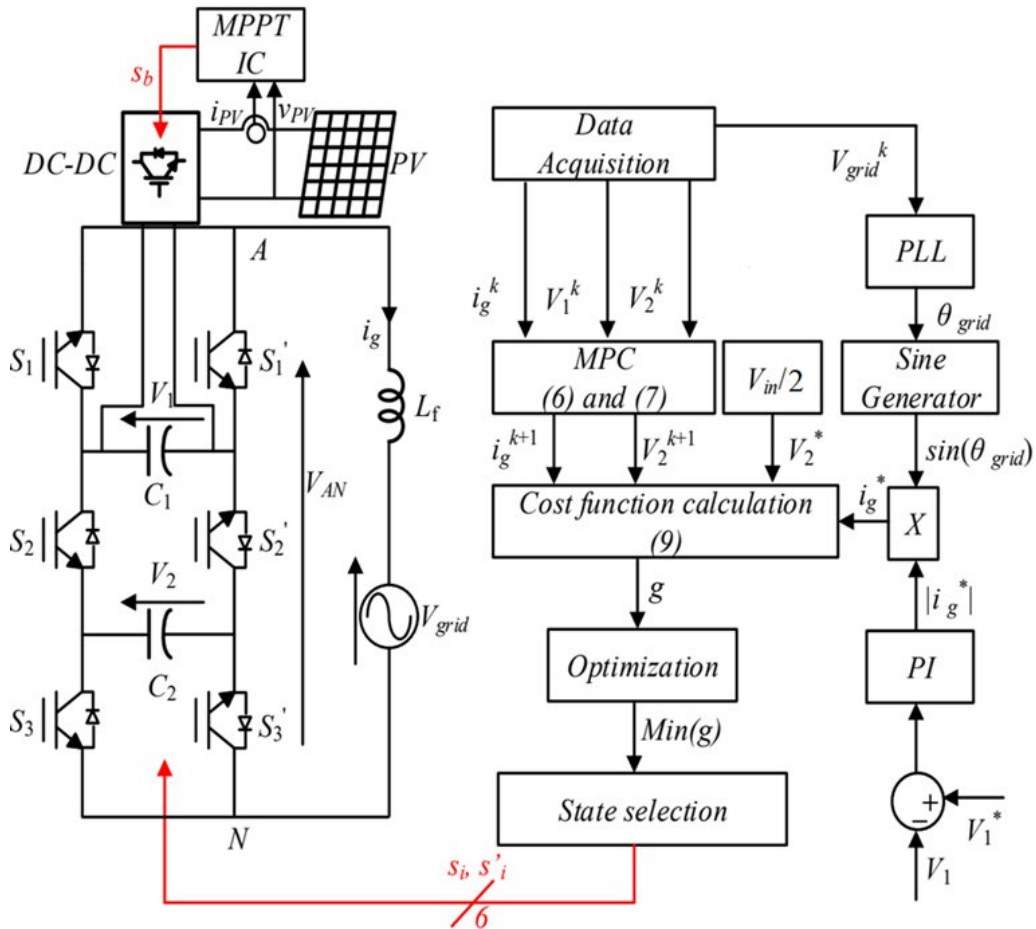


FIGURE 12. CONTROLLEUR PROPOSÉ POUR LE PUC5.

L'utilisation de la commande MPC est une façon de contrôler toute la dynamique complexe du PUC5. Grâce à ses performances élevées et à sa grande flexibilité, le MPC a suscité beaucoup d'intérêt et est actuellement utilisé dans divers problèmes de contrôle technique [22]. Les composants principaux d'un MPC sont plus ou moins les mêmes, c'est-à-dire :

- 1) Modèle de prédiction du processus,
- 2) Fonction objective,
- 3) Algorithme d'optimisation.

4.4. Algorithme MPC

Le modèle général d'un onduleur de couplage au réseau électrique peut être écrit en termes d'équations dynamiques suivante :

$$(1 - D)i_{pV}(t) - C_1 \frac{dV_1(t)}{dt} = (s_2 - s_1) i_g(t) \quad (\text{II.17})$$

$$C_2 \frac{dV_2(t)}{dt} = (s_3 - s_2) i_g(t) \quad (\text{II.18})$$

$$L_f \frac{di_g(t)}{dt} = (s_1 - s_2) V_1(t) + (s_2 - s_3) V_2(t) - V_{grid}(t) \quad (\text{II.19})$$

Où :

V_1, V_2 : Sont les tensions des condensateurs

s_1 : Les états de commutation (0 : on, 1 : off)
 $\sim s_3$

i_{pV} : Est le courant photovoltaïque

i_g : Est le courant du réseau

V_{grid} : Est la tension du réseau

L_f : Est l'inductance de filtrage

C_1, C_2 : Sont les condensateurs des cellules du PUC

D : Rapport cyclique du convertisseur Boost

L'objectif du contrôleur est de réguler le courant de la ligne de réseau par le biais d'un algorithme prédictif. Pour ces raisons, un modèle à temps discret doit être pris en considération. Avec T_s est le temps d'échantillonnage du système utilisé dans l'approximation d'Euler-Forward. Ainsi, la dérivée du courant peut être écrite comme suit :

$$\frac{di_g(t)}{dt} \approx \frac{i_g(k+1) - i_g(k)}{T_s} \quad (\text{II.20})$$

Le courant de grille à temps discret peut alors être écrit dans l'équation suivant :

$$V_2(k+1) = V_2(k) + \frac{T_s}{C_2}(s_3 - s_2)i_g(k) \quad (\text{II.21})$$

$$i_g(k+1) = i_g(k) + \frac{T_s}{L_f}[(s_1 - s_2)V_1(k) + (s_2 - s_3)V_2(k) - V_g(k)] \quad (\text{II.22})$$

Avec:

$$V_{inv} = (s_1 - s_2)V_1(k) + (s_2 - s_3)V_2(k) \quad (\text{II.23})$$

Par conséquent, en calculant la formule générale de ce vecteur en termes de paramètres du système et en la donnant à chaque itération, on s'assure que la fonction de coût à chaque itération est à son minimum et que les erreurs entre les variables d'état et leurs références sont nulles. Le courant du réseau prédit monophasé peut être écrit comme suit :

$$i_g^p(k+1) = i_g(k) + \frac{T_s}{L_f}[V_{inv}(k)] \quad (\text{II.22})$$

L'algorithme prédictif proposé ne régule que le courant, de sorte que la fonction de coût peut s'écrire comme l'équation II.24, où i_g^* est l'intensité de référence du courant du réseau. En outre, il convient de noter qu'il n'est pas nécessaire de définir un facteur de pondération puisqu'un état est contrôlé grâce à l'équilibrage de la tension du condensateur sans capteur.

$$G = (i_g^* - i_g)^2 \quad (\text{II.25})$$

En substituant l'équation X dans l'équation Y, on obtient l'équation suivante :

$$G = \left(i_g^*(k+1) - i_g(k) - \frac{T_s}{L_f}[V_{inv}(k) - v_g(k)] \right)^2 \quad (\text{II.26})$$

L'objectif de l'algorithme est de générer la tension de sortie optimale V_{inv} qui peut être fournie à n'importe quel générateur PWM. La tâche consiste suivante :

$$\frac{\partial G}{\partial V_{inv}} = 0 \quad (\text{II.27})$$

En résolvant cette équation nous avons :

$$V_{inv,min} = -\frac{L_g}{T_s}A \quad (\text{II.28})$$

$$A = \left(1 - \frac{R_g T_S}{L_g}\right) i_g(k) + \frac{T_S}{L_g} v_g(k) - (i_g^*(k+1)) \quad (\text{II.29})$$

Ainsi, une génération de tension minimale est garantie. Un schéma général du contrôleur MPC proposé est présenté à la figure 12. A chaque itération, le contrôleur lit le courant et la tension du réseau mesurés par les capteurs, puis calcule le terme A en fonction de la référence de courant souhaitée. Il génère le vecteur $V_{inv, min}$ à l'étape finale, qui est donné dans l'équation (II.29) pour ensuite générer les vecteurs des états de la commutation S_1, S_2, S_3

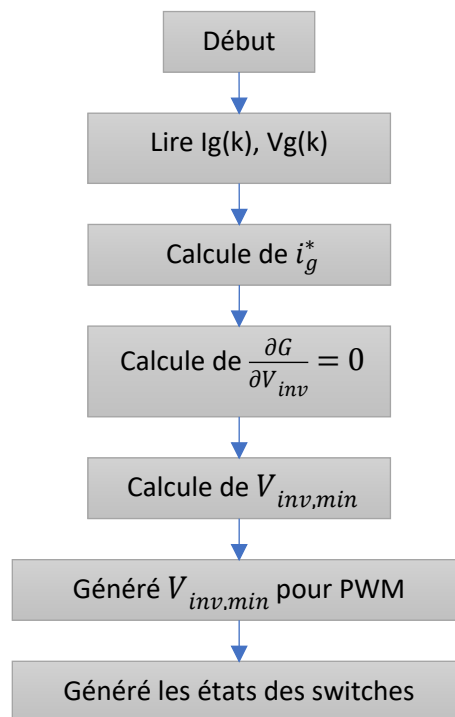


FIGURE 13. ORGANIGRAMME DU CALCUL DU VECTEUR DE TENSION

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons détaillé les différents éléments du système étudié qui est constitué d'un générateur photovoltaïques connecté au réseau à travers 2 étages de puissance, un hacheur de type boost qui permet d'extraire le maximum de puissance du GPV ainsi qu'onduleur PUC à cinq niveaux. Ces éléments sont décrits dans ce chapitre ainsi que les éléments de commande utilisée, qui permettent d'injecter le courant dans le réseau monophasé en synchronisation avec le courant du réseau.

1.	Introduction	17
2.	Système proposé	17
3.	Modélisation du système	18
3.1.	Générateur photovoltaïque	18
3.2.	Modélisation du convertisseur Boost	19
3.3.	Modélisation du filtre LCL.....	21
3.4.	Modélisation de la synchronisation au réseau	23
3.5.	Modélisation de l'onduleur PUC5.....	24
3.6.	Le fonctionnement d'un onduleur PUC5.....	25
4.	Modélisation de la commande	27
4.1.	Algorithme de recherche du point de puissance maximale« MPPT ».....	28
4.2.	Régulation de la tension du bus continu.....	30
4.3.	Stratégie de commande MPC (model prédictive control) utilisée	31
4.4.	Algorithme MPC.....	32
5.	Conclusion	34

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES CONNECTES AU RESEAU

1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques (PV) connectés au réseau électrique représentent une solution moderne et efficace pour la production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Ces systèmes exploitent des panneaux photovoltaïques pour capter l'énergie solaire et la convertir en électricité. Cette électricité est ensuite transformée en courant alternatif compatible avec le réseau électrique via un onduleur, permettant ainsi l'injection directe de l'énergie produite dans le réseau national ou local.

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

Dans notre travail, nous nous intéressons aux systèmes PV raccordés au réseau monophasé. Et dans ce chapitre on s'intéresse principalement aux principales topologies de ces onduleurs, et nous présenterons aussi les principales caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

2. Le générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque constitue l'élément fondamental d'un générateur électrique. Elle délivre une puissance très faible pour la majorité des applications domestiques ou industrielles. L'assemblage d'un nombre important de cellules est nécessaire pour une exploitation pratique de cette puissance. Les cellules sont triées afin qu'elles aient toutes à peu près les mêmes caractéristiques, puis assemblées en série, parallèle, ou en série-parallèle pour constituer le générateur électrique, appelé aussi le module photovoltaïque.

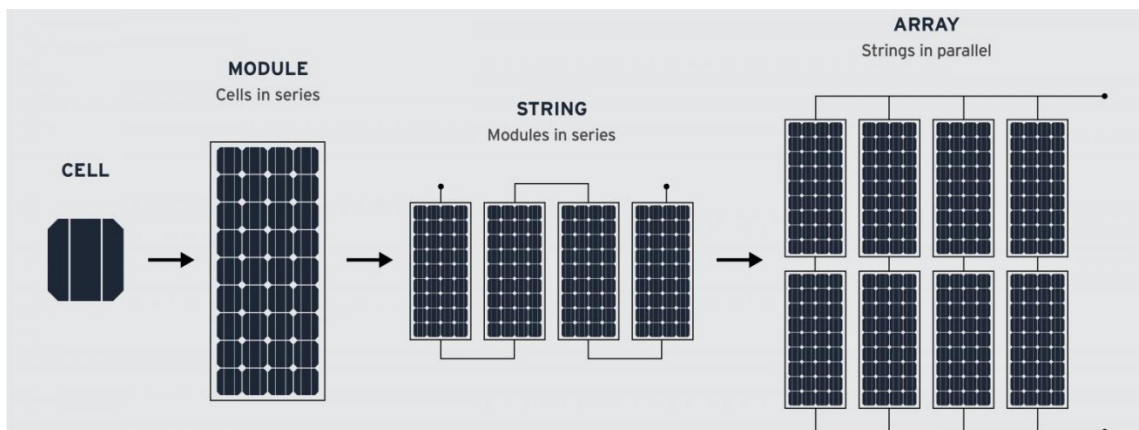


FIGURE 1. COMPOSANTES D'UN CHAMP DE MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

2.1. Association série des cellules PV

La tension délivrée par une cellule photovoltaïque est limitée à la tension du gap du semi-conducteur utilisé, c'est pour cela qu'on connecte plusieurs cellules en série afin d'augmenter la tension de sortie. Ces cellules sont traversées par le même courant et la tension du générateur est proportionnelle à leur nombre [1].

$$\text{En termes d'équations on aura : } I_{SCC} = I_{CC} \text{ et } V_{SCO} = N_S \times V_{CO} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$V_{c0} \cdot N_S$: Tension aux bornes de N_S cellules en série

N_S : Nombre de cellules en série

V_{c0} : Tension aux bornes d'une seule cellule

I_{SCC} : Courant traversant une cellule.

$I_{SCC} \cdot N_S$: Courant traversant N_S cellules en série

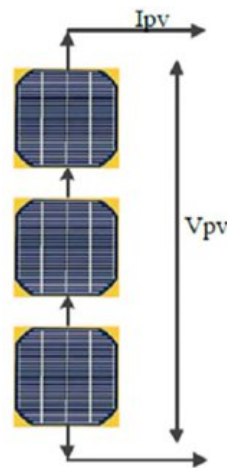


FIGURE 2. SCHÉMA DE 3 CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ASSOCIÉES EN SÉRIE.

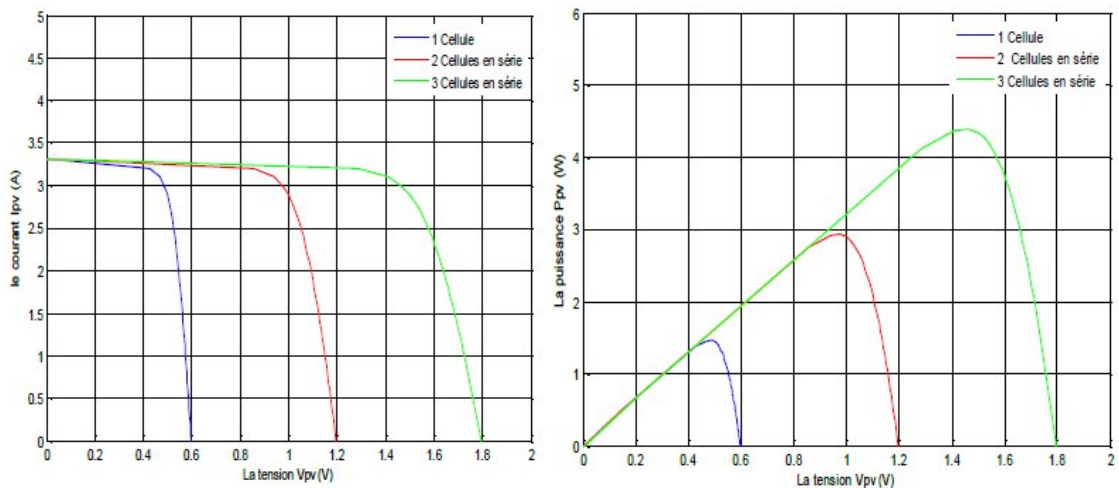


FIGURE 3. CARACTÉRISTIQUE RÉSUULTANTE DU REGROUPEMENT DE N_S CELLULES EN SÉRIE.

La caractéristique I-V représentée par la figure 3 du groupement série est donc obtenue par addition des tensions à un courant donné.

2.2. L'association en parallèle des cellules

Pour l'association en parallèle, on doit vérifier que les tensions des photopiles sont identiques, et le courant obtenu représente le produit entre le courant de la cellule élémentaire et le nombre de ces cellules pour une tension qui reste la même.

$$I_{PCC} = N_P \times I_{CC} \text{ et } V_{PCO} = V_{CO} \quad (1.2)$$

Avec :

$I_{PCC} \cdot N_P$: Courant traversant N_P cellules en parallèle

N_P : Nombre de cellules en parallèle

$V_{CO} \cdot N_P$: Tension aux bornes de N_P cellules en parallèle

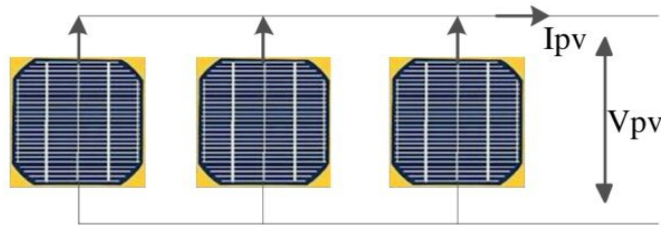


FIGURE 4. SCHÉMA DE 3 CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ASSOCIÉES EN PARALLÈLE.

La caractéristique suivante représente le groupement parallèle. On voit bien que le courant est proportionnel au nombre de cellule.

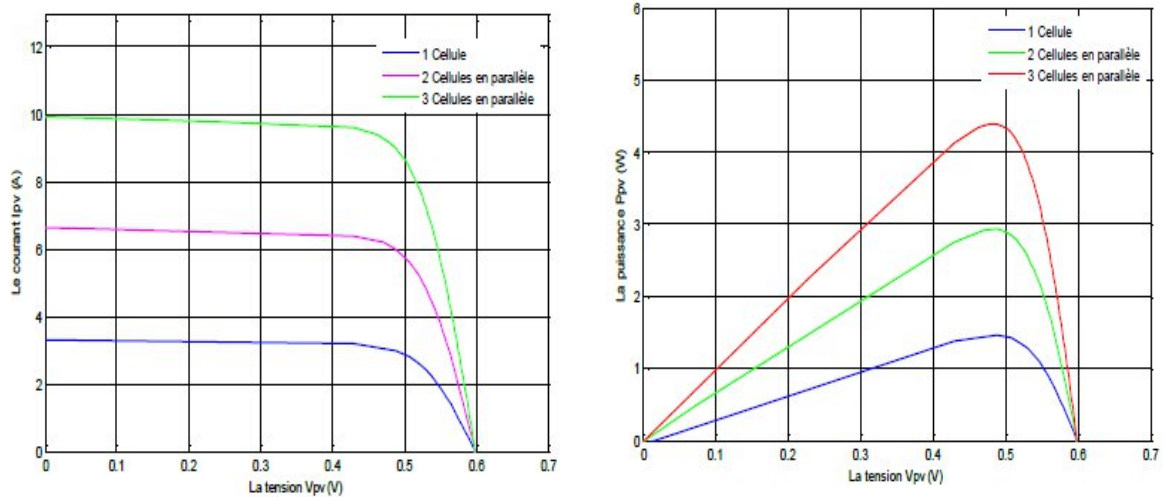


FIGURE 5. CARACTÉRISTIQUE RÉSUlTANTE DU REGROUPEMENT DE N_P CELLULES EN PARALLÈLE

3. Types d'installations photovoltaïques

Il existe deux types d'installation photovoltaïque selon qu'elle fonctionne de manière autonome ou qu'elle soit raccordée à un réseau public de distribution d'électricité.

3.1. Installations autonomes

Les installations autonomes sont des installations qui produisent de l'électricité pour un bâtiment ou un autre consommateur qui n'est pas relié au réseau. La plupart de ces installations alimentent des sites éloignés de tout réseau public. Elles comprennent des étages d'adaptation afin d'adapter la puissance aux besoins du consommateur. Ces étages d'adaptations sont constitués d'éléments suivant :

- **Hacheur** : il permet d'adapter le niveau des tensions continues et d'optimiser la puissance tirée du générateur PV.
- **Onduleur** : il permet de transformer l'énergie électrique d'une forme continue vers une forme alternative.
- **Batteries** : elle permet le stockage de l'énergie électrique pour subvenir aux besoins du consommateur à cause des problèmes d'intermittence de l'énergie PV.

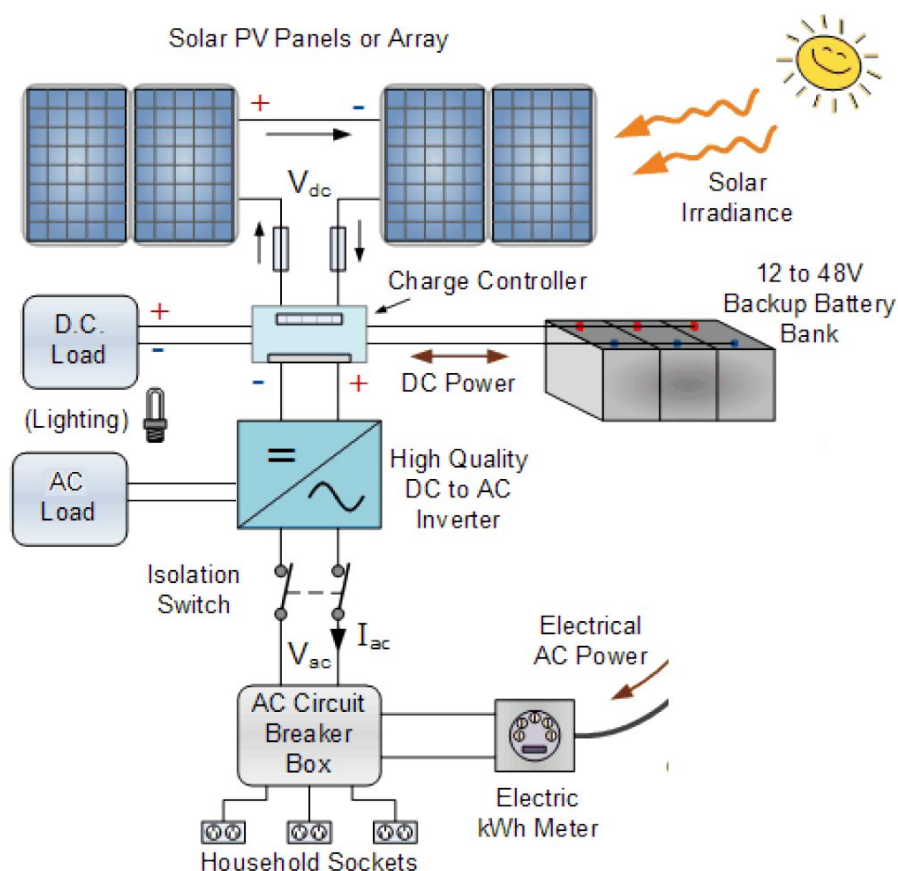


FIGURE 6. INSTALLATION PV AUTONOME.

3.2. Installations raccordées aux réseaux

Une installation photovoltaïque raccordée au réseau permet de produire de l'électricité pour l'envoyer sur le réseau électrique nationale. Ainsi la totalité de la production électrique est utilisée par les consommateurs proches. Ces installations produisent de l'électricité qui peut être vendue en totalité ou en partie. Ainsi, on distingue deux modes.

➤ **Injection de la totalité de la production au réseau**

L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est directement injectée dans le réseau électrique tout au long des périodes de production photovoltaïque.

➤ **Injection du surplus de la production au réseau**

L'énergie produite par les modules est directement consommée par les charges. Le surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté dans le réseau.

L'énergie produite par le photovoltaïque est de nature continue ce qui n'est pas approprié dans le cas où on veut raccorder ce dernier avec le réseau de distribution. Pour cela il faut concevoir un système capable de transformer l'énergie continue en énergie alternatif, cette conversion se passe par le biais d'un onduleur afin de contrôler l'amplitude, la fréquence et la phase du courant injecté dans le réseau.

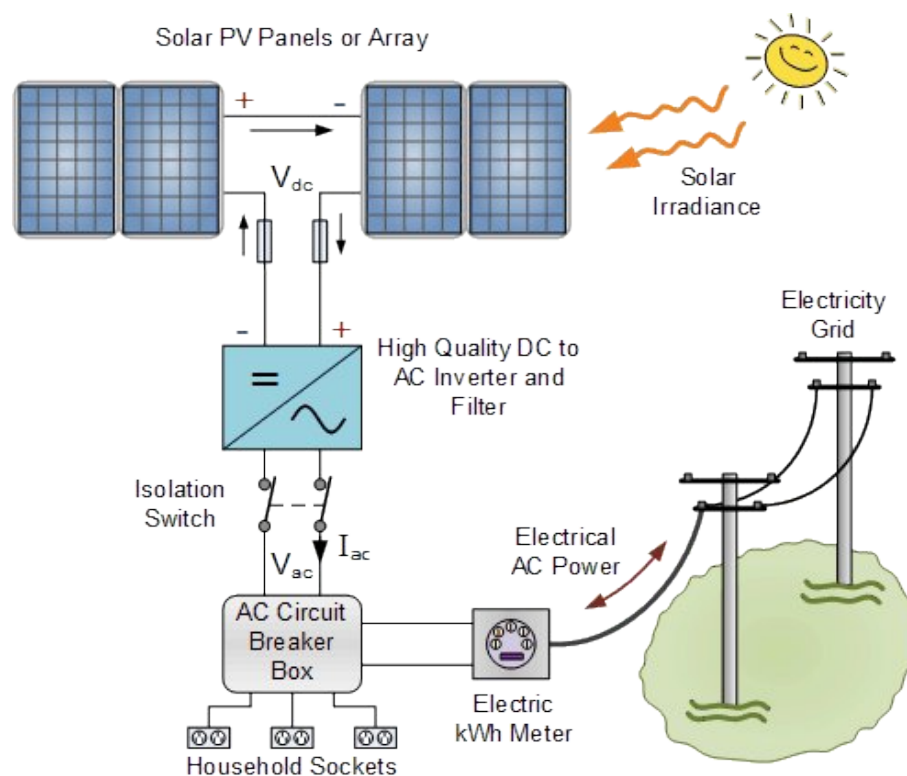


FIGURE 7. INSTALLATIONS RACCORDÉES AU RÉSEAU.

4. Exigences et défis des systèmes PV raccordés au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau se développent à un rythme très rapide et joueront bientôt un rôle majeur dans la production d'électricité dans certaines régions [16]. Parallèlement, les exigences en systèmes photovoltaïques, comme le montre la Figure 8 augmente plus que jamais.

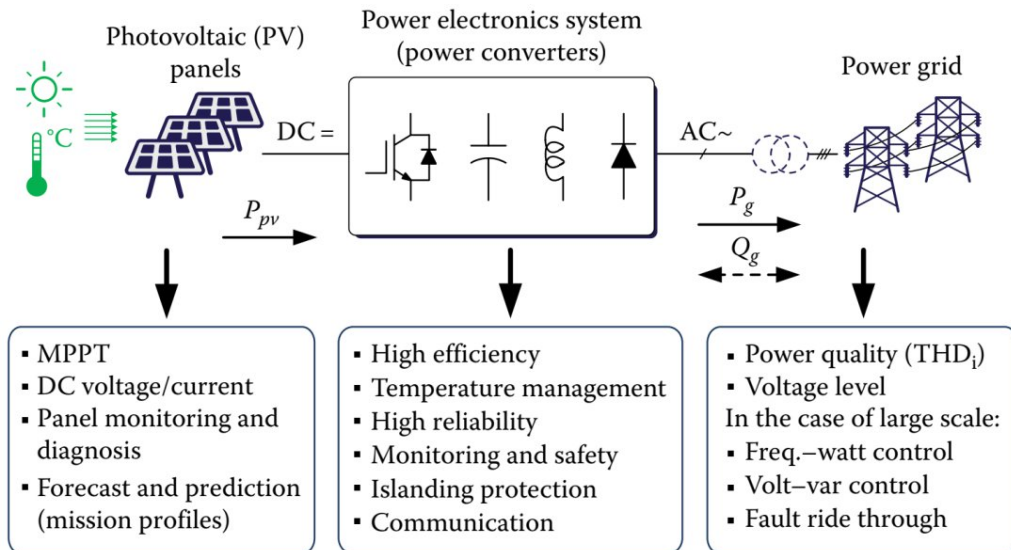


FIGURE 8. EXIGENCES (DÉFIS) D'UN SYSTÈME PV CONNECTÉ AU RÉSEAU BASÉ SUR DES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE.

Les exigences des systèmes photovoltaïques sont assez spécifiques à différents niveaux. Côté photovoltaïque, la puissance de sortie des panneaux/chaînes photovoltaïques doit être maximisée, là où un convertisseur DC-DC est couramment utilisé, dans le cas d'un système photovoltaïque à deux étages. Ce phénomène est également appelé suivi du point de puissance maximale (MPPT). Dans ce cas, la tension continue (tension de liaison DC) doit être maintenue à une valeur souhaitable pour l'onduleur.

De plus, pour des raisons de sécurité (par exemple, en cas d'incendie), la surveillance et le diagnostic des panneaux doivent être améliorés côté photovoltaïque [7]. Côté réseau, une distorsion harmonique totale (THD) du courant de sortie doit généralement être atteinte (par exemple, inférieure à 5 % [8]) pour une bonne qualité d'énergie. Dans le cas de systèmes photovoltaïques de grande échelle et de puissances nominales plus élevées, les systèmes photovoltaïques ne doivent pas perturber la tension et la fréquence du réseau en fournissant des services auxiliaires (par exemple, la régulation de fréquence). Parallèlement, les systèmes photovoltaïques doivent aussi surmonter les défauts propres au réseau électrique.

La capacité de production d'énergie par unité de production étant relativement faible, mais le coût de l'énergie étant relativement élevé, il existe une forte demande en matière de rendement énergétique afin de réduire le coût de l'énergie photovoltaïque et d'optimiser le rendement énergétique. En matière de rendement, l'électronique de puissance (composants passifs inclus) est responsable de la majeure partie des pertes de puissance de l'ensemble du système photovoltaïque.

La technologie photovoltaïque sans transformateur en est un exemple, et les onduleurs photovoltaïques sans transformateur peuvent atteindre un rendement de conversion relativement élevé lorsque les transformateurs d'isolement sont retirés [11].

De plus, la fiabilité est essentielle dans les systèmes PV basés sur l'électronique de puissance, comme le montre également la figure 3. Ceci est motivé par l'allongement de la production totale d'énergie (durée de service), réduisant ainsi le coût de l'énergie [15], et l'exposition de ces installations aux conditions de fonctionnement dans divers types d'environnement naturel.

5. Technologies des convertisseurs de puissance pour les systèmes photovoltaïques en monophasé

Le travail présenté dans ce mémoire se concentre essentiellement sur la conception d'un système de conversion photovoltaïque connecté au réseau monophasé, de ce fait nous allons nous concentrer dans la suite de ce chapitre sur les différentes technologies des convertisseurs de puissance pour les systèmes photovoltaïques en monophasé

Il existe principalement cinq types de configuration [3] pour organiser et transférer l'énergie photovoltaïque au réseau, comme le montre la figure 9. Chaque configuration se compose d'une série de panneaux photovoltaïques ou de chaînes PV parallèles, ils sont reliés par des convertisseurs d'électronique de puissance (convertisseurs DC-DC et onduleurs DC-AC) en fonction de la tension de sortie des panneaux photovoltaïques ainsi que de la puissance.

Les principales configurations utilisées dans les centrales PV, sont celles qui utilisent un onduleur triphasé ou monophasé, ces configurations permettent d'injecter la puissance générée dans le réseau avec une grande efficacité et un moindre coût. Cependant, ces solutions sont sensibles aux défauts qui apparaissent dans le champ PV, telle que les défauts de mismatch ou

de point-chaud, c'est pour cette raison que les dispositifs MPPT sont de plutôt mis à l'extrémité de chaque chaîne PV, pour un meilleur rendement.

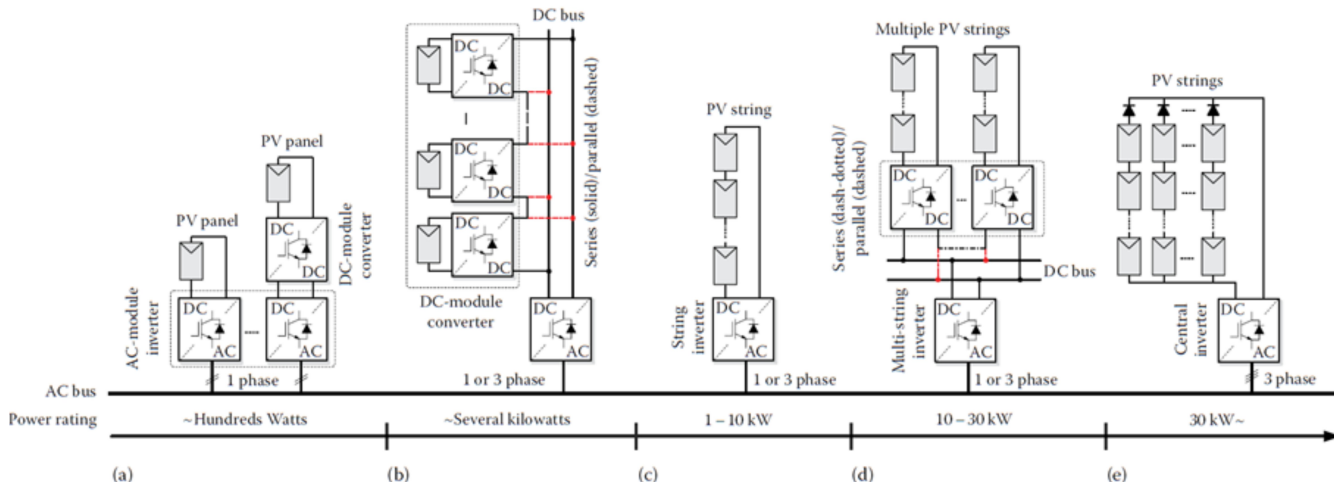


FIGURE 9. CONCEPTS DE SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES CONNECTÉS AU RÉSEAU.

Comme il est montré dans la figure 10(a) et 10(b) dans le système PV monophasé, traditionnellement, un transformateur d'isolement peut être adopté soit du côté du réseau en basse fréquence ou comme transformateur à haute fréquence dans les convertisseurs photovoltaïques. Ces deux technologies photovoltaïques connectées au réseau sont disponibles sur le marché avec une efficacité globale de 93-95% [16] Pour améliorer le rendement global des installations PV, des convertisseurs sans-transformateur ont été développé, ils seront discutés dans les prochains paragraphes.

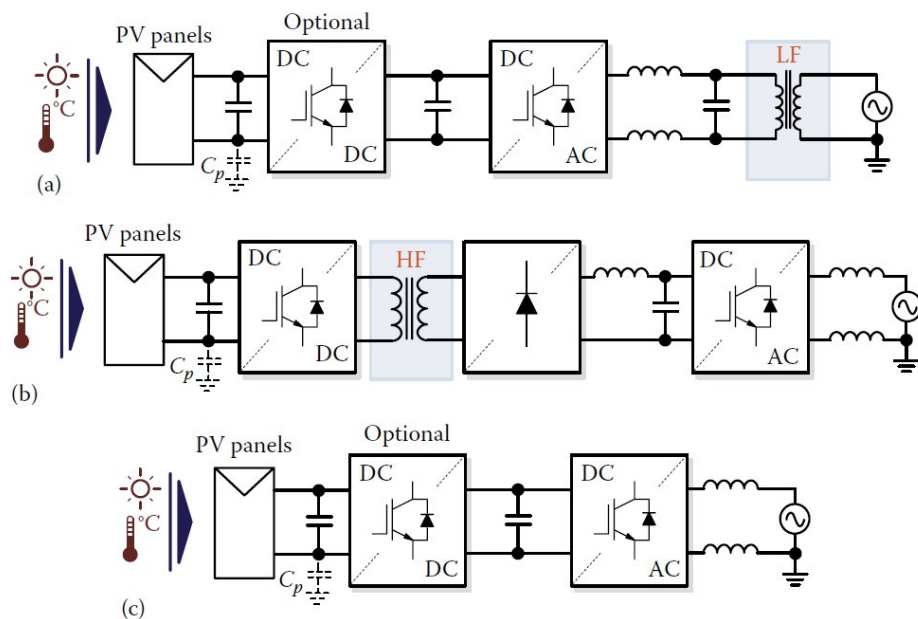


FIGURE 10. LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES CONNECTÉS MONOPHASÉS : (A) AVEC UN TRANSFORMATEUR À BASSE FRÉQUENCE, (B) AVEC UN TRANSFORMATEUR À HAUTE FRÉQUENCE ET (C) SANS TRANSFORMATEURS. [16]

6. Onduleurs AC-Module sans transformateur (Convertisseurs PV intégrés au module)

Un convertisseur photovoltaïque intégré au module à un étage peut fonctionner en mode buck-boost avec un large éventail de tensions de sortie de panneaux photovoltaïques. Cet onduleur du module AC est indiqué dans la figure 11, où un filtre LCL est utilisé pour atteindre un THD satisfaisant du courant injecté à la grille. Une variante de l'onduleur du module AC a été introduite, qui est en fait un mélange d'un convertisseur de boost et d'un onduleur FB. Le principal inconvénient de l'onduleur intégré boost AC-module est qu'il peut introduire une distorsion de courant zéro croisement. Afin de résoudre ce problème, les onduleurs du module AC sont préférables.

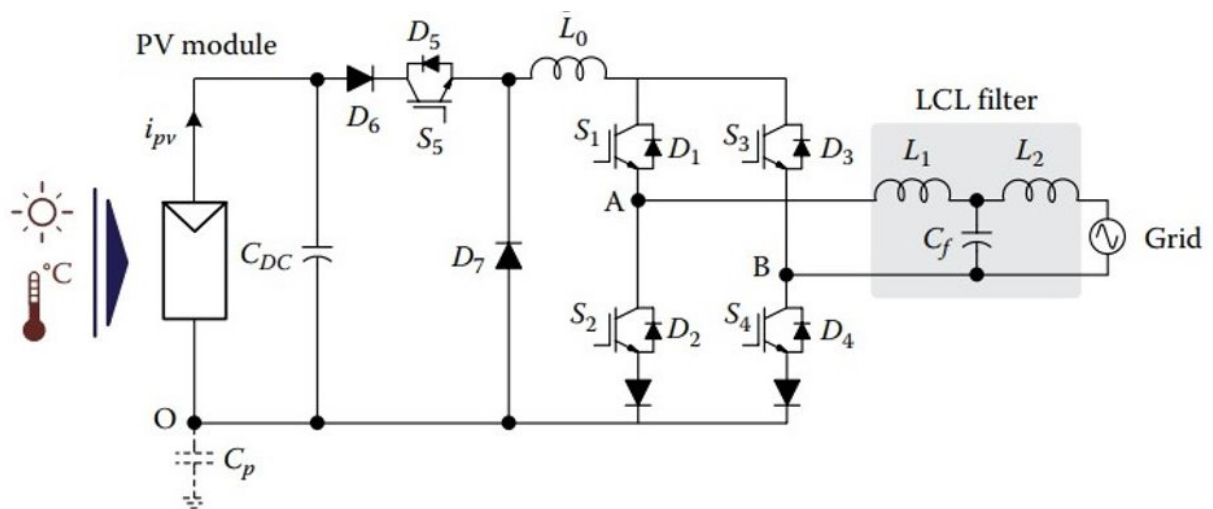


FIGURE 11. UN ONDULEUR UNIVERSEL DE MODULE AC CONNECTÉ À UNE SEULE ÉTAPE AVEC UN FILTRE LCL

7. Onduleurs à cordes en un seul étage sans transformateur

Aujourd'hui, il existe de nombreux fabricants d'onduleurs photovoltaïques sur le marché, tels que SMA, Sunways, Conergy, Ingeteam, Danfoss Solar, Refu, etc., offrant une large gamme de PV sans-transformateur onduleurs à très haut rendement européen (97 %) et l'efficacité maximale jusqu'à 98 %. [1]

Le développement topologique pour les onduleurs photovoltaïques sans transformateur a pris le départ point dans deux « bien prouver » familles de convertisseurs :

- H-pont.
- Point neutre serré (NPC). [1]

Dans ce parti nous sommes intéressés à l'étude de topologie full-bridge ou H-pont et l'évolution de cette topologie pendant quelques années.

7.1. Structures d'onduleurs dérivées de la topologie d'H-Bridge

La famille des convertisseurs H-bridge ou full-bridge (FB), développée pour la première fois par W. McMurray en 1965 [3], a été une référence importante dans le développement de la technologie de convertisseur électronique de puissance.

Il s'agissait de la première structure capable de tirer parti des premiers semi-conducteurs commués par la force disponibles (thyristors). La topologie H-bridge est très polyvalente, pouvant être utilisée pour la conversion DC-DC et DC-AC et peut également être implémenté sous forme FB (avec deux branches de commutation) ou sous forme de demi-pont (avec une jambe de commutation).

7.1.1. Première topologie de full-bridge

La topologie pratique des onduleurs photovoltaïques basée sur l'onduleur à pont complet (FB) est indiquée dans la figure 12.

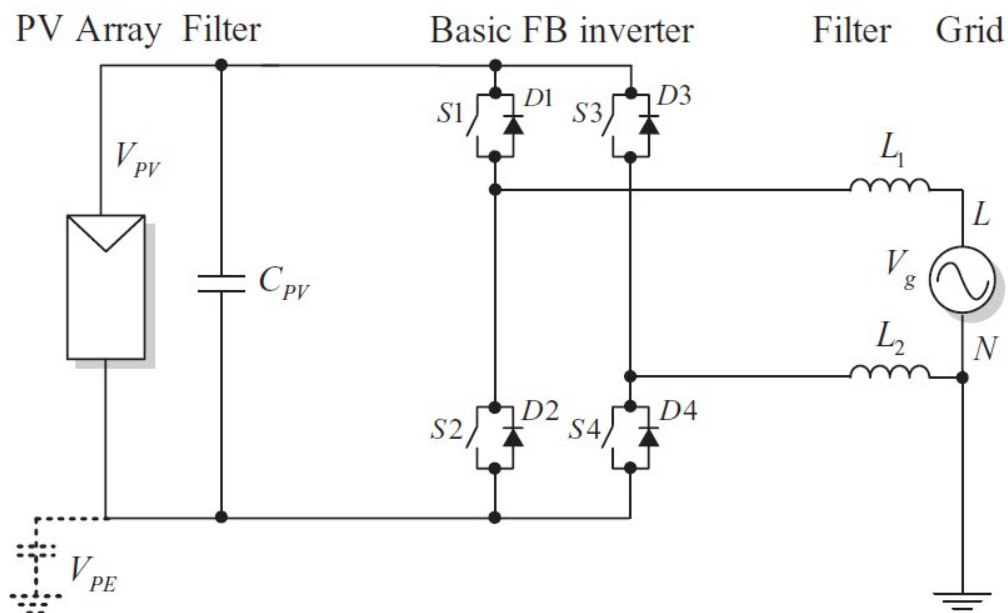


FIGURE 12. ONDULEUR FB DE BASE

7.1.2. Onduleur H5 (SMA)

En 2005, SMA a breveté une nouvelle topologie d'onduleur appelée H5 [5]. Cette topologie est représentée dans le Figure 13 et, comme son nom l'indique, il s'agit d'un pont H classique avec un cinquième commutateur supplémentaire dans le bus positif de la liaison DC qui fournit deux fonctions vitales :

- Empêche l'échange de puissance réactif entre L1(2) et CPV pendant l'état de tension zéro, augmentant ainsi l'efficacité. [2]
- Isole le module PV du réseau pendant l'état de tension zéro, éliminant ainsi le contenu haute fréquence de VPE.

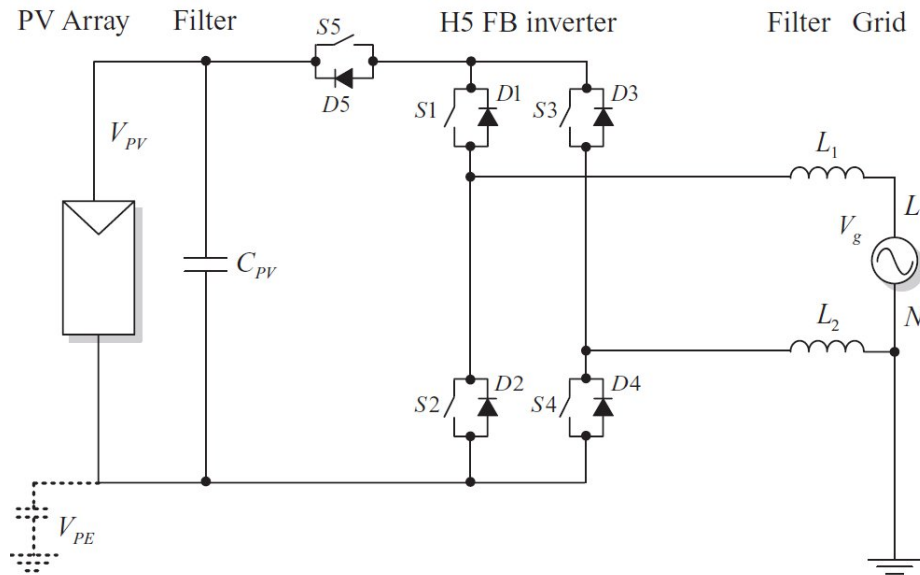


FIGURE 13. TOPOLOGIE DES ONDULEURS H5 (SMA)

7.1.3. Onduleur HERIC (Sunways)

En 2006, Sunways a breveté une nouvelle topologie également dérivée du pont H classique appelé HERIC (concept d'onduleur très efficace et fiable) en ajoutant une branche de déviation dans le côté AC à l'aide de deux IGBT dos à dos (transistors bipolaires à la porte isolée), comme le montre la figure 14[9].

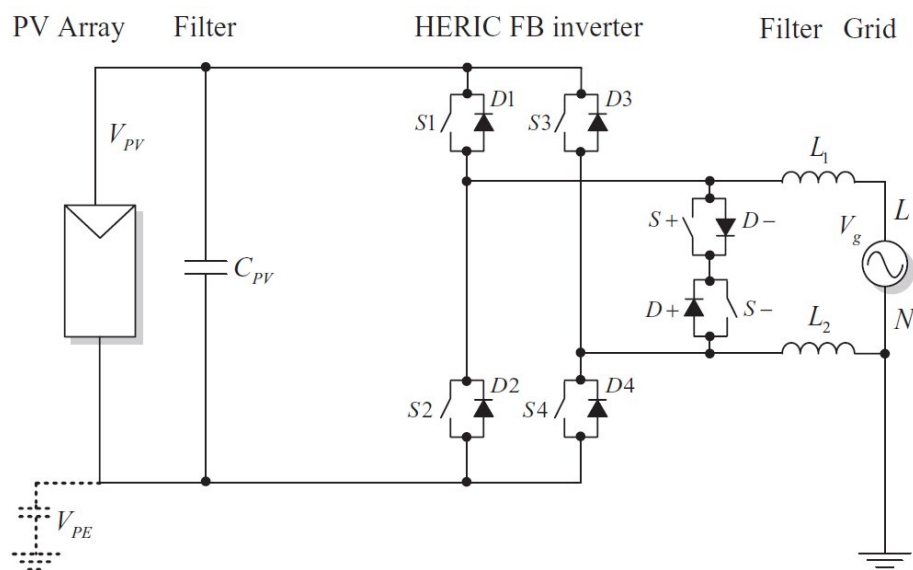


FIGURE 14. TOPOLOGIE HERIC (SUNWAYS)

7.1.4. Onduleur REFU

En 2007, REFU Solar a breveté une nouvelle topologie également dérivée du pont H classique. La topologie utilise en fait un demi-pont à l'intérieur de la voie de contournement latérale AC et un DC-DC contournable convertisseur comme le montre la figure 15[10].

Le contournement d'AC fournit les deux mêmes fonctions vitales que dans le cas de HERIC :

- Empêche l'échange de puissance réactif entre L et CPV pendant l'état de tension zéro, augmentant ainsi l'efficacité.
- Isole le module PV de la grille pendant l'état de tension zéro, éliminant ainsi la teneur en haute fréquence de V_{pe} .

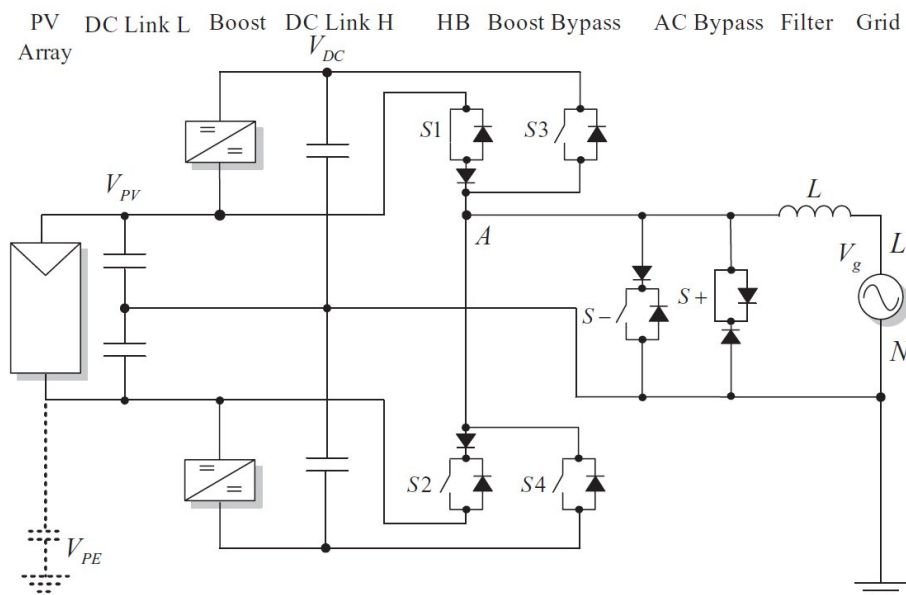


FIGURE 15. LA TOPOLOGIE D'ONDULEUR REFU

7.2. Structures d'onduleurs dérivées de la topologie de NPC

La topologie du NPC a été introduite par Nabae, Magi et Takahashi en 1981 [14] montrant de grandes améliorations en termes de réduction de dV/dt et de stress de commutateur par rapport à Classique onduleur à deux niveaux. La topologie NPC est également très polyvalente et peut être utilisée dans les deux onduleurs en phase unique (pont complet ou demi-pont) et en trois phases.

7.2.1. Point neutre clampé (NPC) Demi-pont Onduleur

Le concept principal est que la tension zéro peut être atteinte en « serrant »; la sortie « point intermédiaire » de l'autobus DC à l'aide de D+ ou de D- selon le signe du courant (figure 16).

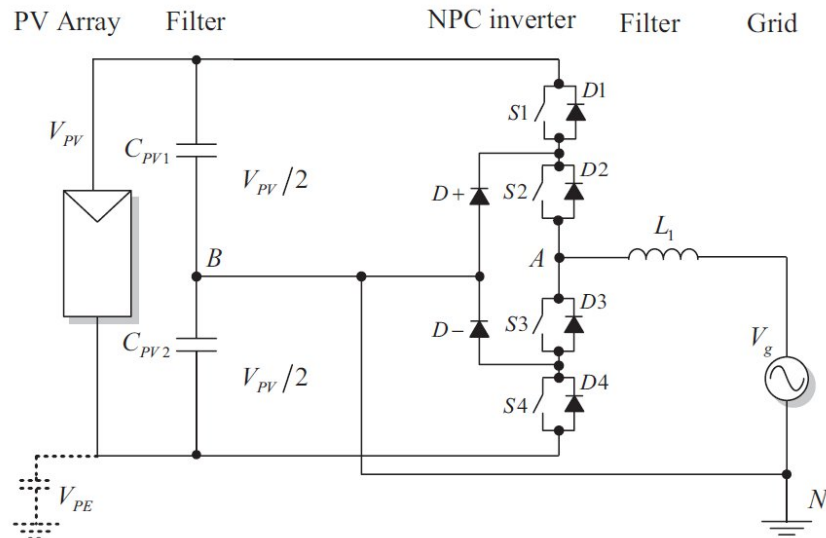


FIGURE 16. DEMI-PONT SERRÉ NEUTRE

7.2.2. Onduleur conergy NPC

Une « variante » du NPC classique est un demi-pont avec la sortie serrée au neutre à l'aide un commutateur bidirectionnel réalisé avec deux séries dos à dos IGBTs tel que breveté par Conergy[11](voir Figure 17). Une réalisation alternative du même concept est présentée en référence [12], où les commutateurs de serrage unidirectionnels sont connectés en parallèle plutôt qu'en série et un pont complet est utilisé au lieu d'un demi-pont.

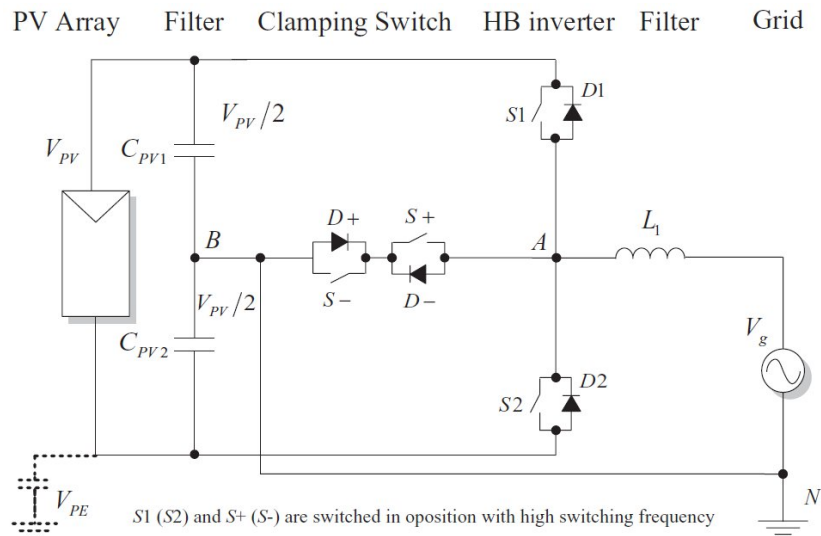


FIGURE 17. ONDULEUR POINT NEUTRE SERRÉ DE CONERGY

8. Onduleurs photovoltaïques en trois phases

La plupart des onduleurs photovoltaïques en trois phases ne sont généralement pas de véritables onduleurs à trois phases à trois fils mais plutôt trois phases à quatre fils. En fait, ils fonctionnent comme trois indépendants à une seule phase Onduleurs.

Cette solution présente deux avantages :

- Il permet d'utiliser les onduleurs existants en phase unique.
- Il permet d'utiliser l'exigence anti-île « légère » de la norme allemande VDE- 0126-1-1 (2006), qui stipule que la surveillance de l'impédance peut être remplacée par une ligne à l'autre surveillance de la tension si le contrôle de chaque courant de phase est effectué indépendamment. [2]

Des entreprises comme SMA font la promotion du concept selon lequel des systèmes en trois phases peuvent être en utilisant un bloc de construction en une seule phase, les onduleurs dits mini-central (comme, par exemple, Sunny Mini Central 8000TL).

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons, en premier lieu, donnée une présentation succincte sur les générateurs photovoltaïque, ainsi que leur fonctionnement. Nous avons également présenté les structures des systèmes de conversion photovoltaïque connecté au réseau électrique de distribution, et nous avons listé un certain nombre de topologies de chaine de système de puissance de conversion photovoltaïque.

1.	Introduction.....	3
2.	Le générateur photovoltaïque.....	3
2.1.	Association série des cellules PV.....	4
2.2.	L'association en parallèle des cellules	5
3.	Types d'installations photovoltaïques.....	6
3.1.	Installations autonomes	6
3.2.	Installations raccordées aux réseaux	7
4.	Exigences et défis des systèmes PV raccordés au réseau.....	8
5.	Technologies des convertisseurs de puissance pour les systèmes photovoltaïques en monophasé.....	9
6.	Onduleurs AC-Module sans transformateur (Convertisseurs PV intégrés au module).....	11
7.	Onduleurs à cordes en un seul étage sans transformateur.....	11
7.1.	Structures d'onduleurs dérivées de la topologie d'H-Bridge.....	12
7.1.1.	Première topologie de full-bridge	12
7.1.2.	Onduleur H5 (SMA).....	12
7.1.3.	Onduleur HERIC (Sunways).....	13
7.1.4.	Onduleur REFU.....	14
7.2.	Structures d'onduleurs dérivées de la topologie de NPC.....	14
7.2.1.	Point neutre clampé (NPC) Demi-pont Onduleur.....	15
7.2.2.	Onduleur conergy NPC.....	15
8.	Onduleurs photovoltaïques en trois phases	16
9.	Conclusion.....	16

CHAPITRE II

SIMULATION ET RÉSULTATS

1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation et la simulation du système proposé avec le logiciel Matlab/Simulink, le système étudié est un système de production d'énergie photovoltaïque connecté au réseau électrique. Le système présenté sur la figure 1 est divisé en deux parties, tel que :

- La première partie permet de tirer le maximum de puissance d'un GPV.
- La deuxième partie permet cumuler cette énergie est puis de l'injecter dans le réseau.

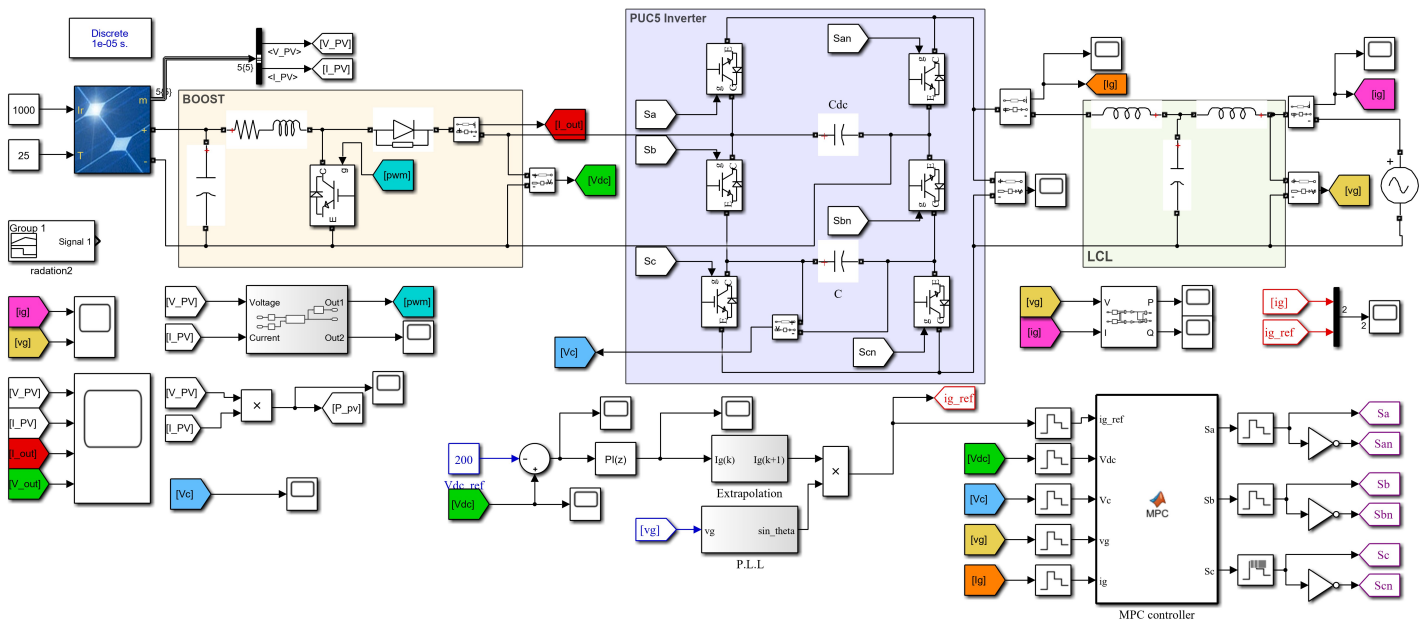


FIGURE 1. SCHÉMA DE SIMULATION GLOBALE SYSTÈME PV RACCORDÉ AU RÉSEAU.

Le modèle de simulation que nous avons utilisé, est composé d'un hacheur boost commandé par un algorithme MPPT de type P&O et un onduleur multi-niveau PUC5 commandé par un contrôleur prédictif MPC, ce dernier est connecté au réseau électrique à travers un filtre LCL, qui permet d'atténuer les harmoniques du courant.

Pour ce faire nous avons choisi un certain nombre de paramètres pour exécuter la simulation convenablement sur le logiciel Matlab.

Le tableau suivant donne une idée sur les valeurs électriques du système, il est comme une référence pour évaluer les valeurs trouver.

TABLEAU 1. VALEURS DES PARAMÈTRES DU SYSTÈME

Paramètre	Valeur
Fréquence du réseau (fg)	50 Hz
Tension du réseau (Vg)	120 V
La tension GPV (Vpv)	150 V
Le courant GPV (I _{pv})	16.76A
La tension d'hacheur (Vdc)	200 V
Puissance injectée au réseau (P _g)	2500 W

Ces paramètres sont fixés au préalable et permettent de calculer toutes les grandeurs des différents éléments électrique du système, ceci est présenté dans le deuxième chapitre à travers les équations de dimensionnement exposées.

2. Caractéristique du générateur photovoltaïque

Pour garantir un bon fonctionnement du système, nous avons choisi d'injecter une puissance moyenne de 2500 watts, pour cela nous avons choisi une chaine de 8 modules répartie en 2 séries parallèles.

Le module photovoltaïque Trina Solar TSM-315PA14A.08 est choisi pour la modélisation puis la simulation. Il contient (72) cellules solaires du silicium multi cristallines, et fournit une puissance maximum nominale de 315W, une tension en circuit ouvert de 46V et un courant en court-circuit de 8.86A [3].

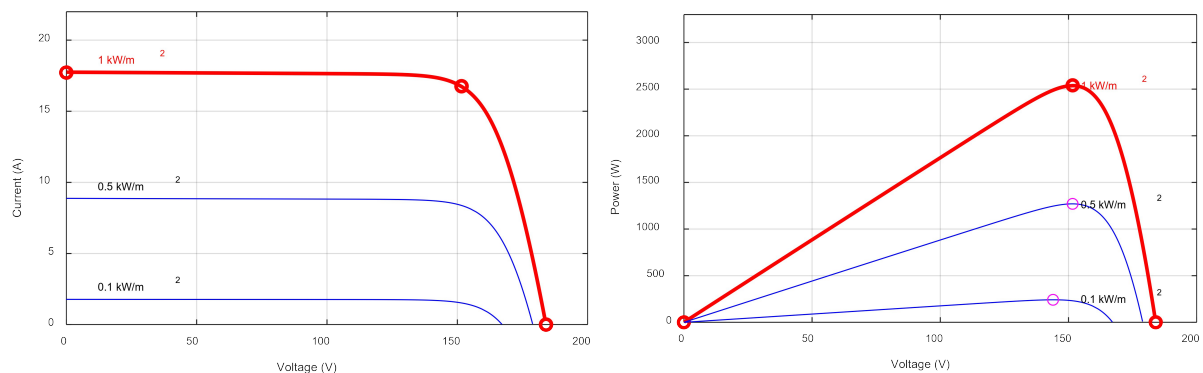


FIGURE 2. CARACTÉRISTIQUES I(V) À GAUCHE ET P(V) À DROITE DU MODÈLE DE GPV UTILISÉ AVEC ÉCLAIREMENT VARIABLE

Le système constitué de 8 panneaux solaires connectés en série, produit une puissance de 2.54 kW, et une tension de circuit ouvert de 151V avec un courant de de court-circuit de 16.65 A. les courbes I(V) et P(V) sont données dans figure 2 et la figure 3, pour un éclairement variable pour la première et une température variable pour la seconde.

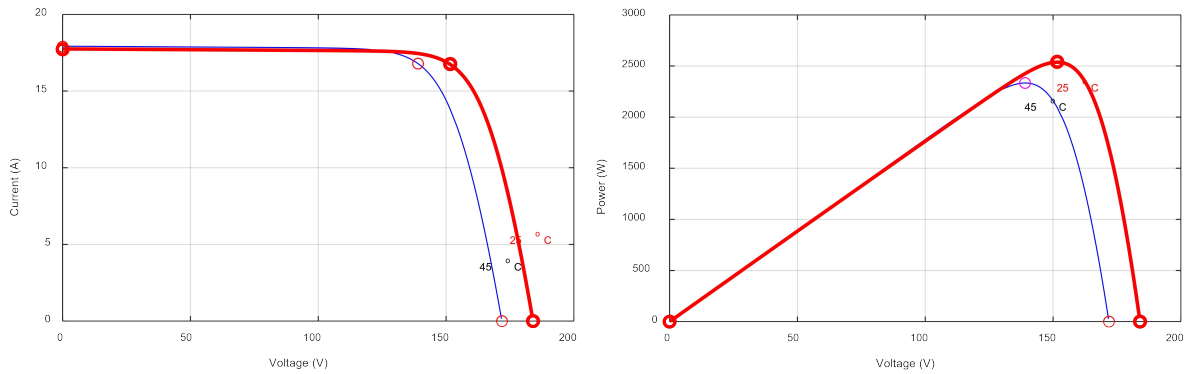


FIGURE 3. CARACTÉRISTIQUES I(V) À GAUCHE ET P(V) À DROITE DU MODÈLE DE GPV UTILISÉ AVEC TEMPÉRATURE VARIABLE.

3. Simulation de générateur PV et le hacheur Boost par commande MPPT

Dans cette partie on va discuter les résultats de simulation à condition d'une irradiation ($G=1000\text{w/m}^2$) les courbes ci-dessous nous montrent l'efficacité de notre système à produire une puissance proche où égale 2500 Watt.

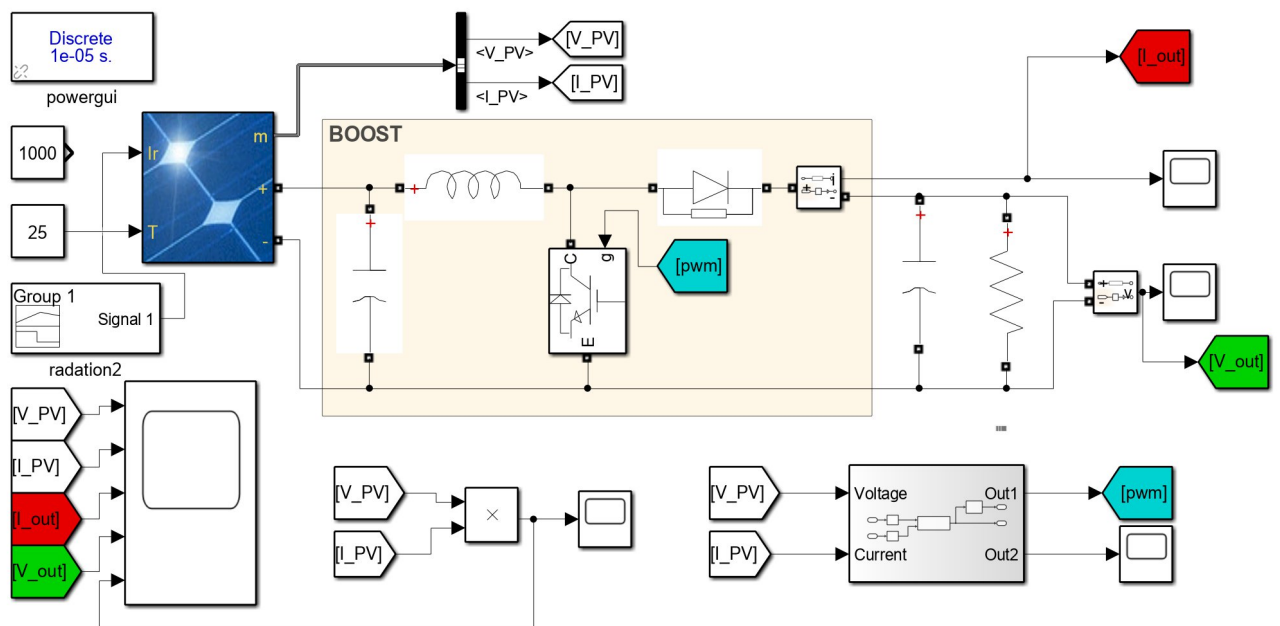


FIGURE 4. MODÈLE DE SIMULATION MPPT AVEC HACHEUR BOOST

Avant de présenter les résultats de simulation, ci-dessous les paramètres du dispositif MPPT, ces paramètres sont le résultat du dimensionnement présenté dans le précédent chapitre.

Paramètre	Valeur
Capacité d'entrée	1100 μ F
Capacité de sortie	2200 μ F
Inductance	3 mH
Résistance de charge	20 Ohm
La tension de sortie (Vdc)	200 V
Fréquence MPPT (PWM) fs	10 kHz
Taux de perturbation D	0.002

FIGURE 5. PARAMÈTRE DU DISPOSITIF MPPT

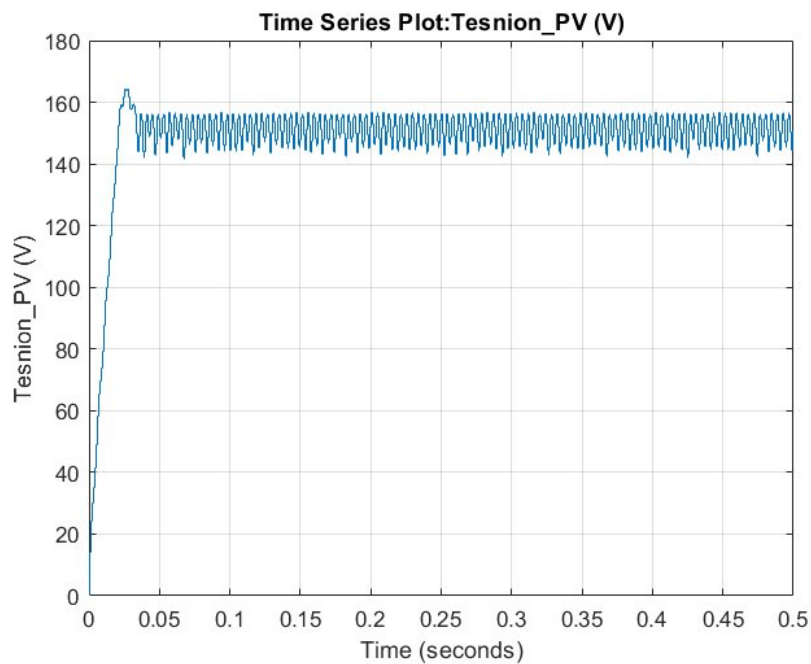


FIGURE 6. LA TENSION GÉNÉRÉE PAR LE GPV (VPV) AVEC IRRADIANCE = 1000W/M²

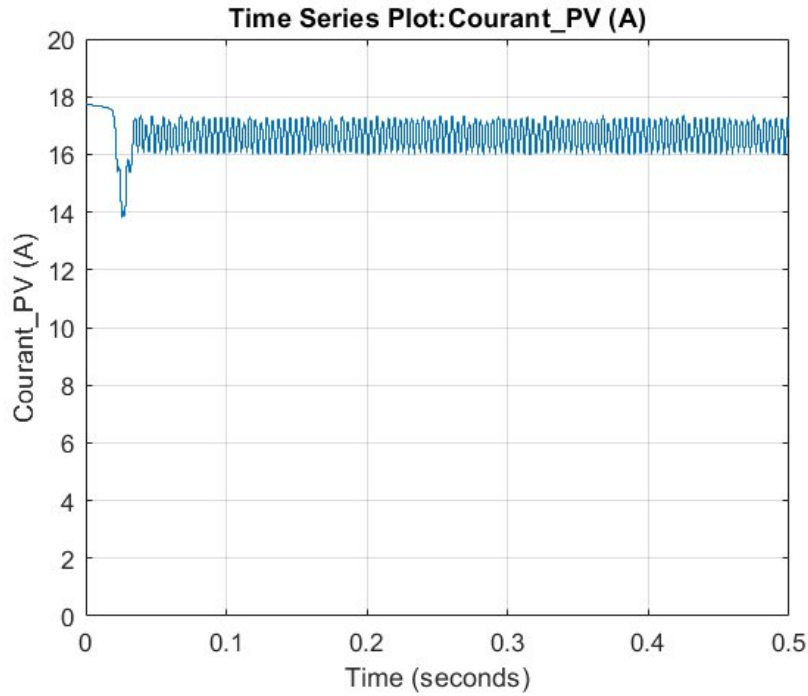


FIGURE 7. LE COURANT GÉNÉRÉ PAR LE GPV (I_{PV}) AVEC IRRADIANCE = 1000W/M²

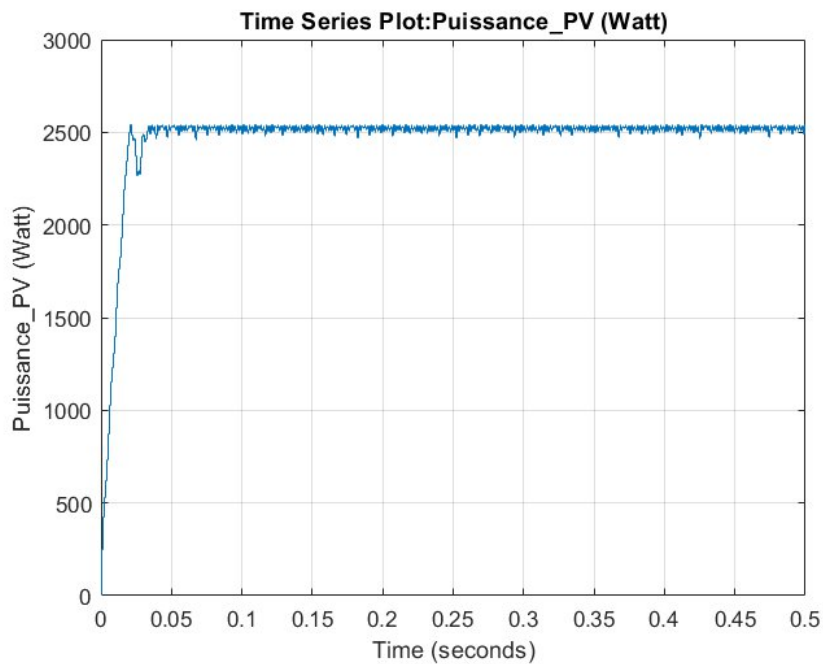


FIGURE 8. LA PUISSANCE GÉNÉRÉE PAR LE GPV (P_{PV}) AVEC IRRADIANCE = 1000W/M²

Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ces figures montrent l'efficacité de du dispositif MPPT avec hacheur survolteur commandé par l'algorithme P&O avec optimisation de la puissance de sortie. Aussi, il est important de régler les paramètres de l'algorithme et de bien dimensionner l'inductance L pour avoir un courant lisse et le condensateur C pour avoir une tension de sortie stable.

4. Simulation du dispositif MPPT avec éclairement variable

Une deuxième simulation est nécessaire pour vérifier le bon fonctionnement du dispositif MPPT, nous avons exécuté cette simulation pour des valeurs variable de l'éclairement solaire de 800 W/m² à 0s ensuite 1000 W/m² à 0.3 s et 500 W/m² à 0.7s, nous constatons que les courants, tension et puissance photovoltaïque générés sont optimisés par l'algorithme MPPT avec des ondulations minimales, dans un temps assez court ce qui montre l'efficacité du dispositif de suivi de puissance, les figures suivantes présentent ces différentes grandeurs.

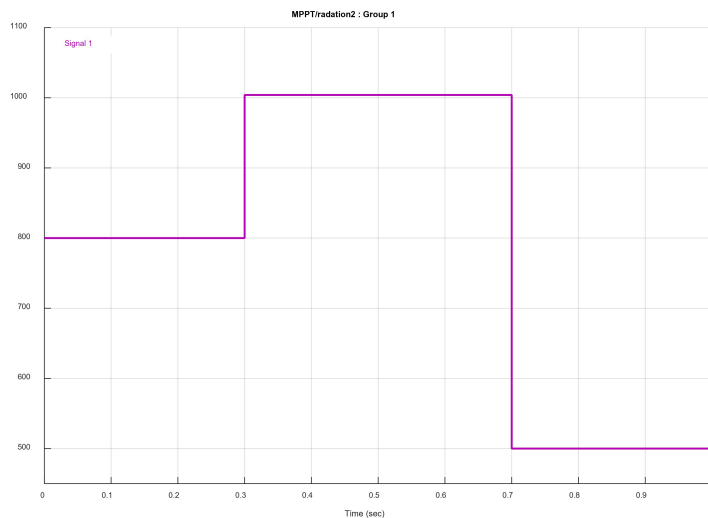


FIGURE 9. VALEUR DE L'IRRADIANCE SOLAIRE DE 0 À 1S

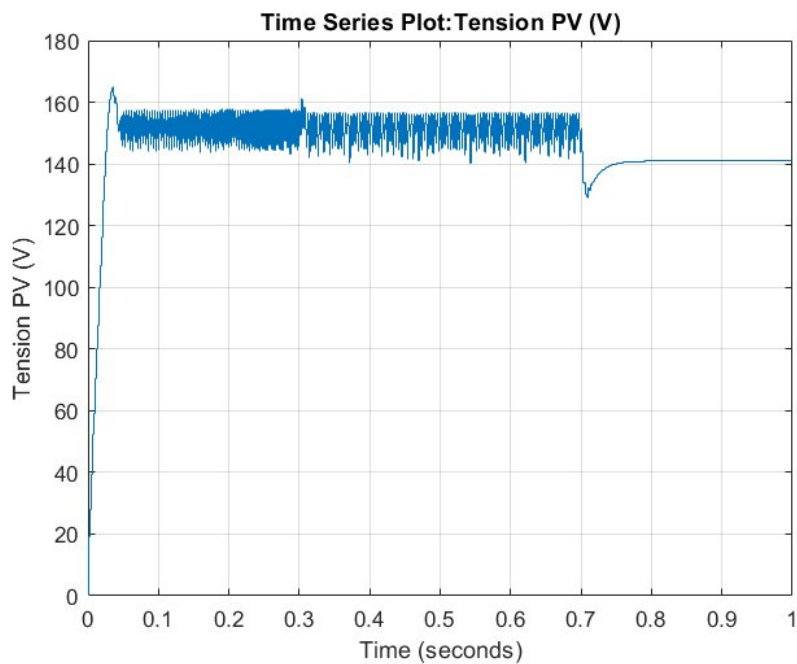


FIGURE 10. TENSION DE SORTIE VPV

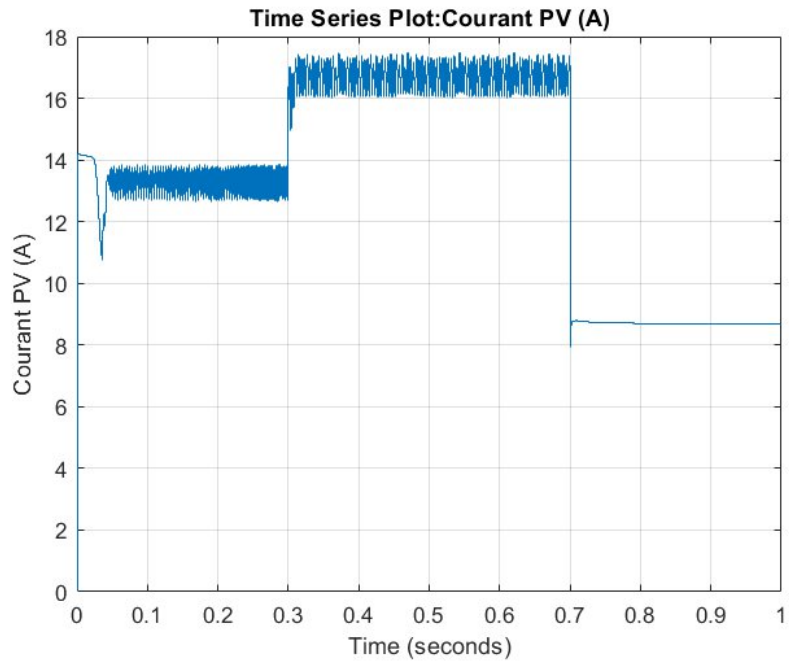


FIGURE 11. COURANT DE SORTIE IPV



FIGURE 12. PUISSANCE DE SORTIE PPV

5. Simulation du système complet avec irradiance constante

Avant de présenter les résultats de simulation, ci-dessous les paramètres du système proposé, ces paramètres sont le résultat du dimensionnement présenté dans le précédent chapitre, où les paramètres de l'onduleur PUC5 et du filtre LCL sont présentés.

Paramètre de l'onduleur PUC5	Valeur
Capacité C1	2200 μ F
Capacité C2	2200 μ F
Paramètre du filtre LCL	
Inductance Li	3 mH
Inductance Lg	3 mH
Capacité de sortie	30 μ F

Dans les figures suivantes nous présentons les résultats de simulation du système sous l'éclairement solaire constant de 1000W/m^2 . La puissance active et la puissance réactive injectées dans le réseau électrique par l'onduleur à travers le filtre LCL.

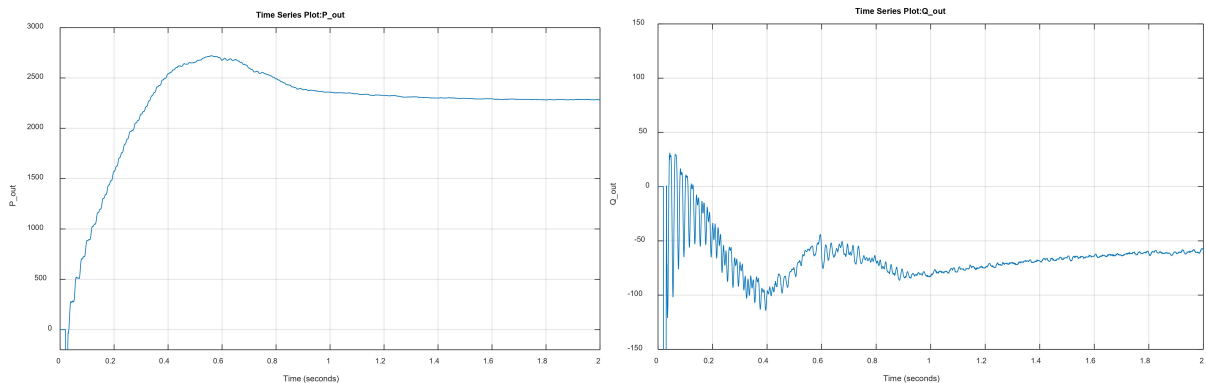


FIGURE 13. FORME DE LA PUISSANCE ACTIVE (À GAUCHE) ET LA PUISSANCE RÉACTIVE (À DROITE) INJECTÉES

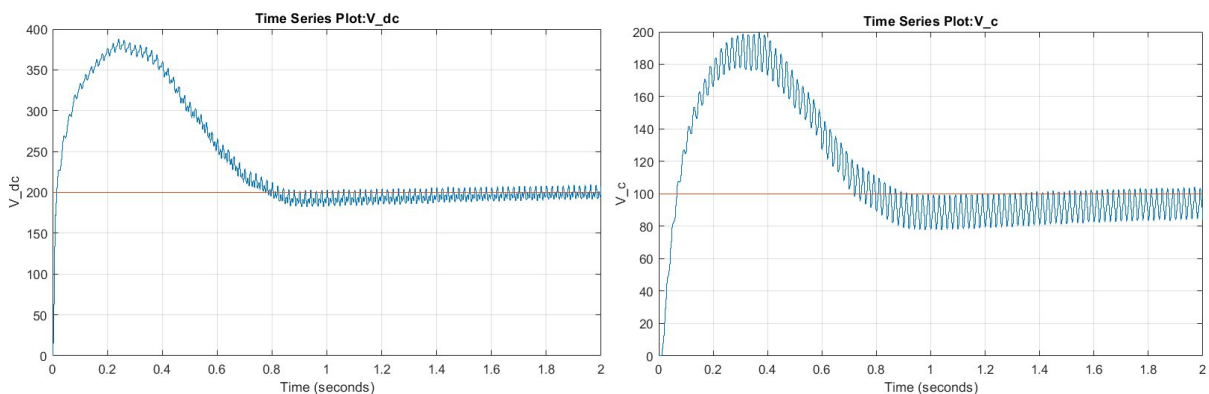


FIGURE 14. LA TENSION DU BUS CONTINUE (À GAUCHE) ET LA TENSION AU BORNE DU CONDENSATEUR C2 (À DROITE)

La figure 14 montre les formes de la tension du bus continue (condensateur C1) qui suit la valeur de référence de 200V, ainsi que la tension aux bornes du condensateur C2.

Les figures 15, 16 montrent la forme du courant issu de l'onduleur et qui est injecté dans le réseau électrique. La première figure montre le courant i_g injecté avec le courant i_{g_ref} qui est sa référence calculée par la commande MPC et le régulateur PI. La figure 15 montre le courant injecté dans l'outil Simulink qui permet le calcul de la FFT, celle est représenté sur la figure 17. Dans cette première simulation nous avons réussi à avoir un THD de 2.13% qui est largement en dessous des normes qui recommandent un taux de 5%.

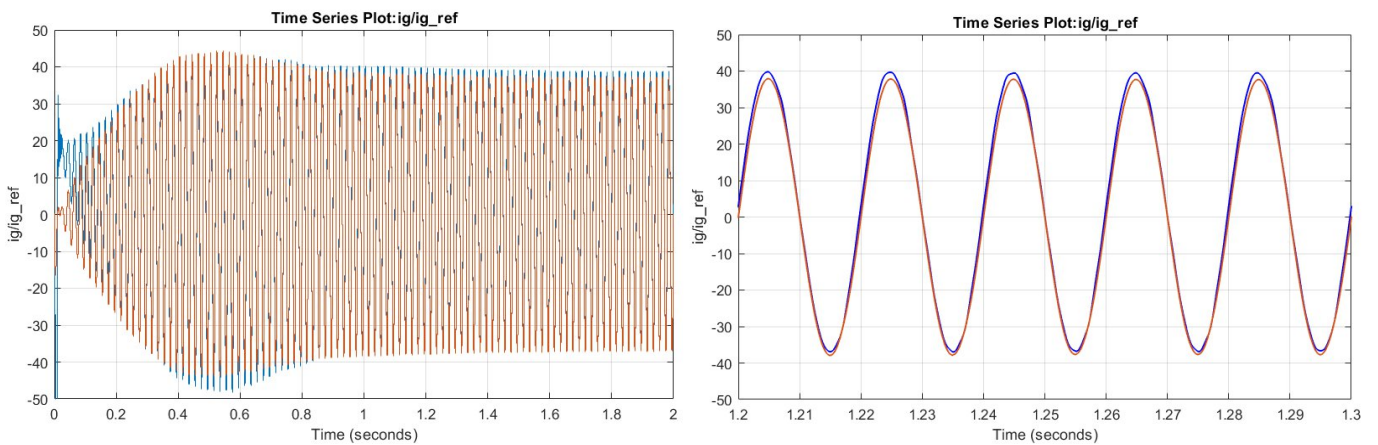


FIGURE 15. LA FORME DU COURANT INJECTÉ DANS LE RÉSEAU ET SA RÉFÉRENCE $i_g + i_{g_ref}$

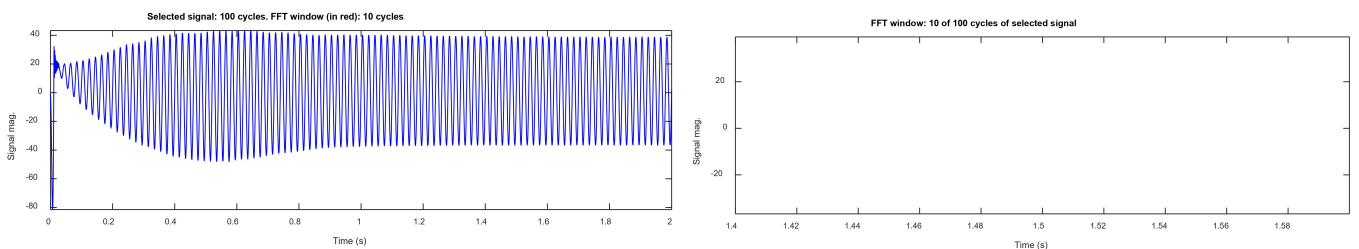


FIGURE 16. LA FORME DU COURANT INJECTÉ DANS LE RÉSEAU

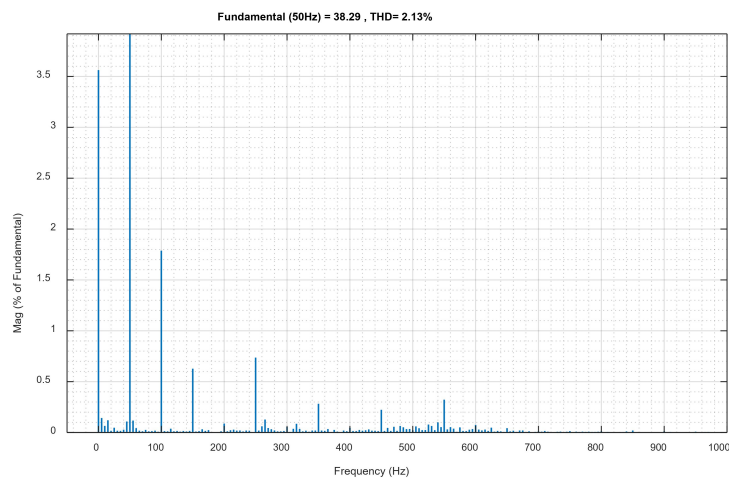


FIGURE 17. ANALYSE FFT DU COURANT INJECTÉ DANS LE RÉSEAU

6. Simulation du système complet avec irradiance variable

Dans les paragraphes suivants, nous allons réexécuté le modèle de simulation précédent pendant un éclairciment variable avec consécutivement les valeur 400 W/m², 1000 W/m², 800 W/m² et 600 W/m² tel qu'illustré dans la figure suivante :

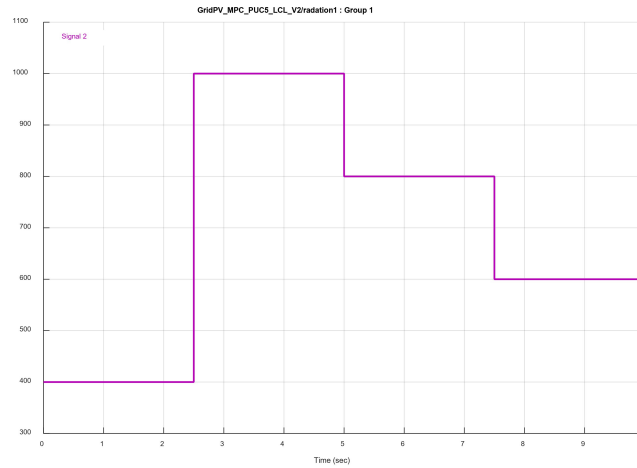


FIGURE 18. VALEURS DE L'IRRADIANCE SOLAIRE DE 0 À 10S

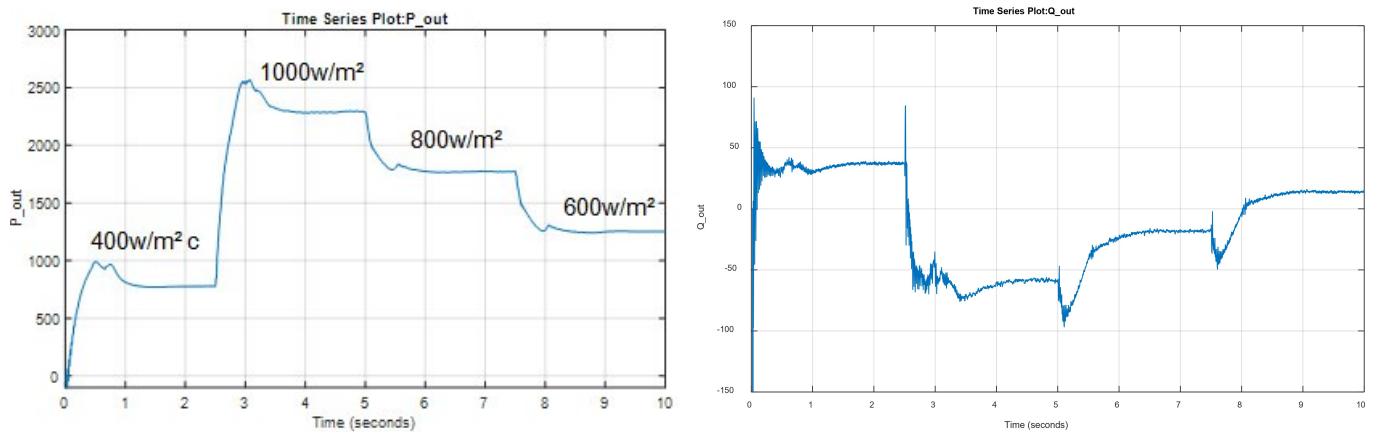


FIGURE 19. FORME DE LA PUISSANCE ACTIVE (A GAUCHE) ET LA PUISSANCE RÉACTIVE (A DROITE) INJECTÉES

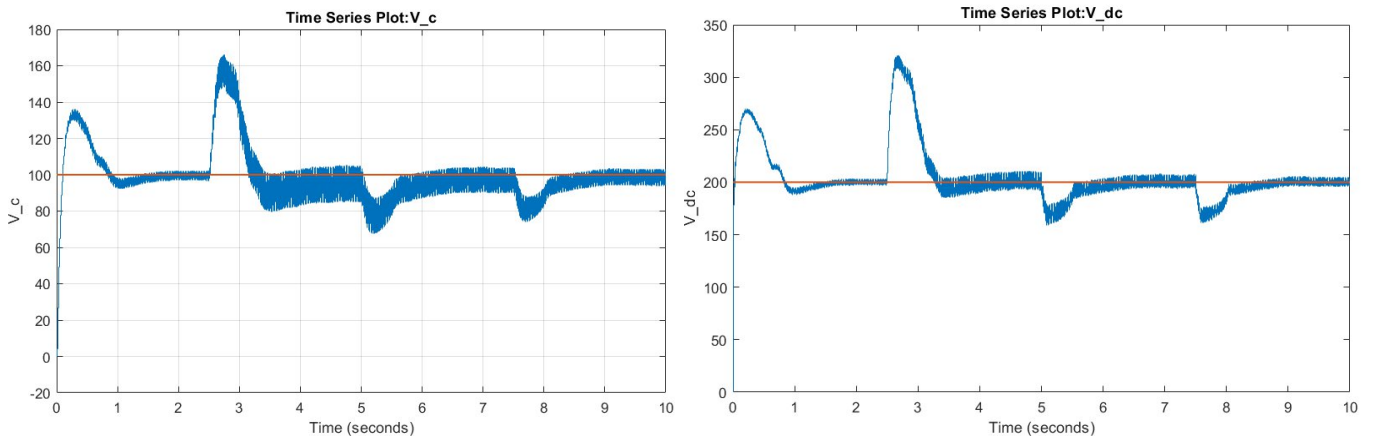


FIGURE 20. FORME DE LA TENSION DU BUS CONTINUE ET DE LA TENSION DU CONDENSATEUR C2

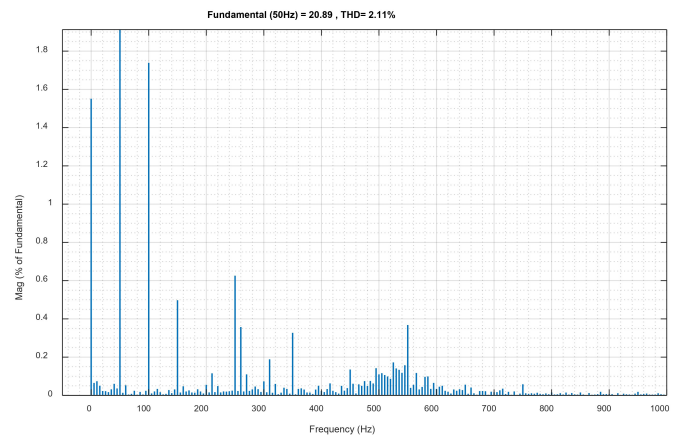
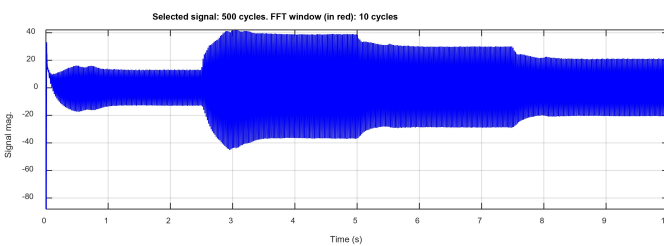
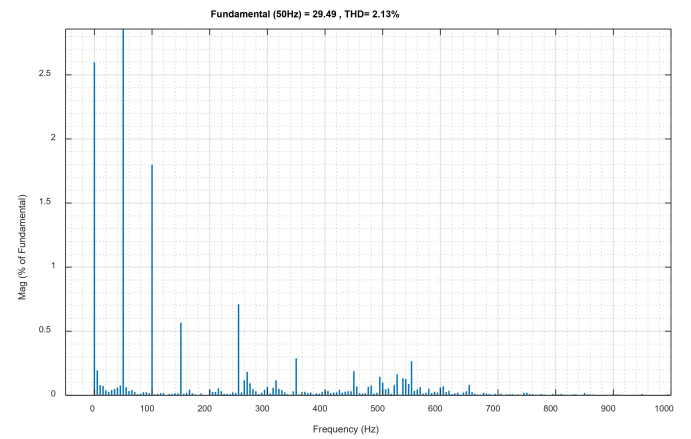
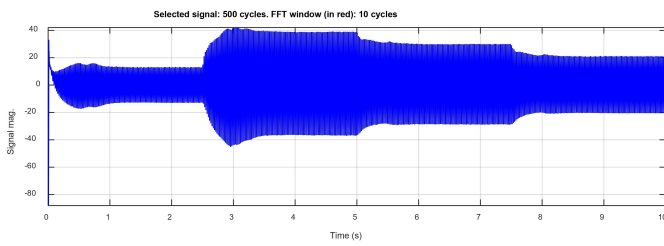
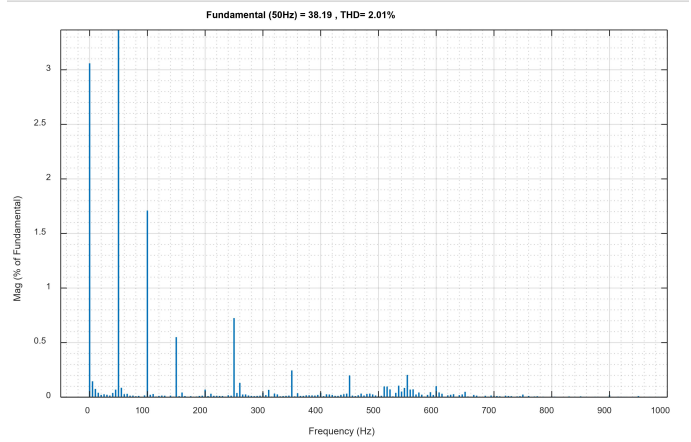
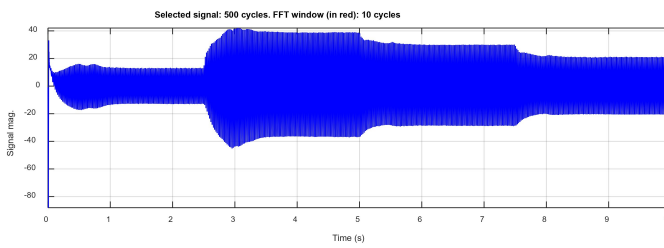
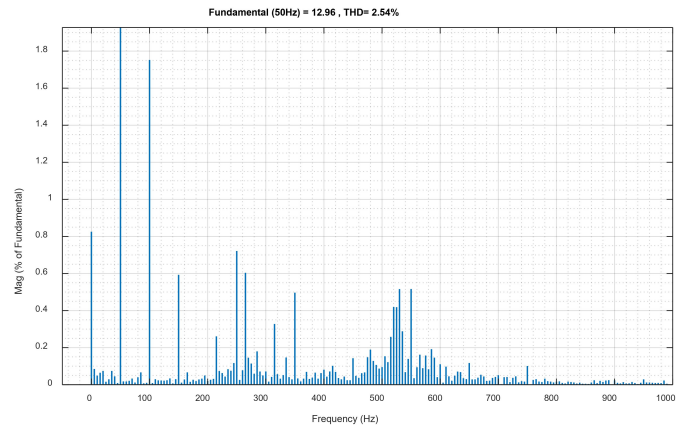
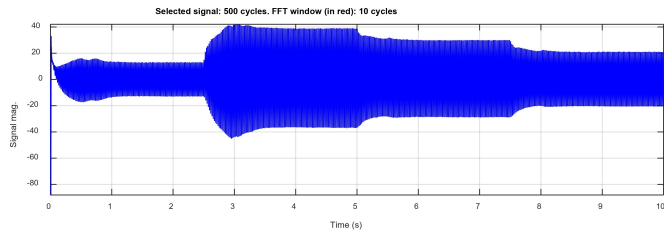


FIGURE 21. ANALYSE FFT DU COURANT INJECTE DANS LE RESEAU.

L'analyse de Fourier présentée dans les figures suivantes montre l'efficacité de notre système pour le filtrage des harmoniques où nous avons enregistré les valeurs des THD de 2.55%, 2.01%, 2.13% et 2.11% pour des éclairagements solaires de 400 W/m², 1000 W/m², 800 W/m² et 600 W/m² respectivement.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, un schéma de contrôle basé sur le contrôle prédictif de modèle pour un système photovoltaïque monophasé connecté au réseau utilisant un onduleur PUC5 est proposé et discuté. Les résultats de la simulation montrent une bonne performance de suivi des points de puissance maximale du générateur photovoltaïque en cas de changements soudains d'irradiance. De plus, le système photovoltaïque connecté au réseau étudié avec l'algorithme MPC proposé injecte la puissance photovoltaïque avec une qualité de courant de réseau élevée par rapport au contrôleur PI classique à différents niveaux de changements d'irradiance.

1.	Introduction.....	35
2.	Caractéristique du générateur photovoltaïque	36
3.	Simulation de générateur PV et le hacheur Boost par commande MPPT.....	37
4.	Simulation du dispositif MPPT avec éclairement variable	40
5.	Simulation du système complet avec irradiance constante.....	42
6.	Simulation du système complet avec irradiance variable	44
7.	Conclusion.....	46

Conclusion générale

Ce travail est un mémoire s'intéresse à l'optimisation de l'intégration de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique. L'objectif de ce travail est de concevoir un système de conversion PV connecté au réseau monophasé, ainsi que la modélisation de la commande pour une efficacité optimale.

Dans ce contexte, nous avons présenté et modélisé un système photovoltaïque monophasé connecté au réseau, composé principalement d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur élévateur CC-CC et d'un onduleur PUC5 ainsi qu'un filtre LCL. Le convertisseur PUC5 est une topologie prometteuse pour connecter le système photovoltaïque au réseau avec moins de filtres harmoniques et un rendement élevé. Il peut fournir une tension de sortie à 5 niveaux avec une seule source CC et six commutateurs de puissance. Un système de contrôle basé sur l'algorithme P&O MPPT et le contrôle prédictif de modèle (MPC) est proposé. Les objectifs du système de contrôle proposé sont les suivants :

- Suivi rapide du point de puissance maximale en cas de changements soudains de d'irradiance à l'aide de l'algorithme P&O.
- Générer une tension purement symétrique et synchronisée à 5 niveaux dans la sortie PUC5.
- Garantir une haute qualité avec une valeur THD% raisonnable du courant injecté dans le réseau.

Afin de démontrer l'amélioration des performances des systèmes de contrôle proposés, des modèles de simulation complets ont été développés à l'aide de MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus ont montré les excellentes performances des systèmes de contrôle proposés par rapport au contrôleur PI classique.

Comme perspective des travaux de recherche futurs nous proposons en complément des connaissances présentées dans ce mémoire :

- Comparaison de la commande MPC avec d'autres techniques de contrôle.
- Possibilité de connecter cette topologie à différentes autres sources d'énergie renouvelables.

Références

- [1] Kininger, Franz, and Rationele Energiewandlung. "Photovoltaic systems technology." Kassel, Germany: Universität Kassel, Institut für Rationelle Energiewandlung (2003).
- [2] Louazene, Mohamed Lakhdar. Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla. Diss. Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des sciences de l'ingénieur, 2008.
- [3] HANANOU, Fatiha, and Aicha ROUABAH. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque. Diss. 2014.
- [4] Wirth, Harry, and Karin Schneider. "Recent facts about photovoltaics in Germany." Fraunhofer Ise 92 (2015).
- [5] Khedidja, Ayache. Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque couplé à un réseau électrique. Diss. University of Souk Ahras, 2014.
- [6] Abbassen, Lyes. Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [7] Spataru, Sergiu, et al. "Firefighter safety for PV systems: Overview of future requirements and protection systems." 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2013.
- [8] Teodorescu, Remus, Marco Liserre, and Pedro Rodriguez. Grid converters for photovoltaic and wind power systems. John Wiley & Sons, 2011.
- [9] Belaid talha abdeldjabar ,Ahmed gueye mohamad vall « Modélisation et commande par courant d'un générateur photovoltaïque raccordé au réseau». UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA,mémoire de master,2020.
- [10] Akagi, Hirofumi. "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits." Proc. Int. Power Electronics Conf., 1983. 1983.
- [11] Kim, Hyosung, and Hirofumi Akagi. "The instantaneous power theory on the rotating pqr reference frames." Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on

- Power Electronics and Drive Systems. PEDS'99 (Cat. No. 99TH8475). Vol. 1. IEEE, 1999.
- [12] Buchholz, Franz. Das Begriffssystem Rechteistung, Wirkleistung, totale Blindleistung. Selbstverl.;[Lachner in Komm], 1950.
- [13] Sera, Dezso, Laszlo Mathe, and Frede Blaabjerg. "Distributed control of PV strings with module integrated converters in presence of a central MPPT." 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2014.
- [14] Nabae, A. "A universal theory of instantaneous active-reactive current and power including zero-sequence component." Proceeding of the International Conference on Harmonics and Quality of Power. 1996.
- [15] Wang, Huai, Marco Liserre, and Frede Blaabjerg. "Toward reliable power electronics: Challenges, design tools, and opportunities." IEEE Industrial Electronics Magazine 7.2 (2013): 17-26.
- [16] Yang, Yongheng, and Frede Blaabjerg. "Overview of single-phase grid-connected photovoltaic systems." Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB® and ANSYS®. CRC Press, 2017. 41-66.
- [17] F. SALAMA « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique ». Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.
- [18] Blaabjerg, Frede, et al. "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems." IEEE Transactions on industrial electronics 53.5 (2006): 1398-1409.
- [19] Vahedi, Hani, Hadi Y. Kanaan, and Kamal Al-Haddad. "PUC converter review: Topology, control and applications." IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2015.
- [20] Sahli, Abdeslem. Optimisation de la qualité d'énergie dans les Smart grids. Diss. 2021.
- [21] Vahedi, Hani, Philippe-Alexandre Labbé, and Kamal Al-Haddad. "Sensor-less five-level packed U-cell (PUC5) inverter operating in stand-alone and grid-connected modes." IEEE Transactions on Industrial Informatics 12.1 (2015): 361-370.

- [22] Trabelsi, Mohamed, Lazhar Ben-Brahim, and Khalid A. Ghazi. "An improved real-time digital feedback control for grid-tie multilevel inverter." IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2013.
- [23] CHOUIER Oussama HAOUAM Aymen." Intégration de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique à l'aide d'un onduleur multi-niveaux de type PUC" Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj ,mémoire de master,2021