

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Electrotechnique
Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Présenté par
CHALANE SAHRA
BENSLIMANE ZAHRA

Thème

**Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecte au
réseau à travers un filtre actif**

Encadré par :
Pr : Mr HAMOUDI Farid

Année Universitaire : 2023-2024

Remerciements

Au nom d'Allah le tout puissant, nous remercions Allah de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes les années d'études, et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Ensuite,

*Nous tenons à présenter nos vifs remerciements à notre promoteur le **Pr. Farid HAMOUDI** pour ses judicieux conseils, son aide constante et les précieuses suggestions qu'il nous est prodigué durant tout le déroulement de ce mémoire jusqu'à sa conclusion.*

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail



C.Sahra & B.Zahra -

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel.

A mon frère bien aimé Hicham pour son inspiration et son soutien.

A ma meilleure amie Sarah qui a partagé les bons et les mauvais moments avec moi et m'a toujours apporté son soutien inconditionnel.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé à ce projet, quelle que soit leurs contributions.

 *C.Sahra -*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à Mes chers parents pour leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours académique.

À mes frères et mes amis pour leur présence et leur encouragement.

À mes professeurs pour leur enseignement précieux et leur conseils avisés.

Ce travail est le fruit de vos efforts combinés



B.Zahra -

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Sommaire

Liste des notations et symboles

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale..... 1

Chapitre I

Généralités sur un système PV

Introduction	3
I.1. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	3
I.1.1. Cellule photovoltaïque	3
I.1.2. Différents types de cellules photovoltaïques.....	4
I.1.3. Critères de choix d'une centrale photovoltaïque.....	4
I.1.4. Types de protection dans les installations photovoltaïques	4
I.1.5. Classification des systèmes photovoltaïques	5
I.1.5.1. Systèmes autonomes	5
I.1.5.2. Système connecté au réseau	6
I.1.6. Configuration d'un système PV connecté au réseau.....	6
I.1.6.1. Nombre d'étages de puissance	6
I.1.6.2. Type d'isolation	7
I.1.6.3. Topologie des systèmes PV	7
I.1.7. Convertisseurs statiques	8
I.1.7.1. Onduleur.....	8
I.1.7.2. Hacheur	9
I.2. Pollution harmonique dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	9
I.2.1. Origines des harmoniques	9
I.2.2. Effets des harmoniques	10
I.2.3. Les solutions contre les harmoniques.....	10
I.2.3.1. Filtre actif	10
I.2.3.2. Filtres passifs.....	10
Conclusion	11

Sommaire

Chapitre II

Modélisation d'un système PV

Introduction	13
II.1. Modélisation du générateur PV	13
II.2. Modélisation du Convertisseur DC-DC (boost)	16
II.3. Onduleur à trois niveaux.....	17

Chapitre III

La commande du filtre actif dans la chaîne de conversion

Introduction	20
III.1. Description du système.....	20
III.2. Identifications des courants harmoniques	22
III.2.1. Méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire	23
III.3. Algorithme de recherche de point de puissance maximale	25
III.4. Régulation de la tension continue.....	26
III.5. Logique floue.....	28
III.5.1. Contrôle de la logique floue	28
III.5.2. Facteur d'échelle.....	29
III.5.3. Base de règles	31
III.6. Boucle à verrouillage de phase.....	32

Chapitre IV

Résultats de simulation et interprétation

Introduction	35
IV.1. Évaluation de la performance de l'énergie	42
Conclusion Générale	44
Références bibliographiques.....	46

Liste des notations et symboles

abc : les trois phases du réseau.

AC : Courant Alternatif (Alternative Current).

DC : Courant Continu (Direct Current).

e : erreur.

FAP : filtre actif parallèle.

FLC : fuzzy logic control (contrôle de la logique floue).

$G_e, G_u, G_{\Delta e}$: gains.

GPV : Générateur de photovoltaïque.

I : courant.

i_F : courant de filtre.

i_L : courant de la charge.

i_S : courant de la source.

K_i, K_p : gains intégral et proportionnel.

MPP : Maximum Power Point (Point de Puissance Maximale).

MPPT : Maximum Power Point Tracking (suivi de Point de Puissance Maximale).

NPC : Neutral Point Clamped (point neutre serré).

O : point médium.

P : puissance.

PCC : point de couplage commun.

PF : puissance de filtre.

PL : puissance de la charge.

PLL : phase-Locked Loop (boucle à verrouillage de phase).

P_{pv} : puissance de photovoltaïque.

PV : Photovoltaïque.

S: interrupteur.

T: transistor.

THD : total harmonic distortion (taux de distorsion harmonique).

V : tension.

VCO : Voltage Controlled Oscillator (oscillateur commandé en tension).

Vdc : tension continue.

V_f : La tension de sortie du filtre actif.

W : pulsation.

Liste des notations et symboles

ω : pulsation.

$(S1, S2, S3, S4)$: les signaux de commande.

α : est le rapport cyclique.

Δe : changement d'erreur.

Δu : changement de contrôle.

Θ : angle de rotation.

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau III.1: Etat de commutation pour onduleur triphasé de type T à trois niveaux	21
Tableau III.2: Règle de base du contrôleur à logique floue	31
Tableau IV.1: Les résultats approfondis de la situation pour chaque intervalle du temps.	42

Liste des figures

Liste des figures

<i>Figure I.1 : Différents types de cellules photovoltaïques.</i>	4
<i>Figure I.2 : Système PV autonome.</i>	5
<i>Figure I.3 : Système PV connecté au réseau.</i>	6
<i>Figure I.4 : Système PV connecté au réseau-Structures PV à un seul étage.</i>	7
<i>Figure I.5 : Convertisseur de puissance de tension et de courant</i>	8
<i>Figure I.6 : Schéma de convertisseur élévateur <<Boost>>.</i>	9
<i>Figure I.7 : Les types de filtre passif.</i>	11
<i>Figure II.1 : Modèle d'une cellule PV.</i>	13
<i>Figure II.2 : Caractéristiques I-V et P-V d'un module PV dans les conditions standards.</i>	15
<i>Figure II.3 : Schéma de base d'un Boost associé au GPV.</i>	16
<i>Figure II.4 : Circuit électrique équivalent de la première étape.</i>	16
<i>Figure II.5 : Circuit électrique équivalent de la deuxième étape.</i>	17
<i>Figure II.6 : structure d'un onduleur à trois niveaux.</i>	18
<i>Figure III.1 : Système photovoltaïque connecté au réseau avec onduleur de type T à trois niveaux.</i>	20
<i>Figure III.2 : Bloc de contrôle.</i>	22
<i>Figure III.3 : Schéma représentant le principe de séparation des puissances.</i>	24
<i>Figure III.4 : Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées.</i>	25
<i>Figure III.5 : Boucle fermée de réglage de la tension continue</i>	26
<i>Figure III.6 : Boucle de régulation de la pulsation angulaire</i>	27
<i>Figure III.7 : Structure d'un régulateur flou.</i>	28
<i>Figure III.8 : la fonction d'appartenance</i>	31
<i>Figure IV.1 : La puissance photovoltaïque et le profil d'irradiance.</i>	35
<i>Figure IV.2 : Les puissances du filtre, photovoltaïque, ligne et source.</i>	36
<i>Figure IV.3 : Les courants triphasés du ligne, filtre et source et leurs THD.</i>	37
<i>Figure IV.4 : Courant triphasé du filtre et du réseau AC</i>	38
<i>Figure IV.5 : Tension et courant d'une phase de la source.</i>	39
<i>Figure IV.6 : la tension DC.</i>	39

Introduction Générale

Introduction Générale

L'énergie est indispensable à la vie de tout le monde, peu importe quand et où ils sont. L'augmentation constante de la demande en énergie électrique pose de nombreux défis dans la production, le transport et l'utilisation de celle-ci. En effet, il est nécessaire de coordonner des efforts pour assurer la qualité et la stabilité de l'offre des compagnies d'électricité. Pour répondre à ces besoins, il est intéressant d'explorer simultanément, lorsque les conditions s'y prêtent, plusieurs ressources énergétiques disponibles localement ou à proximité.

L'essor des énergies renouvelables encourage la diversification des sources d'énergie renouvelables telles que la biomasse, la géothermie, l'éolienne et le photovoltaïque ainsi que l'intégration des systèmes hybrides connectés au réseau qui ne polluent pas l'atmosphère pendant et après l'utilisation pour assurer un approvisionnement en électricité fiable et durable.

La production d'énergie restera un défi très important dans les années à venir car elle est utilisée en continu presque partout, c'est à dire dans les secteurs industriels, résidentiels et commerciaux.

Notre travail porte sur un système photovoltaïque qui est une alternative intéressante à l'énergie des combustibles fossiles.

Pour atteindre cet objectif, nous avons subdivisé ce travail en quatre chapitres :

- le premier chapitre aborde deux titres dont le premier est sur les systèmes photovoltaïques connectés au réseau et le deuxième sur la pollution harmonique dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

- Le deuxième chapitre est consacré pour la modélisation d'une cellule photovoltaïque ainsi que des convertisseurs tel que l'hacheur et l'onduleur.

- le troisième chapitre aborde la commande.

- Le quatrième chapitre est consacré pour la simulation de ce système.

Finalement, on termine par une conclusion générale, on rappellera les principaux résultats obtenus et on donnera les éventuelles perspectives.

Chapitre I
Généralités sur un système PV

Introduction

L'énergie solaire est disponible sur toute la surface de la terre comme source d'énergie qui se développe très rapidement, écologique, durable, illimitée avec une grande souplesse de production variant de milliwatts aux mégawatts, silencieuse et gratuite avec un minimum d'entretien.

L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.

Néanmoins, elle présente plusieurs inconvénients ; notamment le fait que la technologie coûte actuellement beaucoup plus cher que les sources traditionnelles, s'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente et même les composants du système sont difficiles à recycler et elle est finalement inadaptée à des usages très consommateurs en fonction des conditions météorologiques, avec une production variable tout au long de la journée et ça diffère d'une région à une autre.

I.1. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

I.1.1. Cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque « des composants optoélectroniques » réalisés à l'aide des composants semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse, sous forme de photons, en énergie électrique.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et son vieillissement [1].

Cela se fait en trois étapes :

- ✓ Absorption des photons de la lumière solaire.
- ✓ Conversion de l'énergie reçue en énergie électrique.
- ✓ Récupération des particules dans un circuit électrique externe [2].

La cellule individuelle ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules

sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

Le comportement électrique d'une cellule dépend de deux types de paramètres dont :

- ✓ Des paramètres externes tels que le flux solaire et la température.
- ✓ Des paramètres internes tels que la résistance série, la résistance shunt [3].

I.1.2. Différents types de cellules photovoltaïques

Toutes les cellules sont créées à partir de matériaux semi-conducteurs. La plupart du temps, c'est le silicium (Si) qui est utilisé mais on rencontre aussi le sulfure de cadmium (CdS), le tellure de cadmium (CdTe), des alliages de cuivre indium et selenium (CIS)... on peut distinguer trois types de cellules comme la montre la figure (I.1). Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres.

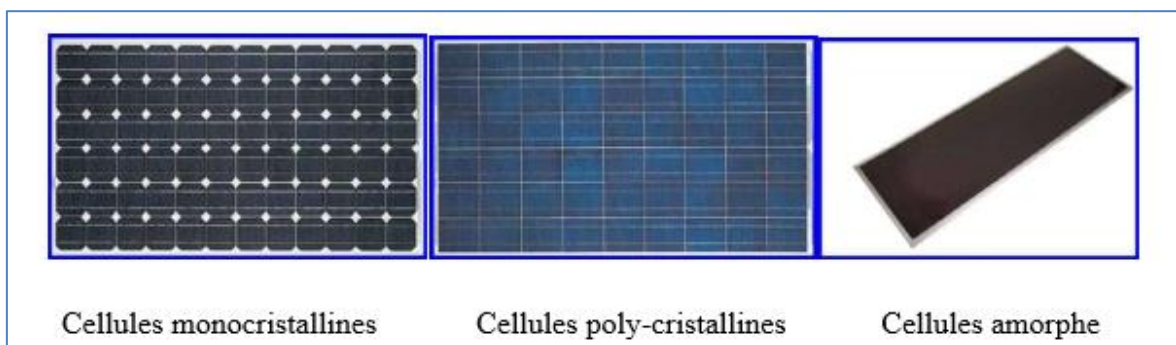


Figure I.1 : Différents types de cellules photovoltaïques.

I.1.3. Critères de choix d'une centrale photovoltaïque

- ✓ La présence ou non d'une source d'énergie classique.
- ✓ La présence ou non d'un dispositif de stockage.
- ✓ Type de sources d'énergie renouvelables utilisées.
- ✓ Le consommateur électrique alimenté.

I.1.4. Types de protection dans les installations photovoltaïques

Il existe deux types de protection couramment utilisés dans les installations photovoltaïque :

- ✓ La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge

en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

✓ Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant l'échauffement de la cellule, ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante [4].

I.1.5. Classification des systèmes photovoltaïques

I.1.5.1. Systèmes autonomes

Ce sont des systèmes qui travaillent 24h/24h et qui doivent être capable de fournir du courant aux consommateurs pendant la période de l'année de moindre irradiation lumineuse. Ils fonctionnent indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergies. La configuration d'un tel système est représentée sur la figure (I.2). On y trouve une source photovoltaïque, qui débite sur un convertisseur AC/AC qui doit stabiliser la tension continue de sortie et extraire le maximum de puissance PV. Ce convertisseur fournit la puissance DC à des charges à courant continu. L'excès de puissance peut être envoyé vers des batteries de stockage. Ce système peut également alimenter des charges à courant alternatif via un convertisseur DC/AC qui doit adapter la tension et la fréquence aux besoins de cette charge[5].

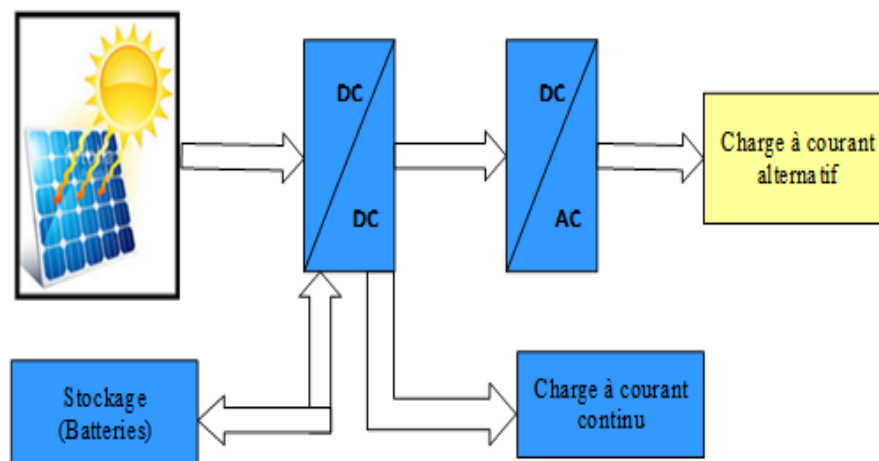


Figure I.2 : Système PV autonome.

I.1.5.2. Système connecté au réseau

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement.

Ces systèmes couplés directement au réseau électrique comme le montre la figure (I.3). En général, l'électricité générée n'est pas stockée mais fournie au réseau local de distribution.

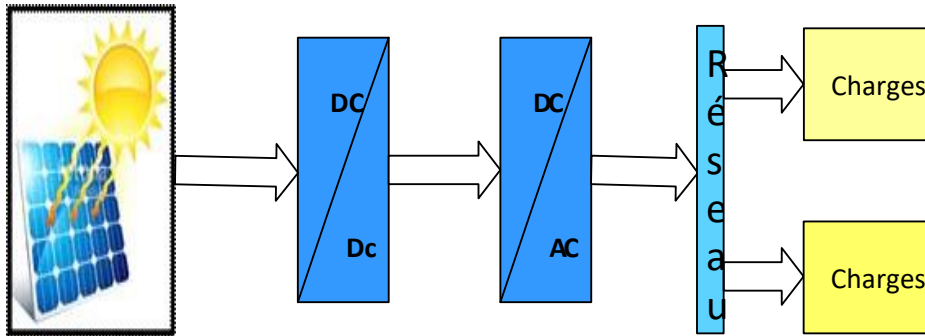


Figure I.3 : Système PV connecté au réseau.

I.1.6. Configuration d'un système PV connecté au réseau

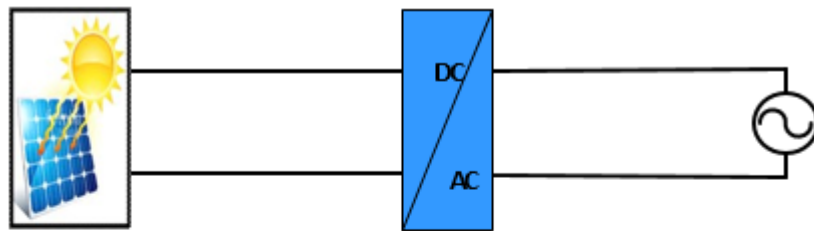
La configuration d'un système PV connecté au réseau peut se faire selon 3 critères :

- ✓ Le nombre d'étages de puissance ;
- ✓ Le type d'isolation ;
- ✓ La topologie d'onduleur.

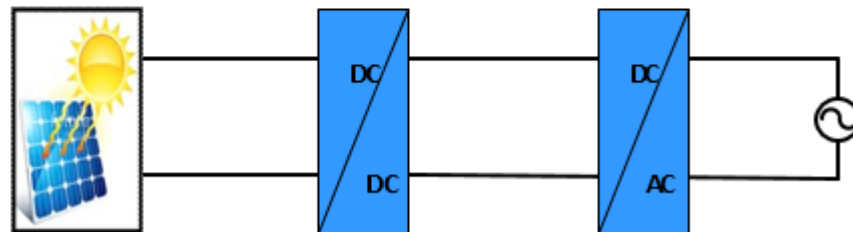
I.1.6.1. Nombre d'étages de puissance

Il existe deux principales structures de connexion des systèmes PV au réseau électrique (Figure I.4) :

La première structure PV en un seul étage utilise un seul convertisseur (onduleur). En effet, cette structure est simple mais elle ne peut pas satisfaire simultanément et efficacement toutes les fonctions.



(a) Structures PV à un seul étage.



(b) Structures PV à double étage

Figure I.4 : Système PV connecté au réseau-Structures PV à un seul étage.

La deuxième structure PV en double étage utilise deux convertisseurs (hacheur et onduleur). Cette structure est efficace car elle permet à l'onduleur de fonctionner dans les meilleures conditions.

I.1.6.2. Type d'isolation

Les principaux avantages de l'utilisation des transformateurs sont : une meilleure adaptation entre les tensions de système PV et le réseau électrique. Une isolation galvanique, est une solution efficace au problème du courant de fuite causé par le condensateur de parasite au sol du panneau PV.

I.1.6.3. Topologie des systèmes PV

Topologie modulaire : suivant le concept de topologie modulaire, chaque module solaire disposé d'un onduleur individuel.

Topologie centralisée : dans cette topologie, un seul onduleur est connecté au réseau PV.

Topologie de chaîne : suivant le concept de topologie des chaînes, chaque chaîne est connectée à un onduleur.

Topologie multi-chaînes : suivant ce concept, chaque chaîne est connectée à un convertisseur DC-DC pour amplifier la tension et la poursuite le MPP.

Topologie maître-esclave : dans cette topologie, les onduleurs parallèles sont connectés au module PV et le nombre d'onduleurs de fonctionnement est choisi de telle sorte que si un onduleur tombe en panne, les autres onduleurs peuvent délivrer toute l'énergie PV.

I.1.7. Convertisseurs statiques

Dans cette époque, l'énergie est devenue l'une des choses importantes dans la vie quotidienne de l'homme, alors c'est devenu nécessaire d'améliorer les performances des dispositifs de l'électronique de puissance, cette dernière peut contribuer pour la bonification de signal électrique.

Un convertisseur statique consiste en un appareil composé de semi-conducteurs qui convertit de l'énergie électrique disponible en une forme adaptée pour alimenter une charge spécifique. On peut leur permettre de changer la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique.

I.1.7.1. Onduleur

Le mot "onduleur" se réfère à un convertisseur statique qui transforme un courant continu en un courant alternatif. Dans le cas d'un système PV, il est constitué d'une commande MPPT.

Il existe deux types de convertisseurs qui peuvent agir comme des filtres actifs, (figure I.5) [6].

- ✓ Onduleur de tension
- ✓ Onduleur de courant

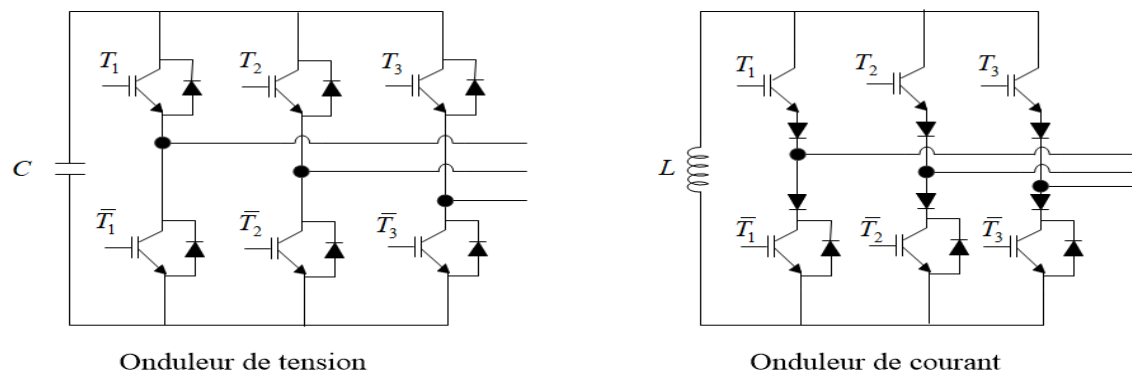


Figure I.5 : Convertisseur de puissance de tension et de courant

En moyenne, l'onduleur a une durée de vie de 8 à 12 ans. La durée de vie est appelée à augmenter avec l'utilisation de composants qui sont toujours de meilleure qualité et plus résistants aux hausses de température.

Actuellement l'inconvénient majeur des onduleurs conventionnels (à deux niveaux) est l'obtention d'une tension non sinusoïdale à sa sortie, ce qui provoque une dégradation du régime de fonctionnement de certaines charges. Ces tensions de sortie sont très riches en harmonique, d'où la nécessité de les réduire. Ainsi ils sont limités aux applications de faibles et moyennes puissances [7].

I.1.7.2. Hacheur

L'hacheur ou convertisseur continu -continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

Le réglage de l'impédance d'entrée du générateur PV pour obtenir sa puissance maximale se fait généralement avec un convertisseur boost DC-DC ou dit hacheur parallèle, figure (I.6), le plus couramment utilisé dans ce domaine. Un convertisseur boost convertit une tension continue en une tension continue supérieure [8].

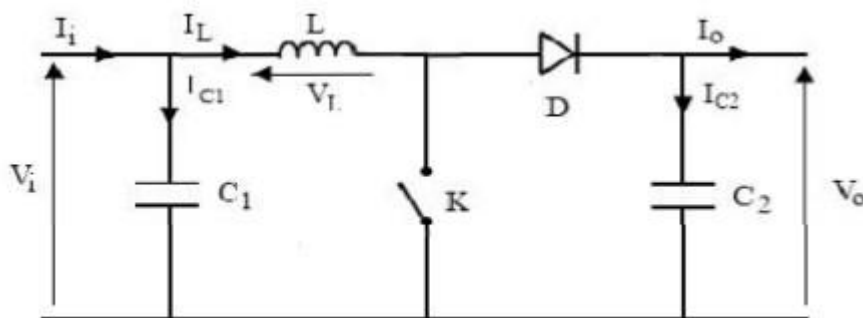


Figure I.6 : Schéma de convertisseur élévateur <<Boost>>.

I.2. Pollution harmonique dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Les perturbations ou dite harmoniques sont tous les phénomènes qui peuvent temporairement ou définitivement modifier l'onde de tension dans un réseau électrique [9].

I.2.1. Origines des harmoniques

Les harmoniques sont produites par des charges non linéaire caractérisées par l'absorption d'un courant de forme non sinusoïdale. En effet, les équipements industriels,

les onduleurs, les variateurs de vitesse et toutes les charges composées de composants électroniques de puissance [9].

I.2.2. Effets des harmoniques

Ces dernières génèrent des courants harmoniques qui circule vers le réseau d'alimentation, déforment l'allure du courant de source et polluent les utilisateurs connectés à ce même réseau, entraînant des effets comme les tensions harmonique, l'échauffement des câbles et moteurs, le papillotement d'afficheur des appareils électroniques et même les déclenchement intempestif des circuits de protection [9].

I.2.3. Les solutions contre les harmoniques

Pour éliminer les harmoniques il faut utiliser des filtres :

I.2.3.1. Filtre actif

Il est composé des composants actifs comme les amplificateurs opérationnel, thyristors et les transistors on peut dire qu'il est un convertisseur statique.il produit des harmoniques de même rang et amplitude que les harmoniques produit par les charges non linéaires mais en opposition.

Les principales catégories de filtres actifs sont les suivantes :

- Filtres actifs série
- Filtres actifs parallèles
- Filtrage universel
- Filtres actifs hybrides

I.2.3.2. Filtres passifs

Ce type de filtre consiste à combiner des réactances capacitives et inductives pour bloquer la propagation des harmoniques indésirables, ses types se présentent dans la figure (I.7) [6].

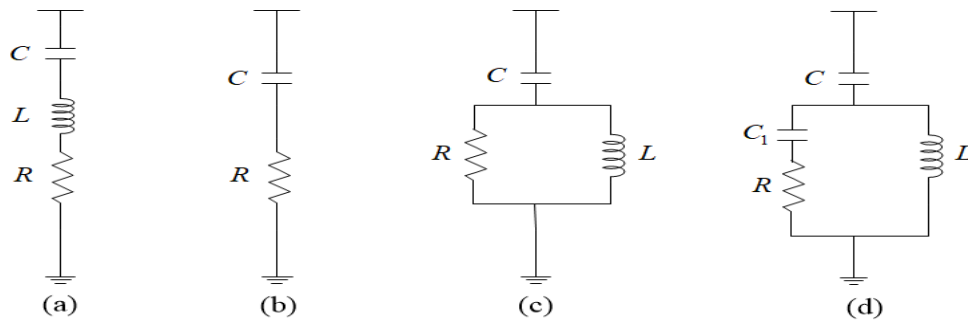


Figure 1.7 : Les types de filtre passif.

- (a) Filtre résonant.
- (b) Filtre amorti de 1er ordre.
- (c) Filtre amorti de 2ème ordre.
- (d) Filtre amorti de 3ème ordre.

Conclusion

Afin de compenser la puissance réactive et les courants harmoniques générés par les charges non linéaires, nous proposons un filtrage actif parallèle. Les avantages qu'il représente sont l'adaptabilité et la flexibilité aux changements de charges polluantes.

Dans ce premier chapitre, nous avons exposé des généralités sur les systèmes PV tel que la cellule PV, les types et les différentes configurations, ensuite on a traité les convertisseurs statiques et quelques mentions sur ses types et finalement on a abordé la pollution harmonique dans les réseaux et les solutions proposées contre ses effets indésirables.

Chapitre II
Modélisation d'un système PV

Introduction

La modélisation est une phase importante, avant toute phase de dimensionnement optimal, pour la détermination des caractéristiques optimales d'un système photovoltaïque.

II.1. Modélisation du générateur PV

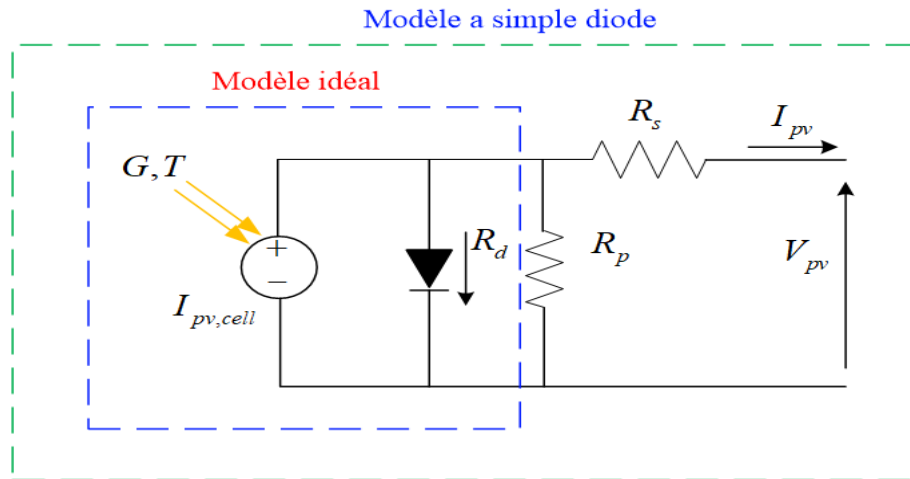


Figure II.1 : Modèle d'une cellule PV.

L'équation (II.1) donne la relation courant-tension pour la cellule PV d'un modèle idéal illustré à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.re** (II.1).

$$I = I_{pv,cell} - I_{o,cell} \left[e^{\left(\frac{qV}{aKT} \right)} - 1 \right] \tag{II.1}$$

Où :

$I_{pv,cell}$: est le courant généré par la lumière incidente (il est directement proportionnel au rayonnement solaire) ;

$I_{o,cell}$: est le courant de fuite de la diode ;

K : est la constante de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K) ;

T : est la température effective de la cellule, mesurée en Kelvin [K] ;

q : est la charge de l'électron, mesurée en Coulomb ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C) ;

a : est le facteur d'idéalité de la diode.

Le modèle mathématique d'un module PV est décrit par l'équation (II.2)

$$I = I_{pv} - I_o \left[e^{\left(\frac{qV + IR_s}{aN_sKT} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \tag{II.2}$$

Où :

N_s : est le nombre de cellules montées en série.

Le courant généré par la cellule solaire PV dépend de l'irradiance ($G(\text{W}/\text{m}^2)$) et de la température (T (K)), comme décrit dans l'équation (II.3).

$$I_{pv} = \left(I_{pv,n} + K_I \Delta_T \right) \frac{G}{G_n} \quad (\text{II.3})$$

Où :

$\Delta_T = T - T_n$, avec T_n : est la température nominale ;

G_n : est l'irradiance nominale ;

K_I : est le courant de court-circuit / coefficient de température ;

$I_{pv,n}$: est le courant solaire généré à l'état nominal (G_n, T_n) ;

Le courant de saturation de la diode I_0 dépend de la température, comme donné dans l'équation (II.4).

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{aK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (\text{II.4})$$

Avec E_g l'énergie de gap, par exemple l'énergie de gap de Si polycristallin est de 1.12 eV.

Le courant de saturation de la diode nominale $I_{0,n}$ est donné par l'équation suivante :

$$I_{0,n} = \frac{I_{cc,n}}{\exp \left(\frac{V_{co,n}}{\alpha V_{t,n}} \right) - 1} \quad (\text{II.5})$$

Où :

$V_{t,n}$: est la tension thermique nominale.

Le courant de saturation des cellules PV est donné dans l'équation (II.6) :

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta_T}{\exp \left(\frac{K_v \Delta_T}{\alpha V_t} + V_{co,n} \right) - 1} \quad (\text{II.6})$$

Où :

$I_{cc,n}$: est le courant de court-circuit nominal ;

$V_{co,n}$: est la tension du circuit ouvert nominale ;

K_v : est la tension de circuit ouvert / coefficient de température.

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques.

Pour modéliser un panneau PV comme un GPV, il faut utiliser l'équation (II.7).

$$I = N_{pp} I_{pv} - N_{pp} I_0 \left[\exp \left(\frac{N_{ss} V + IR_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{N_{ss} \alpha V_t} \right) - 1 \right] - \frac{N_{ss} V + IR_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{R_p \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (II.7)$$

Où :

N_{ss} : est le nombre de modules montés en série ;

N_{pp} : est le nombre de modules montés en parallèle.

Les modules photovoltaïques peuvent être modélisés comme des sources de courant qui varient en fonction de la température et de l'éclairement solaire

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (II.2) montre des courbes I-V et P-V typiques pour des fluctuations de température et d'intensité lumineuse

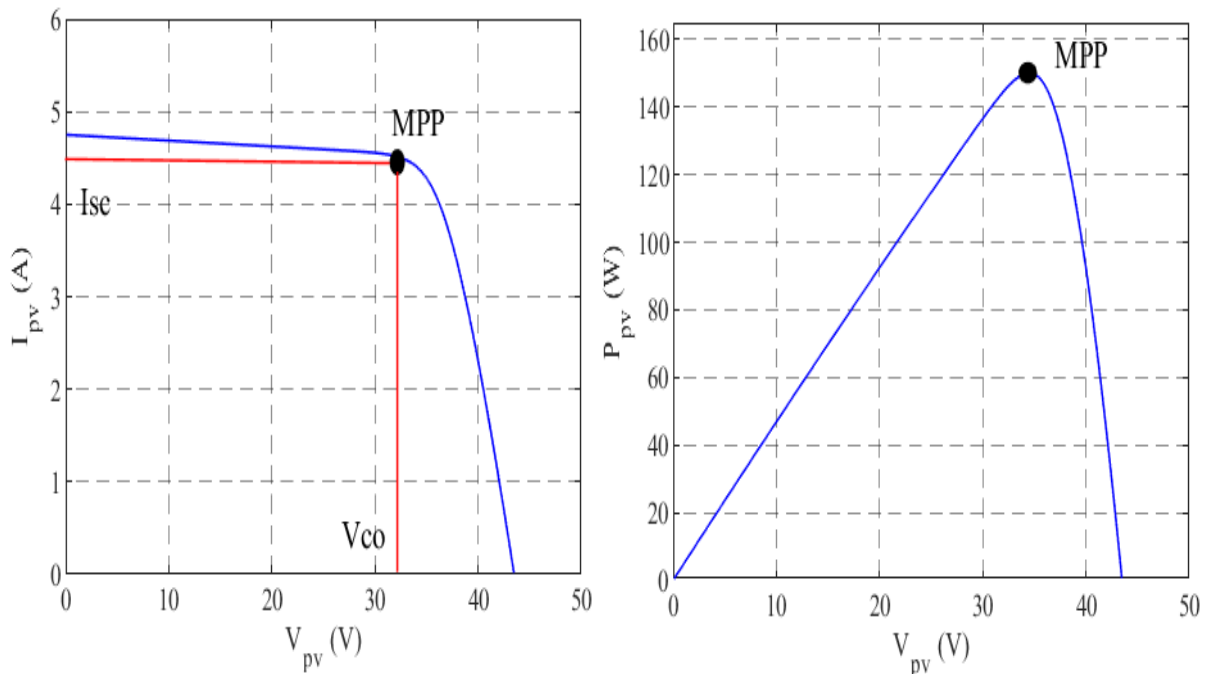


Figure II.2 : Caractéristiques I-V et P-V d'un module PV dans les conditions standards.

II.2. Modélisation du Convertisseur DC-DC (boost)

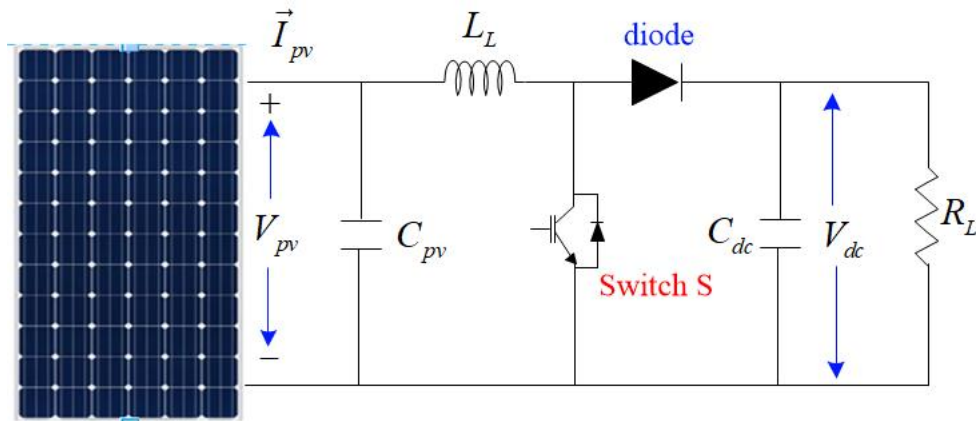


Figure II.3 : Schéma de base d'un Boost associé au GPV.

Première étape :

La figure (II.3) montre l'état où l'interrupteur S est fermé, le courant dans l'inductance augmente et l'énergie magnétique est stockée, ce qui entraîne le blocage de la diode et la déconnexion de la charge.

La loi des mailles permet l'expression suivante de l'équation de la tension d'entrée :

$$V_e = L \frac{dI_L}{dt} \quad (II.8)$$

Le courant I_L augmente d'une valeur ΔI_L , donnée par :

$$\Delta I_L = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_e dt}{L} = \frac{V_e \alpha T}{L} \quad (II.9)$$

. Où :

α ($0 < \alpha < 1$) est le rapport cyclique

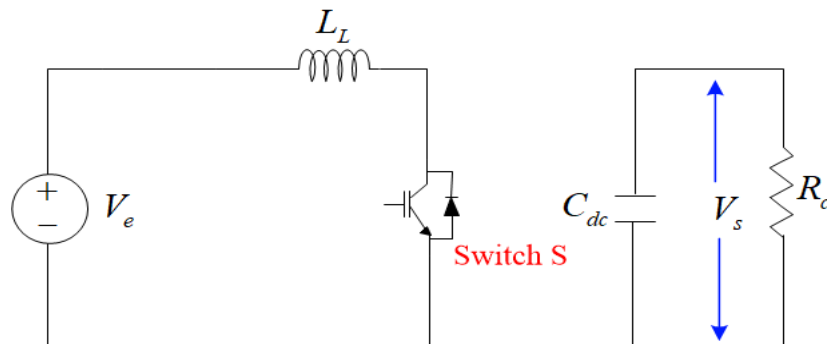


Figure II.4 : Circuit électrique équivalent de la première étape.

Deuxième étape :

La figure (II.4) montre l'état où l'interrupteur S est ouvert. L'énergie stockée dans l'inductance est transférée au condensateur.

La variation du courant I_L dans l'état bloqué peut être donnée par :

$$\Delta I_{Loff} = \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{(V_e - V_s) dt}{L} = \frac{(V_e - V_s)(1-\alpha)T}{L} \quad (II.10)$$

Où :

$$V_e - V_s = L \frac{dI_L}{dt} \quad (II.11)$$

Le courant I_L est le même dans le cycle de commutation, ce qui permet d'écrire :

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loff} = \frac{V_e \alpha T}{L} + \frac{(V_e - V_s)(1-\alpha)T}{L} \quad (II.12)$$

Le rapport entre la tension d'entrée et la tension de sortie est donnée par :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (II.13)$$

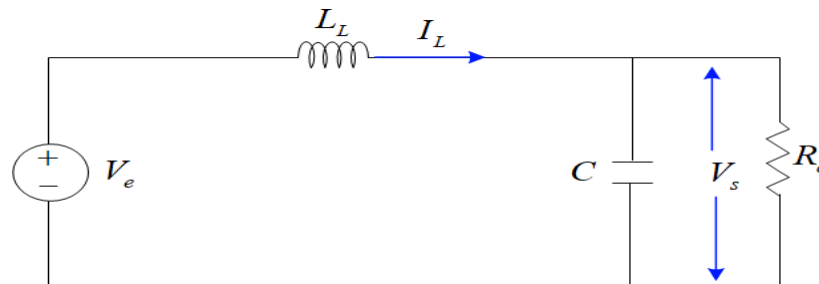


Figure II.5 : Circuit électrique équivalent de la deuxième étape.

II.3. Onduleur à trois niveaux

Les onduleurs multiniveaux sont une tendance récente pour les topologies de filtres actifs [10]. Les onduleurs à trois niveaux sont de plus en plus populaires pour diverses applications, telles que les entraînements de machines et les compensateurs de facteur de puissance [11], [12]. Les onduleurs multiniveaux ont l'avantage de réduire les harmoniques générés par le filtre actif en produisant plus de niveaux de tension que les convertisseurs classiques [13]. De plus, ils peuvent réduire les tensions et courants nominaux des semi-conducteurs et les exigences de fréquence de commutation [14]. La **Erreur ! Source du envoi introuvable.** (II.6) montre la disposition du circuit de puissance pour l'onduleur NPC à trois niveaux.

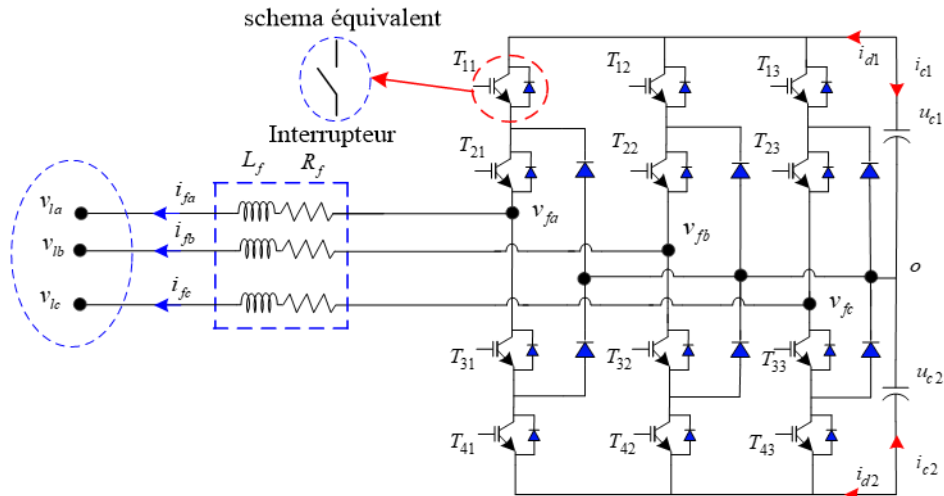


Figure II.6 : structure d'un onduleur à trois niveaux.

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque a été élaborée à partir des modèles de la littérature ; cette modélisation est une étape essentielle car permet d'introduire le modèle de chaque sous-système puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutants.

L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

L'outil ainsi réalisé sera utilisé pour déterminer le dimensionnement optimal d'un tel système pour des cas d'applications, ceci est l'objectif du troisième chapitre.

Chapitre III

La commande du filtre actif dans la chaîne de conversion

Introduction

Les systèmes photovoltaïques convertissent la lumière solaire en électricité grâce à des cellules solaires. Pour maximiser cette conversion, une gestion et un contrôle bien précis sont nécessaires.

Les performances d'un filtre actif dépendent en grande partie de l'isolation du signal harmonique provoqué par la charge. Il est donc impératif d'identifier ce signal afin d'introduire son image avec amplitude et phase inverse dans le réseau électrique. Cependant, la fiabilité de la méthode d'identification garantit une bonne compensation des harmoniques et améliore certainement la qualité du signal du réseau.

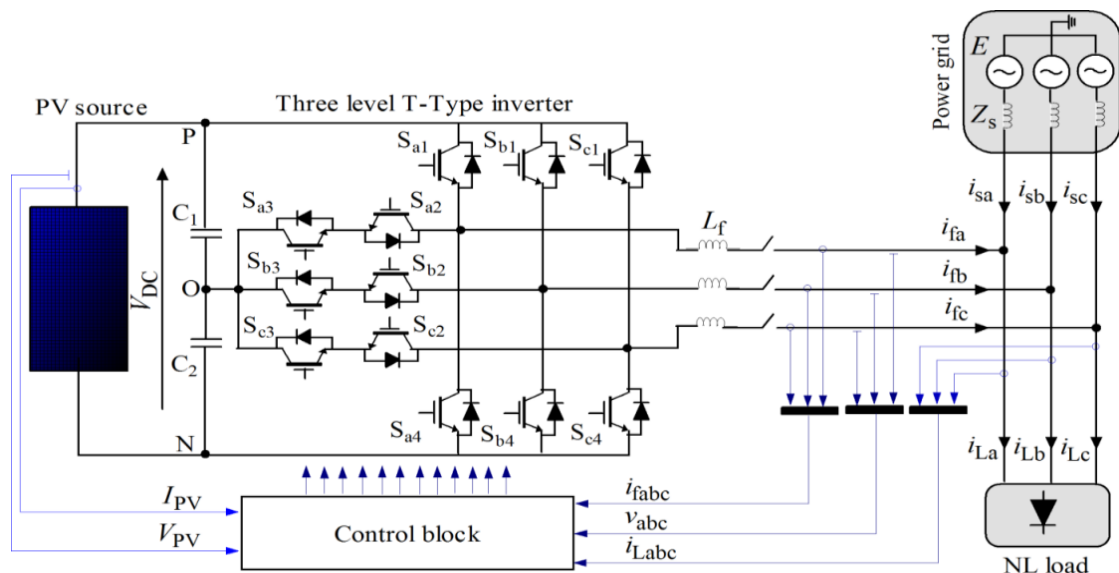


Figure III.1 : Système photovoltaïque connecté au réseau avec onduleur de type T à trois niveaux.

III.1. Description du système

Dans la figure (III.1), le circuit d'alimentation du système est illustré ; la partie principale de ce circuit est l'onduleur triphasé de type T à trois niveaux connectant le système photovoltaïque au réseau via un filtre passif de premier ordre. Le circuit intermédiaire de l'onduleur utilise deux condensateurs pour réduire les fluctuations de tension du générateur photovoltaïque. Celui-ci dispose de 126 panneaux dont 21 en série et 6 en parallèle. Dans des conditions de test standard (irradiation de 1 kW/m² et température de 25 C), le générateur photovoltaïque fournit une puissance de 28 kW et une tension continue de 613 V. Pour tester

la fonctionnalité de filtrage des harmoniques, une charge non linéaire est également connectée au point de couplage commun (PCC).

L'onduleur de type T à trois niveaux de la figure (III.1) se compose d'un onduleur en pont complet à deux niveaux et de commutateurs d'alimentation anti-série (auxiliaires). Ainsi, avec leurs diodes antiparallèles, quatre interrupteurs de puissance (Sx1 à Sx4) forment chaque branche [15].

Du côté DC, les condensateurs C1 et C2 divisent l'entrée DC et donnent accès au point médian O du bus DC. Ce point représente le troisième niveau de tension, en plus des deux autres niveaux, P et N.

Le processus de commutation qui assure une tension de sortie à trois niveaux est indiqué dans le tableau (III.1) pour une phase [15].

États de commutations	États des commutateurs (x=a, b, c) (1=ON, 0=OFF)				tension aux bornes
	Sx1	Sx2	Sx3	Sx4	
P	1	1	0	0	$V_{dc}/2$
O	0	1	1	0	0
N	0	0	1	1	$-V_{dc}/2$

Tableau III.1: Etat de commutation pour onduleur triphasé de type T à trois niveaux

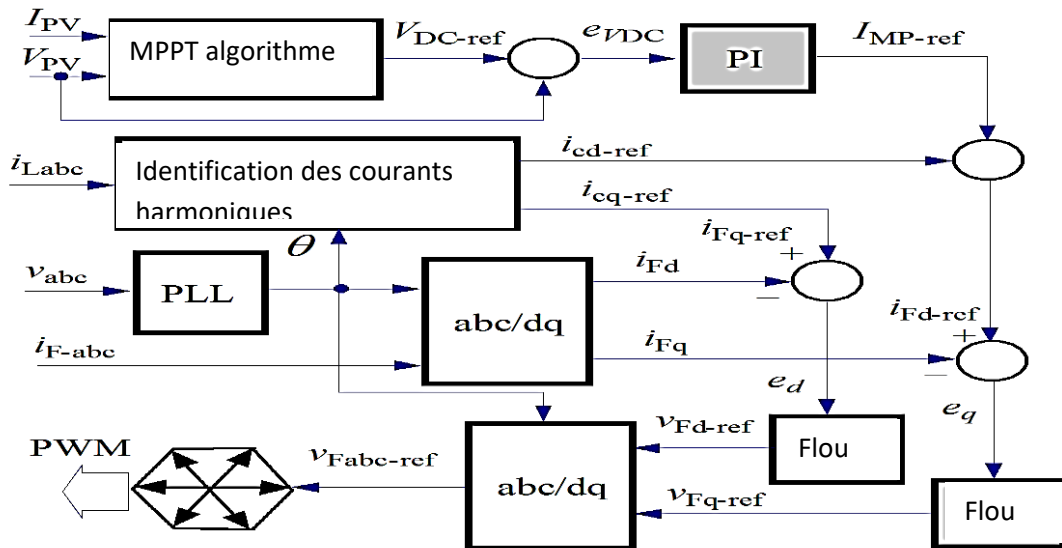


Figure III.2 : Bloc de contrôle.

La stratégie de contrôle proposée est conçue pour assurer les objectifs principaux suivants [15] :

- Extraire et contrôler la puissance maximale de la source PV quelles que soient les conditions ambiantes.
- Améliorer la qualité de l'énergie dans le PCC en atténuant le courant harmonique de la charge non linéaire ou de l'onduleur lui-même.

Selon les objectifs recherchés, le bloc de contrôle de la figure (III.2) contient un contrôleur MPPT, un contrôleur de tension DC, un contrôleur de courant AC, une PLL et enfin une modulation d'onduleur PWM.

III.2. Identifications des courants harmoniques

L'étape d'identifications des courants harmoniques est fondamentale dans le processus de filtrage et pour le calcul des courants de référence pour l'onduleur. Elle consiste à isoler une partie souhaitée du signal global pour en extraire des informations.

Les performances du filtre actif dépendent amplement de l'isolation du signal harmonique causé par la charge. Donc, il est impératif d'identifier ce signal afin d'injecter son image, en amplitude et en opposition de phase, dans le réseau électrique.

Cependant la fiabilité de la méthode d'identification garantit une bonne compensation des harmoniques, et améliore inévitablement la qualité du signal du réseau.

III.2.1. Méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire

La commande p-q est une méthode temporelle utilisée pour éviter les difficultés des calculs lors de la mise en œuvre des méthodes fréquentielles telle que la transformées de Fourier discrète ou rapide[16][17][18].

Par l’application de la transformation de Concordia sur les systèmes triphasés constitués par les courants de ligne et les tensions simples, à un système diphasé (repère α - β), afin de calculer les puissances imaginaire et réelle instantanées. Où toutes les deux sont constituées d’une composante constante créée par les fondamentaux des courants et une composante ondulée créée par les courants harmoniques.

La transformation $(\alpha, \beta, 0)$ permet d’écrire, les relations des tensions suivantes :

$$\begin{pmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{pmatrix} \tag{III.1}$$

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_{1\alpha} \\ I_{1\beta} \end{pmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{l1} \\ I_{l2} \\ I_{l3} \end{pmatrix} \tag{II.2}$$

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_{1\alpha} \\ I_{1\beta} \end{pmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{11} \\ I_{12} \\ I_{13} \end{pmatrix} \text{Où,}$$

v_α, v_β et I_α, I_β les composantes orthogonales dans le repère α, β respectivement, des tensions duréseau électrique v_s et des courants absorbés par les charges polluantes I_l .

Et, les composantes (v_0 et I_0) d’indice (0) représentent les composantes homopolaires du système triphasé.

La puissance active instantanée $P(t)$, est définie par la relation suivante :

$$p(t) = v_{s1}I_{l1} + v_{s2}I_{l2} + v_{s3}I_{l3} \tag{III.3}$$

Cette expression peut être écrite dans le repère stationnaire par :

$$\begin{cases} p(t) = v_{s\alpha}I_{l\alpha} + v_{s\beta}I_{l\beta} \\ p_0(t) = v_{s0}I_{l0} \end{cases} \tag{III.4}$$

Avec $P(t)$ la puissance réelle instantanée et $P_0(t)$ la puissance homopolaire

instantanée.

L'avantage de la transformation dans le repère stationnaire est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension.

De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \llbracket (v_{s1} - v_{s2})I_{l3} + (v_{s2} - v_{s3})I_{l1} + (v_{s3} - v_{s1})I_{l2} \rrbracket = v_{s\alpha}I_{l\beta} - v_{s\beta}I_{l\alpha} \quad (\text{III.5})$$

A partir des relations 4 et 5 nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{l\alpha} \\ I_{l\beta} \end{pmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Dans le cas général, chacune des puissances p et q comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Où :

\bar{P} puissance continue de la composante fondamentale active du courant et de la tension.

\bar{q} La puissance continue de la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.

\tilde{P} et \tilde{q} : Les puissances alternatives correspondantes à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Pour séparer les puissances actives et réactives, il est indispensable de connaître les fréquences des pulsations des puissances instantanées définit par la relation.

En considérant que le réseau comprend trois fils (composantes homopolaires nulle). Ainsi la séparation des puissances est réalisée le principe de la figure suivante (III.3).

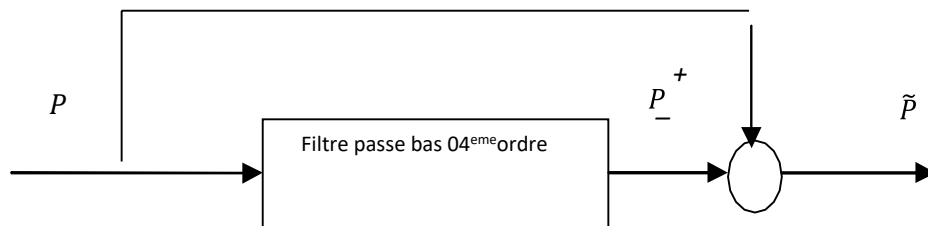


Figure III.3 : Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

La figure (III.4) représente le schéma de principe de la méthode des puissances instantanées dans le cas de compensation des courants harmoniques sans compensation de l'énergie réactive. L'utilisation d'un seul filtre passe-bas pour filtrer la puissance active instantanée assure la compensation à la fois de l'énergie réactive avec le filtrage des harmoniques.

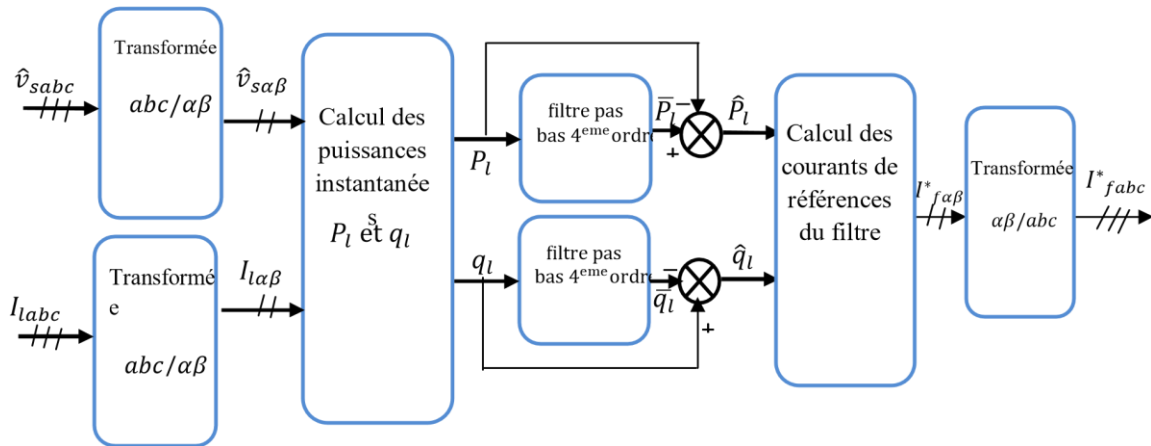


Figure III.4 : Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées.

III.3. Algorithme de recherche de point de puissance maximale

L'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour optimiser la production d'énergie d'un champ photovoltaïque. Un convertisseur de puissance DC-DC est utilisé dans ce circuit, ce qui en fait une charge variable. Les techniques de point de puissance maximale (MPPT) visent à atteindre la tension et le courant du système photovoltaïque correspondant au point de puissance maximale, en fonction de différentes irradiances et températures. Deux variables de contrôle sont habituellement utilisées pour contrôler le point de puissance maximale (MPP). Chaque fois que la tension ou la puissance est mesurée, elle est à nouveau utilisée dans une boucle afin de déterminer si le module solaire est en position de puissance maximale.

La régulation MPPT a la capacité d'améliorer les performances des panneaux solaires jusqu'à 30 %. L'objectif est d'adopter une méthode MPPT qui permet d'ajuster automatiquement le rapport cyclique à sa valeur optimale, peu importe les variations atmosphériques qui peuvent survenir à tout moment du fonctionnement.

III.4. Régulation de la tension continue

La tension continue doit être régulée pour qu'elle soit maintenue constante. Sachant que le changement de cette tension est cause, principalement, lors l'échange de puissance active avec le réseau[19].

En suppose que les pertes au niveau de l'onduleur et du filtre de sortie soient négligeables. La relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes est :

$$p_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} c_{dc} v_{dc}^2 \right) \quad (III.8)$$

D'où sous la forme de *Laplace*, on a :

$$\begin{aligned} (S) &= \frac{1}{2} S C_{dc} v_{dc}^2 (S) \\ (s) &= \frac{1}{2} s c_{dc} v_{dc}^2 (s) \end{aligned} \quad (III.9)$$

Alors, on déduit la tension aux bornes du condensateur :

$$v_{dc}^2 = \frac{2p_{dc}}{c_{dc}s} \quad (III.10)$$

A partir de cette dernière relation, la boucle fermée de réglage de V_{dc} est montrée par la figure suivante (III.7) :

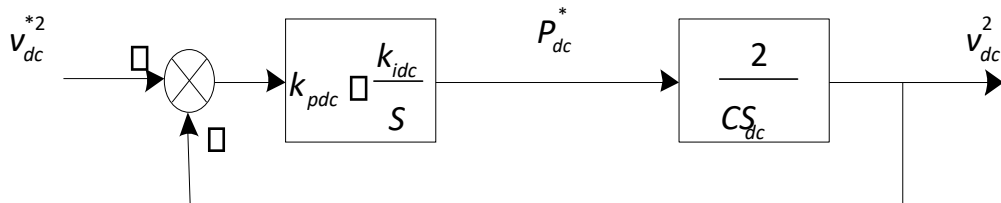


Figure III.5 : Boucle fermée de réglage de la tension continue

Soient, les trois tensions du réseau parfaitement sinusoïdales au point de raccordement:

$$\begin{pmatrix} v_{cha} \\ v_{chb} \\ v_{chc} \end{pmatrix} = v_{chmax} \begin{pmatrix} \sin wt \\ \sin(wt - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(wt + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (III.11)$$

En appliquant la transformation de Concordia on obtient après simplification et amauagement, d'abord les relations 12 qui après rotation, on aura 13 :

$$\begin{pmatrix} v_{ch\alpha} \\ v_{ch\beta} \end{pmatrix} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2}{3}} v_{chmax} \begin{pmatrix} \sin(wt) \\ -\cos(wt) \end{pmatrix} = \sqrt{3} v_{ch\,eff} \begin{pmatrix} \sin(wt) \\ -\cos(wt) \end{pmatrix} \quad (III.12)$$

$$\begin{pmatrix} v_{ch\,d} \\ v_{ch\,q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{ch\alpha} \\ v_{ch\beta} \end{pmatrix} \quad (III.13)$$

Où:

$$v_{ch\,d} = \sqrt{3} v_{ch\,eff} \sin(wt - \theta) \quad (III.14)$$

Avec $V_{ch\,d}$ et θ , respectivement la composante directe et la position angulaire estimée du vecteur tension.

En supposant que l'angle de phase $(\omega t - \theta)$ est très petit, on peut écrire $\sin(\omega t - \theta) = (\omega t - \theta)$ et alors on peut écrire 14 sous la forme suivante :

$$v_{ch\,d} = \sqrt{3} v_{ch\,eff} (wt - \theta) \quad (III.15)$$

Cependant, la régulation de la pulsation est réalisée grâce à la boucle suivante :

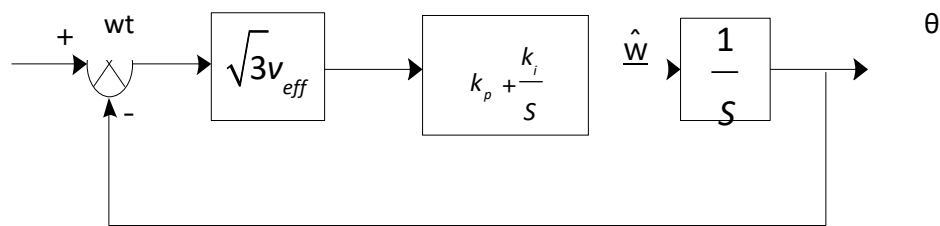


Figure III.6 : Boucle de régulation de la pulsation angulaire

D'où,

$$w = k_p + \left(\frac{k_i}{s}\right) \sqrt{3} v_{ch\,eff} (wt - \theta) \quad (III.16)$$

Et, donc la position angulaire est donnée par :

$$\theta = w \frac{1}{s} \tag{III.17}$$

Dans le cas du filtre actif shunt, la régulation des courants de référence et de tension continue aux bornes du condensateur est primordiale pour un bon fonctionnement. Ainsi pour pouvoir contrôler et réguler le FAP, nous avons besoin d'un régulateur flou.

III.5. Logique floue

Son principe général et la théorie de base de la logique floue englobent des aspects de la théorie des possibilités qui fait intervenir des ensembles d'appartenance appelés ensemble flous caractérisant les différentes grandeurs du système à commander ; et le raisonnement flou qui permet la génération de la commande adéquate ou la prise de décision [20].

III.5.1. Contrôle de la logique floue

Comme pour tout contrôleur à logique floue, la conception passe par trois étapes comme la montre la figure (III.7) de fuzzification qui convertissent les mesures réelles, à savoir l'erreur et sa transformation en variables linguistiques, en attribuant à chacune un ensemble de sous-ensembles flous. La base de règles et l'inférence, représentées par un ensemble de règles (IF...et...THAN) pour déterminer la décision floue en fonction de l'état d'entrée. Enfin, la défuzzification convertit la décision de sortie floue en valeur réelle.

Complexité du contrôle par logique floue réside généralement dans le choix de la mise à l'échelle des gains d'entrée-sortie et dans la définition des règles de contrôle flou. C'est la principale préoccupation de cette section [20].

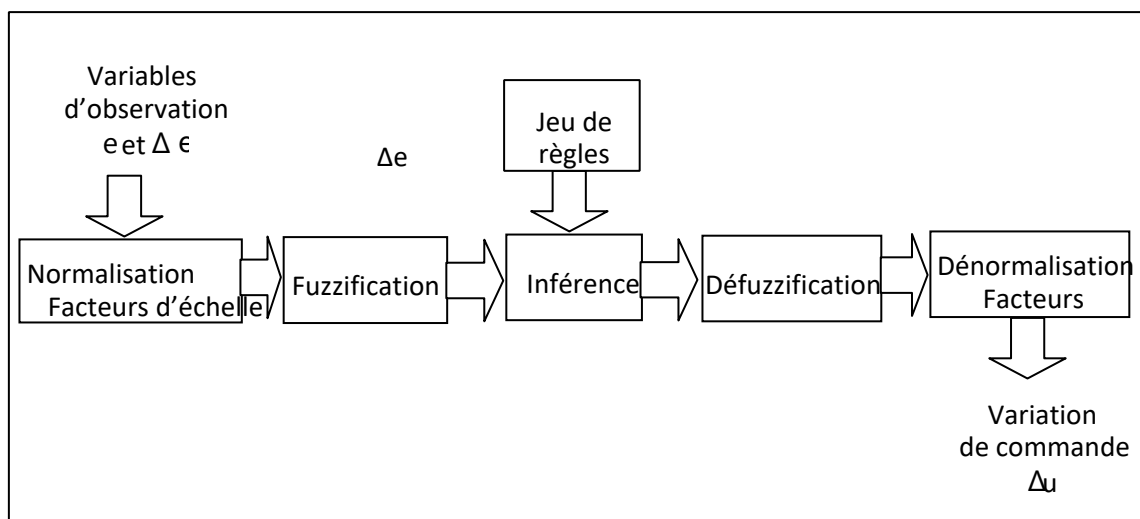


Figure III.7 : Structure d'un régulateur flou.

III.5.2. Facteur d'échelle

Pour un régulateur PI classique, la variable de contrôle est donnée sous la forme suivante, dans laquelle K_p et K_i , représentent respectivement les gains proportionnel et intégral :

$$u = K_p e + K_i \int e dt \quad (III.18)$$

Cette forme peut être réécrite en utilisant une approximation numérique comme :

$$u_k = K_p e_k + T_s K_i \sum_{j=1}^k e_j \quad (III.19)$$

Supposons e_k , comme l'erreur entre la référence (entrée) et la sortie au temps d'échantillonnage k . alors on peut écrire la sortie de changement d'erreur et de changement de contrôle comme suit :

$$\Delta e_k = e_k - e_{k-1} = y_{k-1} - y_k \quad (III.20)$$

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$$

A partir de (III.19) et (III.20). La sortie de changement de contrôle peut être développée comme :

$$\Delta u_k = k_p (e_k - e_{k-1}) + T_s K_i (\sum_{j=1}^k e_j - \sum_{j=1}^{k-1} e_j) \quad (III.21)$$

$$\Delta u_k = K_p \Delta e_k + T_s K_i e_k \quad (III.22)$$

Sinon, le contrôleur flou peut être représenté comme suit :

$$\Delta u_k = G_u \Delta U_k = H(G_e e_k + G_{\Delta e} \Delta e_k) \quad (III.23)$$

Dans cette expression, les gains G_e , $G_{\Delta e}$ et G_u sont les facteurs d'échelle respectivement pour l'erreur e_k , son changement Δe_k , et la sortie de changement de contrôle ΔU_k , F_n est la fonction d'entrée-sortie FLC. (Notez qu'il s'agit d'une fonction non linéaire). Par conséquent, un contrôleur PI flou peut être obtenu (FLC de type PI). En utilisant l'erreur e_k et sa modification Δe_k , comme entrées du FLC, tandis que sa sortie est un changement incrémentiel du signal de commande Δu_k . Ainsi, la base de règles sera représentée par un ensemble de règles (IF l'erreur e_k est antécédente et le changement d'erreur Δe_k est antécédent, THEN la sortie de changement de commande Δu_k est conséquence). Enfin, la

sortie de contrôle u_k est obtenue en implémentant le changement de contrôle Δu_k , à la sortie de contrôle précédente u_{k-1} .

D'après les équations (III.22) et (III.23) ci-dessus, on peut comprendre cela. Outre la fonction de normalisation, les facteurs d'échelle G_e , $G_{\Delta e}$ et G_u ont des effets similaires à ceux de (K_p, K_i) dans le contrôleur PI conventionnel, en termes de performances de contrôle et de problèmes de stabilité. En fait, à partir des équations ci-dessus, la sortie de contrôle u_k peut être exprimée comme la somme de tous les incréments précédents.

$$u_k = T_s G_u \sum_{j=1}^k \Delta u_j \quad (\text{III.24})$$

Ensuite, l'approximation linéaire de la sortie de contrôle u_k peut être développée comme suit :

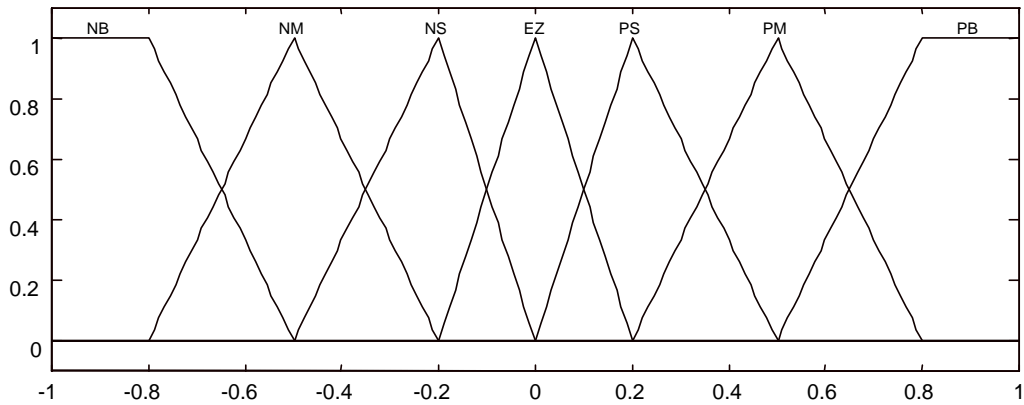
$$\begin{aligned} u_k &= T_s G_u \sum_{j=1}^k (E_j + \Delta E_j) & (\text{III.25}) \\ &= T_s G_u \sum_{j=1}^k \left(G_e e_j + G_{\Delta e} \frac{e_j - e_{j-1}}{T_s} \right) \\ &= G_{\Delta e} G_u \left[\frac{G_e}{G_{\Delta e}} T_s \sum_{j=1}^k e_j + e_k \right] \\ &= (G_{\Delta e} G_u) * e_k + (G_e G_u) * T_s \sum_{j=1}^k e_j \end{aligned}$$

À partir des équations (III.19) à (III.25), on peut conclure que les facteurs d'échelle dans l'approximation linéaire sont liés aux gains PI comme suit :

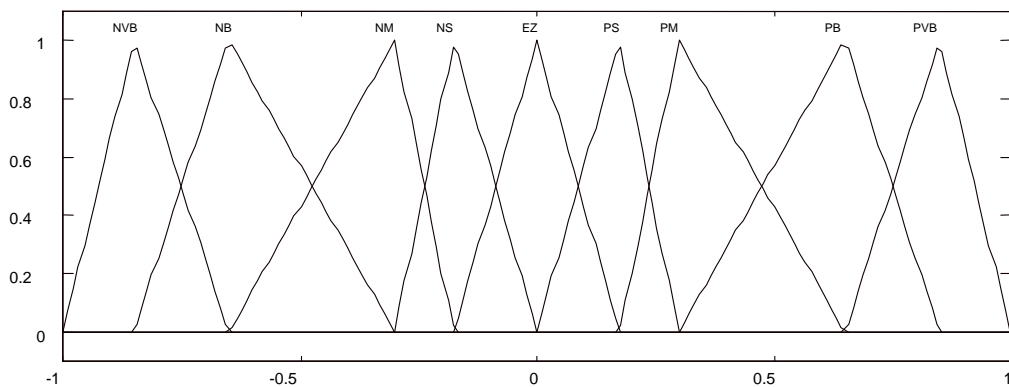
$$K_p = G_{\Delta e} G_u \quad (\text{III.26})$$

$$K_i = G_e G_u$$

Pour conserver l'erreur d'entrée réelle dans l'univers du discours, généralement définie entre -1 et 1, le facteur d'échelle G_e doit être défini sur $1/x$. Les autres facteurs d'étanchéité, c'est-à-dire $G_{\Delta e}$ et G_u , sont calculés et ajustés en fonction des critères de performance souhaités [20].



a) Entrée (erreur)



b) Sortie (commande)

Figure III.8 : la fonction d'appartenance

Δe	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB

Tableau III.2: Règle de base du contrôleur à logique floue

III.5.3. Base de règles

Les mêmes valeurs floues, (NB, NM, NS, ZE, PS, PL, PB) ont été choisis pour les trois variables de e , Δe et Δu où NB lit (grands négatifs), NM (moyen négatif), NS (petit négatif), ZE (zéro), PS (petit positif), PM (moyens positifs) et PB (grand positif).

Pour leur simplicité, les jonctions d'adhésion de forme triangulaire ont été choisies sur l'univers du l'intervalle [-1,1] comme la montre la Fig (III. 8). Pour améliorer les performances du CI, en fonction du dépassement, du temps de montée et de l'amplitude des oscillations, les fonctions d'adhésion sont choisies asymétriques, ce qui ferait dériver la linéarité du FLC vers la non-linéarité.

La base de règles sera donc pour un ensemble de quarante-neuf combinaisons possibles de la forme 'IF e est une valeur floue et AND Δe est une valeur floue, THAN Δu est une valeur floue'. Les quarante-neuf règles sont consignées dans le tableau (III.1) [20].

III.6. Boucle à verrouillage de phase

La PLL est un dispositif qui synchronise deux signaux en maintenant la synchronisation de fréquence et phase entre le signal de sortie et la référence d'entrée. Elle contrôle la phase du signal de sortie pour minimiser l'erreur de phase[16].

Les éléments clés de la PLL sont : les détecteurs de phase, les filtres de boucle et les oscillateurs commandés en tension (VCO).

Il y a deux motivations principales pour faire recours à cette transformation :

- Les trois variables du modèle mathématique peuvent être remplacés uniquement par deux variables ;
- Les deux variables biphasées peuvent être analysées et contrôlées indépendamment.

Les tensions du réseau sont captées et transformées par transformation de Concordia dans le repère

(α, β) , et puis dans le repère (d, q) par une rotation de $P(-\theta)$. L'angle de cette rotation, issu de l'intégration de l'estimation de la pulsation ω , est déterminé par le régulateur flou.

Les tensions mesurées au point de raccordement sont données par l'équation suivante:

$$\begin{pmatrix} v_{sa}(\theta) \\ v_{sb}(\theta) \\ v_{sc}(\theta) \end{pmatrix} = \sqrt{2}v_m \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (III.18)$$

Avec : $\theta = \omega t$

L'objectif principal est d'avoir un angle de rotation estimé $\hat{\theta}$ qui soit égal à l'angle réel de la tension réseau θ . Par conséquent, la PLL sera verrouillée lorsque l'angle estimé $\hat{\theta}$ sera égal à θ .

Par l'application de la transformation de PARK sur le système, nous obtenons la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{pmatrix} = \sqrt{3}v_m \begin{pmatrix} \sin \theta - \hat{\theta} \\ -\cos \theta - \hat{\theta} \end{pmatrix} \quad (\text{III.19})$$

La PLL sera verrouillée lorsque $\Delta\theta=0$. Dans ce cas l'angle du réseau θ est égal à l'angle estimé $\hat{\theta}$, et nous pouvons ainsi écrire :

$$\begin{cases} v_{sd} = 0 \\ v_{sq} = \sqrt{3}v_m \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

La commande des systèmes photovoltaïques éteint domaine essentiel pour maximiser la production d'énergie PV et la maîtrise de ses technologies ne garantit pas seulement une production maximale mais aussi la durabilité et la fiabilité de système PV.

Chapitre IV
Résultats de simulation et
interprétation

Introduction

Cette section se consacre à la présentation des résultats de simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec un filtre actif parallèle obtenus avec logiciel MATLAB/Simulink.

L'objectif de ce système est d'une part d'obtenir la puissance maximale du système photovoltaïque et de l'injecter sur le réseau, et d'autre part d'améliorer la qualité de l'énergie en éliminant les harmoniques et compensant l'énergie réactive et d'améliorer ses performances tel que la robustesse, temps de réponse et facteur de puissance.

L'objectif de ce test est de démontrer la circulation de puissance entre les éléments essentiels du système et les performances du contrôleur MPPT afin d'atteindre le point de puissance maximale. Cela peut être réalisé en prenant en compte sept scénarios dans le profil d'irradiation illustré dans la figure (IV.1), ainsi que les variations dans la demande de charge non linéaire au réseau comme illustré dans la figure (IV.2).

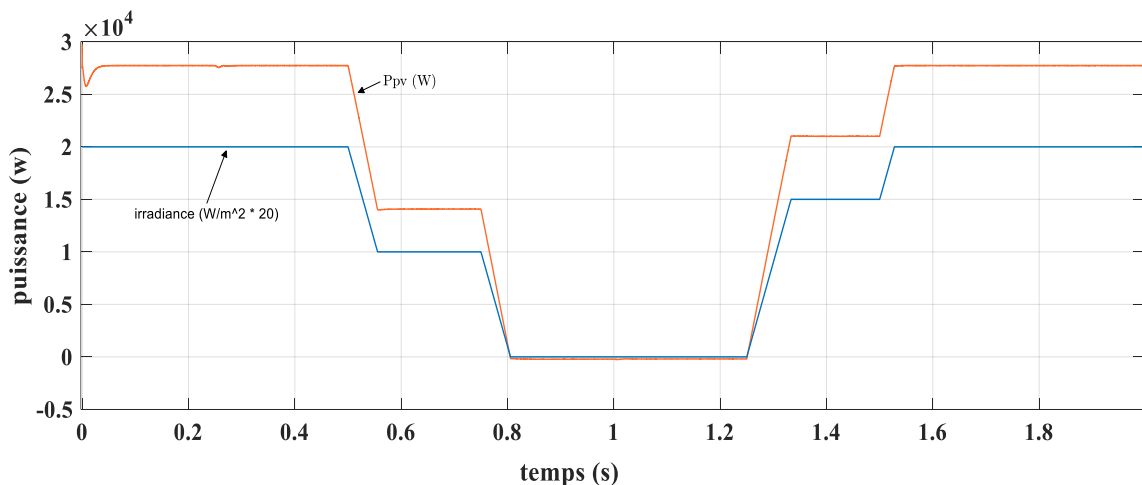


Figure IV.1 : La puissance photovoltaïque et le profil d'irradiance.

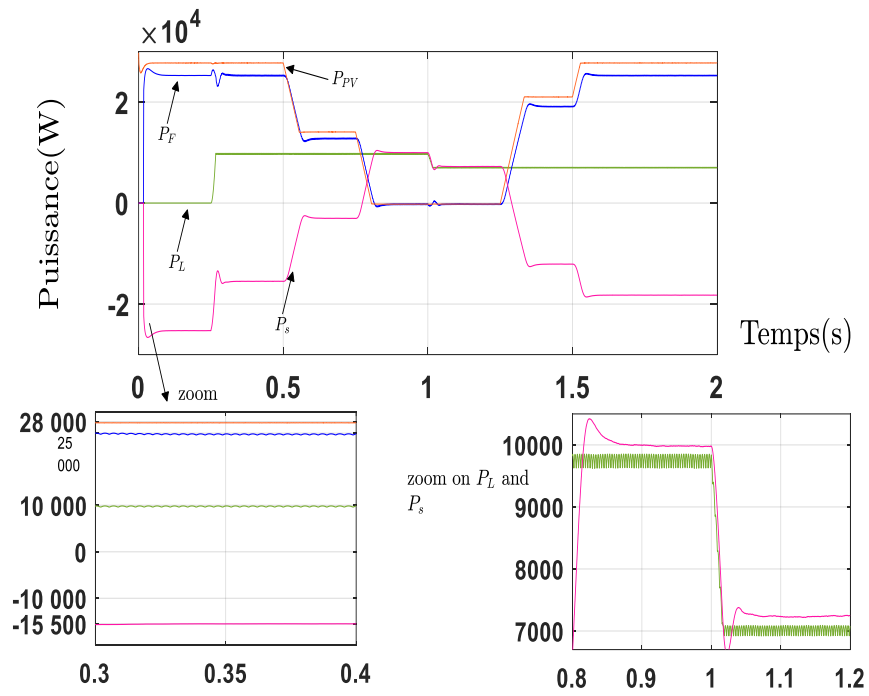


Figure IV.2 : Les puissances du filtre, photovoltaïque, ligne et source.

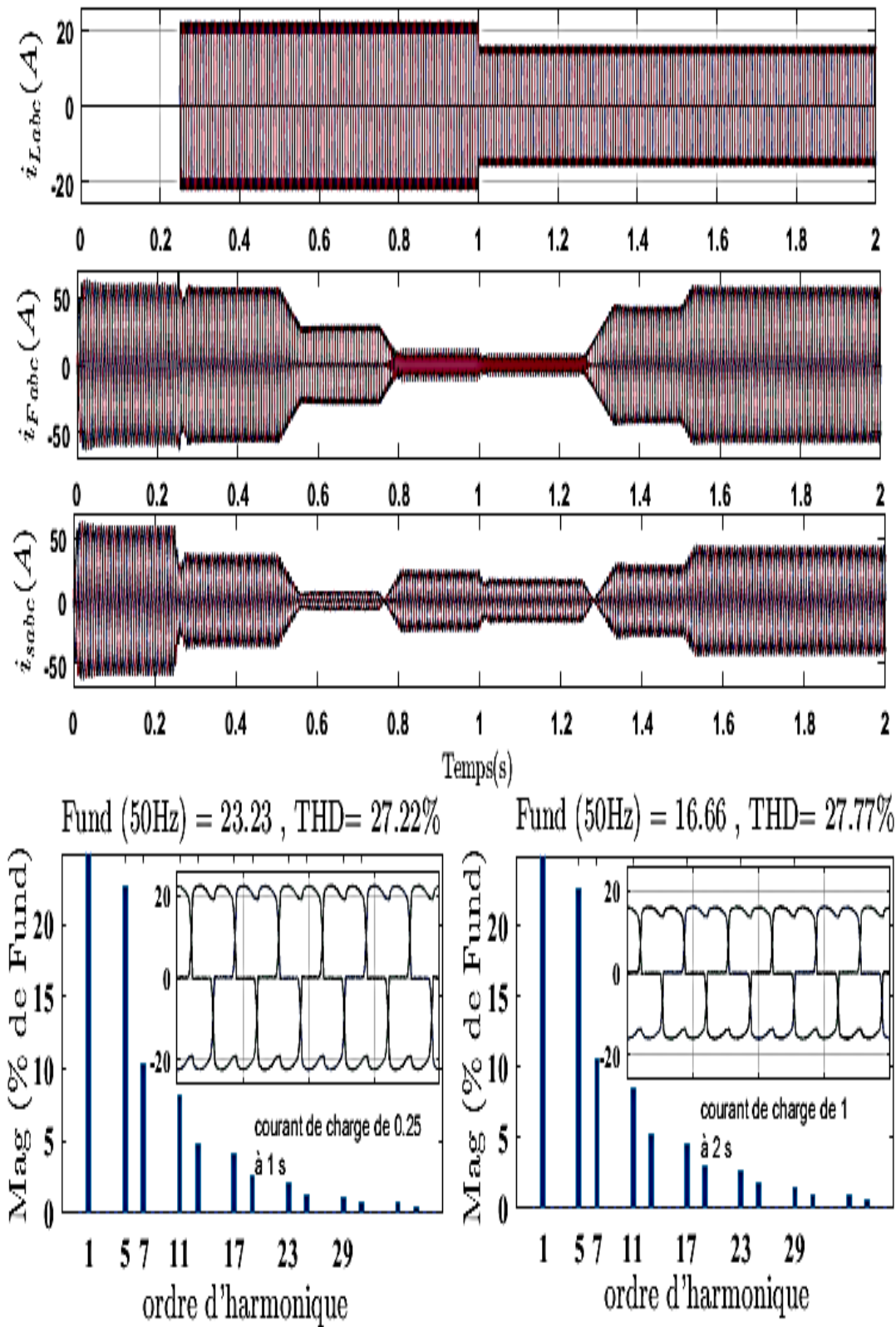


Figure IV.3 : Les courants triphasés du ligne, filtre et source et leurs THD.

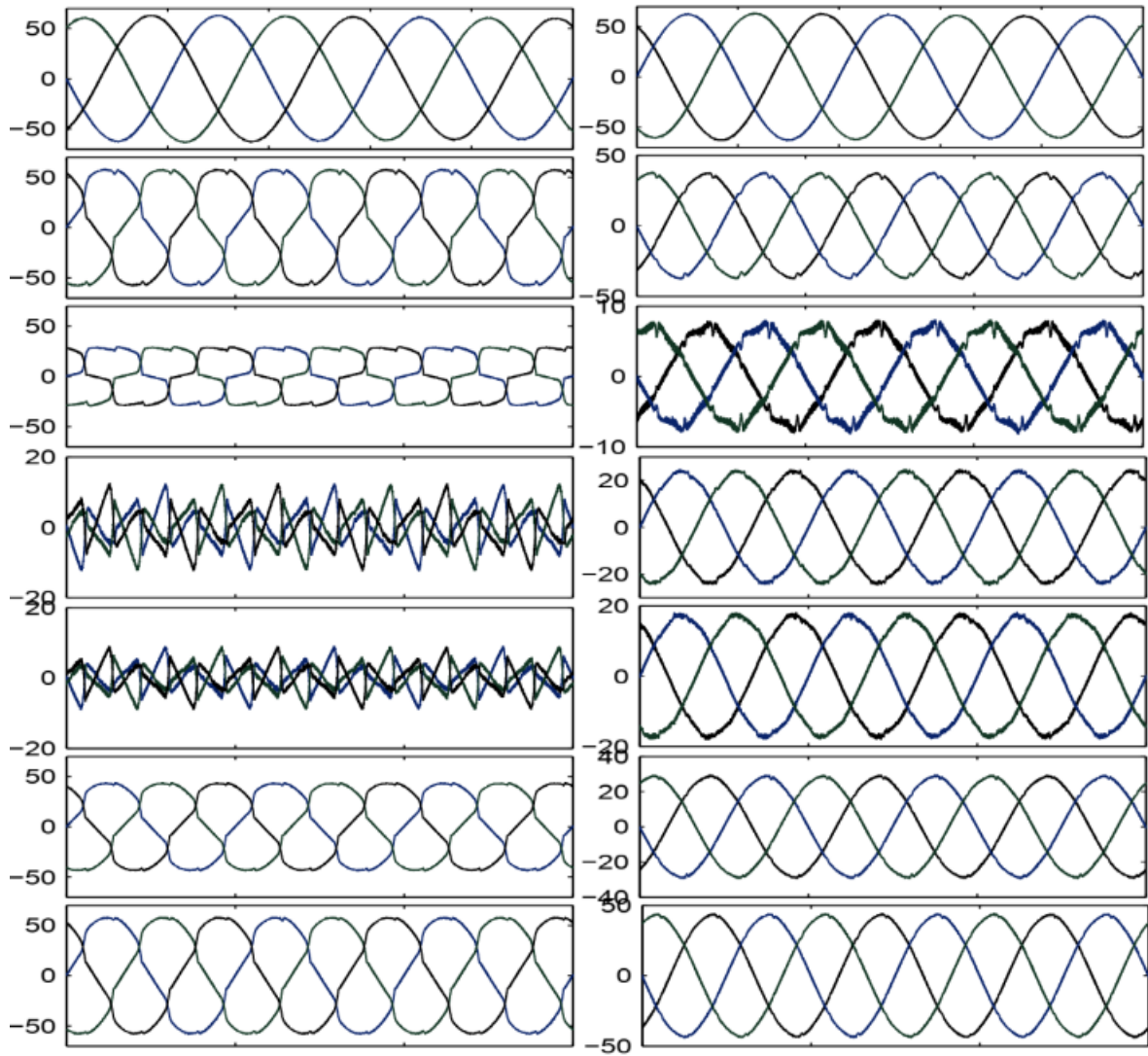


Figure IV.4 : Courant triphasé du filtre et du réseau AC

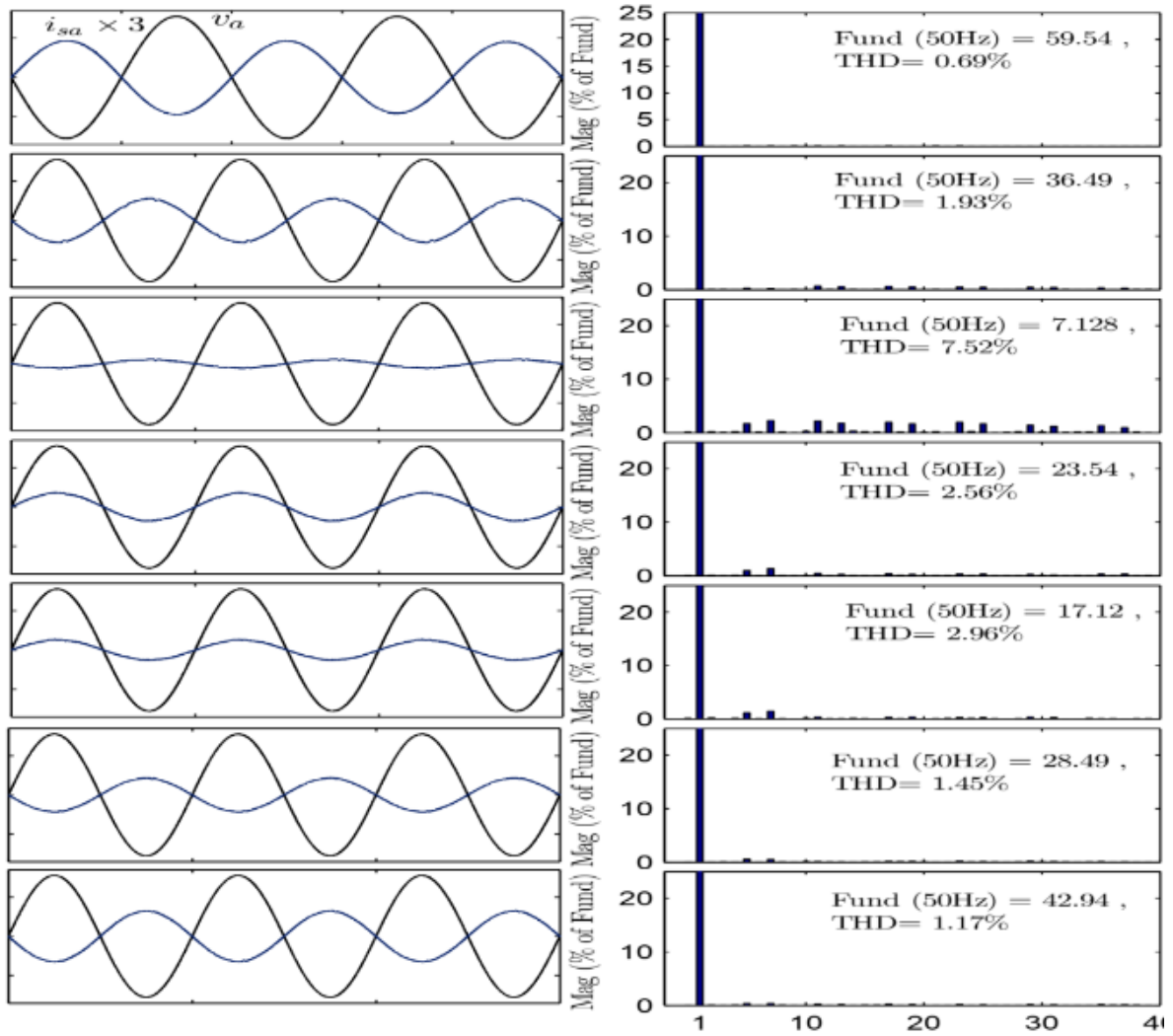


Figure IV.5 : Tension et courant d'une phase de la source.

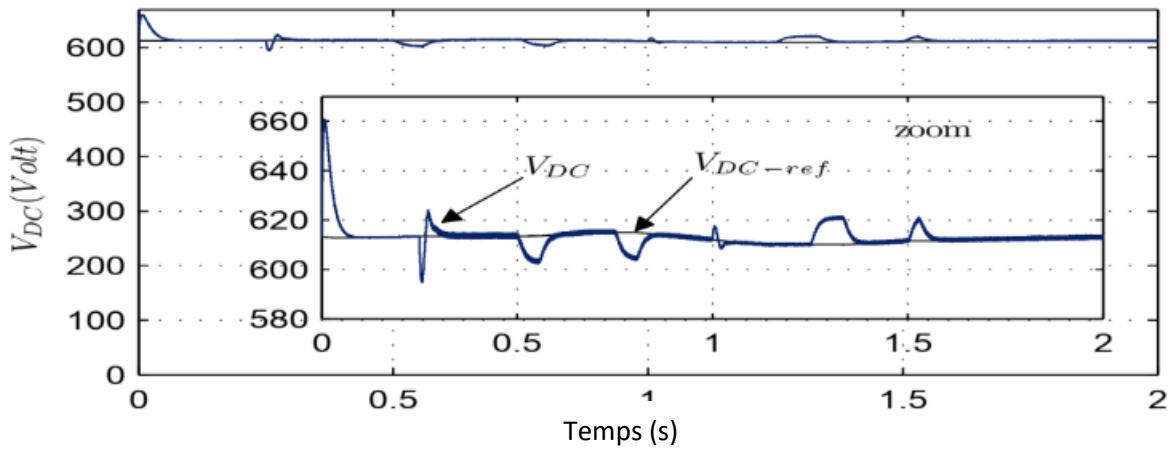


Figure IV.6 : la tension DC.

L'objectif de ce test est de démontrer la circulation de puissance entre les éléments essentiels du système et les performances du contrôleur MPPT afin d'atteindre le point de puissance maximale. Cela peut être réalisé en prenant en compte sept étapes dans le profil d'éclairement illustré dans la figure (IV.3) ainsi que les variations dans la demande de charge non linéaire au réseau comme illustré dans la figure (IV.4).

- Dans le premier cas, de 0 à 0,25 seconde, le générateur photovoltaïque reçoit une puissance de 1000 W/m² à 25 C°, ce qui correspond aux conditions de test habituelles, tandis que la charge non linéaire est déconnectée du réseau.

Les figures illustrent que la source photovoltaïque offre une puissance de près de 28 kW à une tension de 613 V présentée dans les figures (IV.6) et (IV.1). Étant donné les pertes subies dans la chaîne de conversion, l'onduleur fournit environ 25,5 kW au PCC. Comme aucune charge n'est connectée à ce moment-là, le réseau absorbe l'intégralité de cette puissance, soit 25 kW, représentés avec des valeurs négatives sur la figure (IV.2), ce qui indique que le réseau absorbe de l'énergie.

La figure (IV.5) montre également que le courant de la source du réseau CA est déphasé de 180° par rapport à la tension correspondante, ce qui implique que le réseau absorbe de l'énergie à un facteur de puissance unitaire.

- Dans le second cas, pendant une période de 0,25 à 0,5 secondes, avec le même éclairement, la charge non linéaire est reliée au réseau via le PCC. Le PCC reçoit la même quantité de puissance de l'onduleur, soit 25,5 kW, sous la même forme.

De cette puissance, la charge non linéaire absorbe 9,75 kW, tandis que les 15,75 kW restants sont envoyés au réseau DC. Cela peut expliquer pourquoi dans la figure (IV.5), le courant du réseau diminue en amplitude, mais reste déphasé de 180° par rapport à la tension correspondante.

- Dans la troisième étape, de 0,5 à 0,75 seconde, l'éclairement a diminué à 500 W/m², donc la source PV suit avec une production d'électricité de 14,1 kW, dont 12,55 kW sont injectés via l'onduleur au PCC. Avec la même demande, la charge non linéaire absorbe 9,75 kW et les 2,8 kW restants sont envoyés au réseau AC. Ici aussi, le courant du réseau a encore diminué, mais reste déphasé de 180° par rapport à la tension correspondante, car le réseau absorbe de l'énergie.

- Pendant le quatrième cas, de 0,75 à 01 seconde, le système fonctionne sous un ombrage total, par conséquent, il n'y a pas de production d'électricité à partir de la source PV comme la montre la figure (IV.1), Les charges non linéaires absorbent la demande du réseau et l'onduleur ne joue que le rôle d'un filtre actif shunt. Ceci est bien illustré dans la figure (IV.2) où l'alimentation du réseau fournit 10 kW, dont 9,75 kW vont à la charge non linéaire, tandis que le reste va à l'onduleur afin de compenser les pertes et de maintenir la tension continue, ce qui a légèrement diminué jusqu'à 611 V.

Le courant du réseau qui correspond uniquement aux puissances réelles moyennes absorbées par l'onduleur a une charge non linéaire d'environ 10,5 A est en phase avec la tension du secteur, ce qui implique également le maintien du facteur de puissance unitaire.

- Au cours du cinquième cas, de 01 à 1,25 seconde, toujours en pleine ombre, la demande de charge non linéaire a diminué à 7 kW. Dans cette situation également, le réseau AC fournit à la charge non linéaire et fournit à l'onduleur environ 250 W requis pour maintenir la tension DC stable.

Bien entendu, le flux de courant du réseau CA diminue, comme la montre la figure (IV.3), mais le coefficient de puissance unitaire reste constant.

- Dans le sixième cas, de 1,25 à 1,5 secondes, la demande de charge non linéaire reste à 7 kW, tandis que l'éclairage reste à l'état éteint. Ensuite, le soleil produit 21 kW, tandis que l'onduleur injecte 19,1 kW au PCC. 7 kW sont consommés par la charge non linéaire et les 12,1 kW restants sont utilisés pour le réseau AC. C'est la raison pour laquelle la tension du secteur est dépassée de 180° par rapport au courant de la figure (IV.5).

- Dans la dernière étape, de 1,5 à 2 secondes, dans des conditions normales (1000 W/m²), la production photovoltaïque atteint 28 kW, dont 25,5 kW sont convertis par l'onduleur, dont 18,5 kW sont transférés au réseau, car la charge non linéaire absorbe 7 kW.

Le courant du réseau a connu une augmentation et déphasé de 180° par rapport à la tension locale. Il est à noter enfin que la tension du bus DC est maintenue tout au long de ces tests sont effectués à environ 312 V, et il n'y a qu'une très légère baisse (quasi insignifiante) lors de l'ombre total où l'onduleur agit comme un filtre actif pur.

IV.1. Évaluation de la performance de l'énergie

Les figures (IV.3), illustrent respectivement le courant de charge, le courant de l'onduleur et le courant de la source (réseau). La charge non linéaire a naturellement un courant nul avant d'être connectée, ce qui signifie que le réseau absorbe le courant avec un facteur de puissance unitaire de l'onduleur. La figure (IV.5) illustre le courant sinusoïdal avec un THD de 0,69 %.

La charge non linéaire est connectée pendant une période de 0,25 à 01 seconde et absorbe le courant avec un THD de 27,22 %. L'onduleur ne produit plus de courant sinusoïdal. Parce qu'il intègre et injecte des harmoniques dans le réseau pour s'opposer et éliminer celles de la charge non linéaire.

Dans tous les tests réalisés en présence de la charge non linéaire, on peut observer que le courant du réseau conserve une forme sinusoïdale avec un facteur de puissance unitaire. Lorsqu'il y a un ombrage complet, le courant de l'onduleur ne comprend que les harmoniques à supprimer.

Finalement, les résultats approfondis sont présentés dans le tableau (IV.1) :

Temps (s)	0 à 0.25	0.25 à 0.5	0.5 à 0.75	0.75 à 01	01 à 1.25	1.25 à 1.5	1.5 à 02
P_V (kW)	28	28	14.1	0	0	21	28
P_F (kW)	25.5	25.5	12.55	-0.25	-0.202	19.1	25.5
P_L (kW)	0	9.75	9.75	9.75	7.0	7.0	7.0
P_S (kW)	-25.5	-15.75	-2.8	10	7.202	-12.1	-18.5
THD_{iL} (%)	0	27.22	27.22	27.22	27.77	27.77	27.77
THD_{is} (%)	0.69	1.93	7.52	2.56	2.96	1.45	1.17

Tableau IV.1: Les résultats approfondis de la situation pour chaque intervalle du temps.

Ce chapitre a examiné une chaîne de conversion photovoltaïque connectée au réseau électrique avec un filtre actif parallèle. La multifonctionnalité attendue de l'onduleur a été confirmée par les résultats obtenus, qui incluent l'extraction de puissance maximale, la qualité de puissance et le facteur de puissance unitaire....

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans notre projet de fin d'études, nous avons présenté la modélisation et la simulation de système photovoltaïque connecté au réseau.

Dans un premier temps, nous avons exposé un rappel sur les cellules PV et la pollution harmonique, ensuite, nous avons étudié dans un deuxième temps, une étude de modélisation de la cellule PV et la commande du filtre actif dans la chaîne de conversion d'un système PV.

Finalement, on a effectué une étude de simulation du système PV connecté au réseau électrique.

Comme perspective, nous proposons de développer notre système PV connecté au réseau électrique en utilisant d'autres convertisseurs. Ainsi, l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle comme les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous pour les commandes des convertisseurs.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] F. Maoulida "Modélisation d'un module photovoltaïque de type bp sx 150 pour la génération d'énergie électrique.", Faculté des Sciences et Technologies, Université d'Antananarivo, Madagascar, 2020.
- [2] O. Boussoum "Etude de l'effet d'une couche mince de TiO₂ sur les paramètres d'une cellule solaire au Silicium". Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [3] M. SALAH, and Y. DJEDIDI. "optimisation de la production d'un générateur photovoltaïque", 2015.
- [4] Cabal, Cedric. "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque". Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008.
- [5] G. BOUDECHICHE "Etude des techniques de commandes innovantes appliquées à un réseau électrique perturbé et déséquilibré interconnecté à une source d'énergie renouvelable à travers un filtre actif de puissance". Thèse doctorat, Université Mohamed El-Bachir EL-Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj, 2021.
- [6] "Contribution à l'amélioration de la commande d'un filtre actif par les techniques non linéaires" 2023.
- [7] I. Salahi, S. CHABANI. ETUDE, "Modélisation et commande d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC". Université Ahmed DRAIA-Adrar, 2021.
- [8] N. Aissaoui, K. Boughris et N. Bennabi. "Diagnostic des structures assurant le transfert d'énergie photovoltaïque avec une meilleure efficacité énergétique". Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [9] B. Boukezata and all. "Système solaire photovoltaïque connecté au réseau électrique et associé à un filtre actif parallèle." Symposium de Génie Électrique 2014.
- [10] B. N. Rao, Y. Suresh, A. K. Panda, B. S. Naik, and V. Jammala, "Development of cascaded multilevel inverter based active power filter with reduced transformers", CPSS Trans. Power Electron. Appl., vol. 5, no. 2, pp. 147–157, 2020.
- [11] F. Ucar, R. Coteli, and B. Dandil, "Three level inverter based shunt active power filter using multi-level hysteresis band current controller", Electr. Rev., vol. 88, no. 11A, pp. 227–231, 2012.

Références bibliographiques

- [12] V. Aburto, M. Schneider, L. Moran, and J. Dixon, "An active power filter implemented with a three-level NPC voltage-source inverter", in PESC97. Record 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Formerly Power Conditioning Specialists Conference 1970-71. Power Processing and Electronic Specialists Conference 1972, 1997, vol. 2, pp. 1121–1126.
- [13] M. N. Raju, J. Sreedevi, R. P Mandi, and K. S. Meera, "Modular multilevel converters technology: a comprehensive study on its topologies, modelling, control and applications", IET Power Electron., vol. 12, no. 2, pp. 149–169, 2019.
- [14] S. Khomfoi and L. M. Tolbert, "Multilevel power converters," in Power electronics handbook, Elsevier, 2011, pp. 455–486.
- [15] B. Deffaf, N. Debdouche, H. Benbouhenni, F. Hamoudi, & N. Bizon . "A new control for improving the power quality generated by a three-level T-type inverter. Electronics, 12(9), 2117".2023
- [16] A. HAMIDI, S. RAHMANI and K. AI-HADDAD, " Fellow, A New Hybrid Series Active Filter Configuration to Compensate Voltage Sag, Swell, Voltage and Current Harmonics and Reactive Power ", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009) Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea, 2009
- [17] F. BERGERAS "Etude de nouvelles structures de filtres actifs intégrées en Hyperfréquences", thèse de Doctorat de l'université de limoges, Spécialité : "Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et systèmes", Universite de limoges, 2010.
- [18] A. BOUKADOUM, T. BAHY « harmonic current suppression by shunt active power filter using fuzzy logic controller", Department of Electrical Engineering, University of Tebessa, Algeria, Department of Electrical Engineering, University of Annaba, Algeria, Journal of Theoretical and Applied Information Technology 31st October 2014. Vol. 68 No.3
- [19] T. Benmiloud, A. Omari, "Régulation de la tension d'alimentation du filtre actif parallèle par PI adaptatif". In Proceedings of the 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing (CIP).2007

Références bibliographiques

[20] H. Benbouhenni, Z. Boudjema, A. Belaidi. "Using four-level NSVM technique to improve DVC control of a DFIG based wind turbine systems." *Periodica polytechnica Electrical engineering and computer science* 63.3 .144-150.2019.

Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau

Résumé

L'énergie électrique est normalement fournie sous une forme de tension parfaitement sinusoïdale d'amplitude et de fréquence constantes. Mais de nos jours, à cause de la prolifération de la connexion au réseau des charges non linéaires, la situation est devenue très préoccupante car ces charges déforment la tension et génèrent des harmoniques, donc alors la qualité de l'énergie dans les installations électriques se dégrade continuellement.

Les charges non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment généralement de la puissance réactive. Grâce à l'évolution de l'électronique de puissance, des dispositifs de filtrage modernes des harmoniques auto adaptables, appelés filtres actifs ont pu être conçus.

Dans ce travail, une étude de modélisation et de commande d'un système PV connecté au réseau électrique est présentée. Le système PV composé d'un générateur PV qui fonctionne à sa puissance maximale utilisant un convertisseur continu-continu (DC-DC) commandé par un algorithme MPPT de type conductance incrémentielle (IncCond) et un onduleur continu-alternatif (DC-AC) triphasé commandé par un régulateur flou est présenté. Les résultats obtenus par simulation avec le logiciel MATLAB ont montré que le système permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations PV raccordées au réseau électrique..

Abstract

Electrical energy is normally supplied in a perfectly sinusoidal voltage form of constant amplitude and frequency. But nowadays, due to the proliferation of the connection to the network of non-linear loads, the situation has become very worrying because these loads distort the voltage and generate harmonics, therefore the quality of energy in electrical installations deteriorates.

Nonlinear loads draw non-sinusoidal currents and generally consume reactive power. Thanks to the evolution of power electronics, modern self-adapting harmonic filtering devices, called active filtering, have been able to be designed.

In this work, a modeling and control study of a PV system connected to the electrical network is presented. The PV system consists of a PV generator that operates at its maximum power using a direct-to-direct (DC-DC) converter controlled by an incremental conductance (IncCond) MPPT algorithm and a three-phase direct-to-alternating (DC-AC) inverter. Controlled by a fuzzy regulator is presented. The results obtained by simulation with MATLAB software showed that the system makes it possible to considerably improve the efficiency of PV installations connected to the electrical network.