

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'électronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : électronique

Spécialité : industries électroniques

Par

- **Bouguerra sohaib**
- **Bourkaib radhwane**

Intitulé

Contrôle direct de puissance d'un Compensateur actif Solaire interconnecté au réseau électrique.

Soutenu le : 03/07/2023

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Dr. TALBI Billel</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Pr. SARRA Mustapha</i>	<i>PROFESSEUR</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. BENTOUHAMI Laarafi</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2022/2023

REMERCIEMENTS

TOUT D'ABORD, JE REMERCIE ALLAH LE TOUT PUISSANT QUI M'A DONNÉ LA VOLONTÉ LE COURAGE ET LA PATIENCE POUR TERMINER CE TRAVAIL.

JE TIENS PARTICULIÈREMENT À REMERCIER VIVEMENT MON ENCADREUR PROFESSEUR : **SARRA MUSTAPHA** D'AVOIR ACCEPTÉ D'ENCADRER ET DE DIRIGER CE TRAVAIL.

JE LE REMERCIE POUR SON AIDE, POUR SES PRÉCIEUX CONSEILS, AINSI QUE POUR SON ASSISTANCE ET SA ET SES ORIENTATIONS.

JE TIENS À REMERCIER ÉGALEMENT TOUS LES MEMBRES DE JURY QUI ONT VOULU EXAMINER CE TRAVAIL.

ET ENFIN, MA PROFONDE GRATITUDE S'ADRESSE AUSSI À L'ENSEMBLE DES ENSEIGNANTS QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À MA FORMATION.

- BOUGUERRA SOHAIB
- BOURKAIB RADHWANE

Dédicace

Je rends grâce à Dieu tout puissant de m'avoir accordé la force nécessaire pour la réalisation de ce travail que Je dédie chaleureusement :

À mes très chers parents qui a œuvré pour ma réussite,

Ma profonde gratitude et mon incontestable reconnaissance, pour tous les sacrifices que vous me contentés, toute la confiance que vous m'accordez et tout l'amour dont vous m'entourez.

A mes sœurs, Pour leurs soutiens et leurs amours. À mes amies.

Merci à tous.

➤ Sohaib

Dédicaces

**Je dédie ce modeste travail à ceux que
sont les plus chers, à mes très**

Chers parents.

**A mon frère Abdelwahab, et à toute ma
famille et mes proches.**

A mes amis tous mes collègue d'étude.

**Et à tous ceux qui ont contribué de près
ou de loin pour que ce projet**

Soit possible, je dis merci.

**Et enfin, à toute la promotion de 2ème
année Master Industries**

Electroniques promotion 2022-2023

Bourkaib Redhwane

Sommaire

	Introduction générale.	
Chapitre I	Perturbation des réseaux électriques et solutions de dépollution.	
	Introduction.	1
I.1	Perturbations dans les réseaux de distribution électrique.	1
I.2	Perturbations harmoniques.	2
I.2.1	Généralités sur l'analyse harmonique.	2
I.2.1.1	Effets des harmoniques.	3
I.2.2	Taux de distorsion harmonique THD (%).	4
I.2.3	Normes et réglementations.	4
I.3	Solutions de dépollution du réseau électrique.	5
I.3.1	Solutions de dépollution traditionnelle.	5
I.3.1.1	Dépollution des courants perturbateurs.	6
I.3.1.2	Dépollution des tensions perturbatrices.	6
I.3.2	Solutions de dépollution modernes.	6
I.3.2.1	Solution de dépollution adoptée.	7
I.3.4	Filtres actifs.	7
I.3.4.1	Filtre actif parallèle.	8
I.3.4.2	Filtre actif série.	8
I.3.4.3	Filtre actif hybride.	9
I.3.5	Filtrage actif parallèle.	10
I.3.5.1	Applications des filtres actifs parallèles.	11
I.3.5.2	Classement des filtres actifs parallèles.	11
	Conclusion.	12
Chapitre II	Système photovoltaïque.	
	Introduction.	13
II.1	Effet photovoltaïque.	13
II.2	Caractéristiques de la cellule photovoltaïque.	14

II.2.1	Cellule solaire.	14
II.2.2	Caractéristique d'une cellule PV.	15
II.3	Paramètres d'une cellule PV.	16
II.3.1	Le courant de court- circuit et la tension à circuit ouvert.	16
II.3.1.1	Le courant de court- circuit.	16
II.3.1.2	La tension à circuit ouvert.	16
II.3.2	Le point de puissance maximal.	17
II.3.3	Le facteur de forme FF.	18
II.3.4	Influence de l'éclairement.	19
II.3.4	Influence de la température.	19
II.4	Généralités sur les Système photovoltaïques connectés au réseau.	20
II.4.1	Les différents types de systèmes photovoltaïques.	21
II.4.1.1	Structure générale d'un système photovoltaïque.	21
II.4.1.2	Système à bus continu intermédiaire.	22
II.4.1.2.1	Structure avec hacheur et onduleur.	22
II.5	Convertisseur de puissance de système photovoltaïque.	23
II.5.1	Convertisseurs DC/DC.	23
II.5.1.1	Description.	24
II.5.2	Onduleur de tension DC/AC.	25
II.6	Stratégie de commande de l'onduleur coté réseau.	25
II.6.1	Objectif de la commande de l'onduleur.	26
II.6.2	Principe de contrôle de l'hystérésis.	26
	Conclusion.	28
Chapitre III	Résultats de simulation.	
	Introduction.	29
III.1	Schéma de bloc du système.	29
III.2	Simulation du module photovoltaïque.	30
III.2.1	Les caractéristiques I-V et P-V d'un module PV.	30
III.2.2	Résultats de simulation du module photovoltaïque.	31
III.3	Commande MPPT de type P&O du système GPV.	32
III.3.1	MPPT de type P&O.	33

III.3.2	la tension de bus continu.	34
III.4	Commande directe de puissance.	35
III.4.1	DPC classique.	35
III.4.1.1	Calcul des puissances instantanées.	36
III.4.1.2	Le command DPC classique.	37
III.4.2	Contrôleurs à hystérésis.	37
III.4.2.1	Choix du secteur.	38
III.4.2.2	Table de commutation.	39
III.4.3	Contrôle de la tension du bus continu utilisant le régulateur conventionnel PI.	39
III.4.4	Le résultat de la simulation de la technique DPC.	40
III.4.4.1	Avant la mise en œuvre de FAP et GPV.	41
III.4.4.2	La mise en œuvre de FAP.	43
III.4.4.3	Après la mise en œuvre de FAP et GPV.	46
	Conclusion.	49
	Conclusion générale.	

Liste de figures :

Figure I.1	Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.	3
Figure I.2	Filtre Actif parallèle	8
Figure I.3	Filtre actif série.	9
Figure I.4	Filtre actif hybride	10
Figure II.1	Schéma d'une cellule élémentaire.	14
Figure II.2	Caractéristique d'une cellule PV.	15
Figure II.3	Caractéristiques V-I, P-V d'un module PV.	18
Figure II.4	Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25C°).	19
Figure II.5	Caractéristique I(V) pour différentes températures (G=1000W/m²).	19
Figure II.6	Schéma des systèmes photovoltaïques connectés au réseau.	21
Figure II.7	Générateur photovoltaïque et l'onduleur.	23
Figure II.8	Symbole d'un convertisseur DC-DC	24
Figure II.9	Principe de commande des courants par hystérésis.	27
Figure II.10	principe de contrôle de l'hystérésis	28
Figure III.1	Schéma globale de bloc du système sous MATLAB/Simulink.	29
Figure III.2	Schéma de bloc du système sous MATLAB/Simulink.	30
Figure III.3	Caractéristique I-V et P-V d'un module PV pour différentes valeurs de l'éclairement	31
Figure III.4	profile d'irradiation du GPV.	31
Figure III.5	Schéma de Commande MPPT du système GPV.	33
Figure III.6	Organigramme d'algorithme (P&O).	34
Figure III.7	la tension de bus continu d'un condensateur Cdc.	34
Figure III.8	Schéma bloc de la technique DPC classique	36
Figure III.9	Schéma de la commande de DPC classique	37
Figure III.10	Représentation du vecteur de la tension dans le plan (α , β) divisé en douze (12) secteurs.	38
Figure III.11	Boucle de régulation du bus continu du FAP triphasé	39

Figure III.12	La tension de réseau électrique avant la mise en œuvre des FAP et GPV.	40
Figure III.13	Le courant de source de la phase avant la mise en œuvre des FAP et GPV.	40
Figure III.14	Les harmoniques de courant de source de la phase avant la mise en œuvre des FAP et GPV.	41
Figure III.15	Le courant de la charge non linéaire avant la mise en œuvre des FAP et GPV.	41
Figure III.16	La puissance réactive de source avant la mise en œuvre des FAP et GPV.	42
Figure III.17	La tension de réseau électrique après La mise en œuvre de FAP.	43
Figure III.18	Le courant de source de la phase après La mise en œuvre de FAP.	43
Figure III.19	Les harmoniques de courant de source de la phase après La mise en œuvre de FAP.	44
Figure III.20	Le courant de la charge non linéaire après La mise en œuvre de FAP.	44
Figure III.21	Le courant de la phase de filtre après La mise en œuvre de FAP.	45
Figure III.22	La tension de bus contenu après La mise en œuvre de FAP.	45
Figure III.23	La puissance active consommée par la charge non linéaire après La mise en œuvre de FAP.	46
Figure III.24	La puissance réactive consommée par la charge non linéaire après La mise en œuvre de FAP.	46
Figure III.25	La tension de réseau électrique après la mise en œuvre des FAP et GPV.	47
Figure III.26	Le courant de source de la phase après la mise en œuvre des FAP et GPV.	47
Figure III.27	Le courant de la charge non linéaire après la mise en œuvre des FAP et GPV.	47
Figure III.28	Le courant de la phase de filtre après La mise en œuvre des FAP et GPV.	48
Figure III.29	La tension de bus contenu après La mise en œuvre des FAP et GPV.	48
Figure III.30	La puissance active consommée par la charge non linéaire après La mise en œuvre des FAP et GPV.	48
Figure III.31	La puissance réactive consommée par la charge non linéaire après La mise en œuvre des FAP et GPV.	49

Liste des tableaux :

Tableau I.1	Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519	5
Tableau III.1	Caractéristiques électriques du module photovoltaïque dans les conditions standards de test (CST)	29
Tableau III.2	Table de commutation de la DPC	37
Tableau III.3	Les paramètres utilisés dans la simulation.	39

Liste des acronymes et symboles

DPC	Contrôle direct de puissance
GPV	Générateur Photovoltaïque
FAP	Filtre Actif Parallèle
MPPT	Méthode de poursuite du point de puissance maximale
P&O	Perturbe and Observe
PV	Photovoltaïque
THD	Taux de Distorsion Harmonique
MPP	Point de puissance maximale
ASI	Alimentation Sans Interruption
DC	Courant continu
AC	Courant alternative
FF	Le facteur de forme
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
VDC	Tension continue
E_{ph}	Effet photovoltaïque
V_{th}	La tension thermique
I_{sc}	Le courant de court-circuit
V_{oc}	La tension de circuit ouvert
T_c	Température des cellules
T_a	La température ambiante
I_{ph}	Le courant de photovoltaïque

Introduction générale

L'énergie photovoltaïque représente une alternative énergétique viable pour la production d'électricité puisque cette dernière est une source renouvelable, à la fois propre, illimitée et avec un niveau de risque très réduit. Et avec la diminution du prix des modules photovoltaïques (PV) et l'augmentation du prix des énergies fossiles, l'exploitation de cette ressource à fort potentiel de développement avec des systèmes de génération PV devient viable et rentable. En effet, les courants harmoniques et réactifs générés par les charges non linéaires provoquent des perturbations et détériorent donc la qualité de l'énergie sur les réseaux de distribution électrique [18]. Conduit à piloter le GPV afin d'injecter la puissance active PV sur le réseau mais avec l'ajout de fonctionnalités d'un filtre actif de puissance (FAP). Ces dispositifs jouent un rôle crucial dans la régulation du flux d'énergie entre les panneaux solaires et le réseau électrique. Dans ce travail Une commande directe de puissance (DPC) est développée pour contrôler la puissance active photovoltaïque injectée, la compensation de l'énergie réactive et l'élimination des courants harmoniques présents sur le réseau et issus de charges non linéaires [20]. Par ailleurs, pour extraire une puissance maximale (MPPT) des modules PV, une stratégie globale de type P&O est insérée au niveau du contrôle du bus continu afin de générer une référence de tension optimale.

Afin d'atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire est divisé en trois chapitres qui se résument comme suit : Le premier chapitre est consacré aux perturbations en courant et en tension des réseaux électriques, connues sous le nom de pollution harmonique. On examine les origines de cette pollution, ses conséquences et les paramètres associés. L'objectif est de trouver des solutions adaptées pour atténuer cette pollution harmonique.

Dans le deuxième chapitre, on commence par une introduction aux cellules PV et aux panneaux solaires, suivie d'une description détaillée de leurs modèles. Et Après, on passe à la modélisation de l'onduleur de tension, réseau électrique, les charges non linéaires. Ensuite, on présentera une étude détaillée de l'onduleur de tension, sa structure, son principe de fonctionnement, la modélisation et la commande

Enfin Le troisième chapitre est réservé à la simulation du fonctionnement du système de compensation des harmoniques à l'aide d'un APF, les résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink.

Chapitre I

**Perturbation des réseaux électriques et
solutions de dépollution.**

Introduction

L'utilisation croissante dans les appareils industriels ou domestiques entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques.

L'inconvénient de ces dispositifs c'est qu'ils se comportent comme des charges non linéaires et absorbent des courants avec des formes d'ondes différentes des tensions d'alimentation. Dans ce cas, l'évolution des courants n'est pas liée directement aux variations sinusoïdales des tensions. Ces courants périodiques mais non sinusoïdaux circulent au travers des impédances des réseaux et donnent naissance à des tensions non sinusoïdales et des déséquilibres qui viennent se superposer à la tension initiale au point de raccordement. Ils peuvent générer aussi une consommation de puissance réactive. Ces perturbations périodiques régulières sont désignées comme des perturbations harmoniques [1].

Ces perturbations ont des conséquences préjudiciables sur le bon fonctionnement des appareils électriques et ont des effets à la fois instantané et à long terme. Il est donc important d'analyser et quantifier les harmoniques. Dans ce premier chapitre, des notions élémentaires d'analyse harmonique, les origines et les conséquences de la pollution harmonique sont exposées. Par suite, les normes et la réglementation en vigueur seront présentées avant de répertorier les solutions possibles assurant une action prédictive par une absorption sinusoïdale du courant ou curative par une compensation de cette pollution harmonique. La problématique autour des harmoniques. Enfin, on se focalisera sur le filtrage actif parallèle, en analysant les différents types de filtres, leur modélisation et leur structure de contrôle [1].

I.1 Perturbations dans les réseaux de distribution électrique

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, le déséquilibre. La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique. La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes

perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. Quatre possibilités distinctes de perturbations peuvent être alors citées: [2]

- ✓ Les variations de la fréquence à 50 Hz : Bien qu'elles soient rares et qu'elles ne soient observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport, elles peuvent apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome.
- ✓ Les variations de l'amplitude : il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non.
- ✓ La modification de la forme d'onde de la tension : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque;
- ✓ Le déséquilibre du système triphasé : Dans ce cas, les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres [2].

I.2 Perturbations harmoniques

I.2.1 Généralités sur l'analyse harmonique

Un réseau de distribution électrique permet d'alimenter des récepteurs ou des charges à l'aide de tension monophasée ou triphasée dite sinusoïdales et de fréquence constante produites par des générateurs ou des sources de très fortes puissances par rapport à celle consommée au point d'utilisation. L'énergie est produite par des centrales nucléaire, thermique, hydraulique ou à base de sources renouvelables et des réseaux de distribution assurent le transport jusqu'au lieu de consommation. A ce niveau il existe deux catégories de récepteurs distincts : les charges dites linéaires et les charges dites non linéaires.

Dans le premier cas, les variations des courants restent proportionnelles à la variation de la tension appliquée avec l'introduction d'un déphasage lié à la nature de la charge. Ces charges sont des éléments passifs de nature résistive (déphasage entre le courant et la tension nul) ou réactive : inductance (déphasage positif, le courant est en retard sur la tension) ou condensateur (déphasage négatif, le courant est en avance sur la tension). Dans le cas d'une

charge inductive ou capacitive, de la puissance réactive est consommée ou générée entraînant des facteurs de puissance ou de déplacement différents de l'unité. Pour pallier ce phénomène il est nécessaire de faire de la compensation d'énergie réactive afin de rendre l'onde de courant en phase avec l'onde de tension. En revanche pour les charges non linéaires les variations des courants absorbés n'est pas proportionnelle aux ondes des tensions appliquées [1].

- un exemple de forme d'onde d'une tension distordue contenant, en plus du terme fondamental de fréquence 50Hz, deux harmoniques de rang impair.

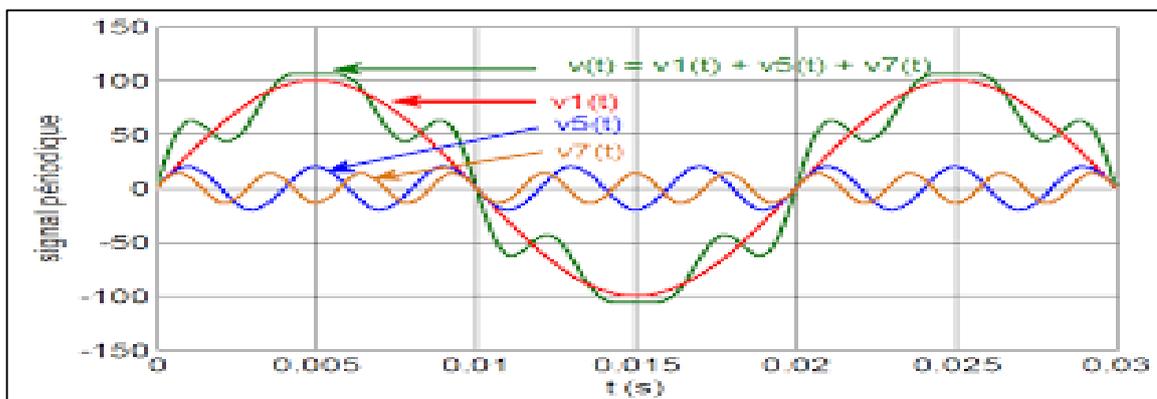


Figure I.1 : Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.

I.2.1.1 Effets harmonique

Bien que les susceptibilités des différents appareils à l'égard des harmoniques soient très diversifiées, on distingue schématiquement deux sortes d'effets possibles : Les effets quasi instantanés sur certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation, etc. La présence d'harmoniques sur les signaux provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur crête de l'onde. Les effets à terme sur les machines tournantes, les transformateurs et les condensateurs, ce qui se manifeste par des échauffements supplémentaires. Il en découle la destruction de matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique. Ce problème peut être abordé de deux façons : Essayer de réduire l'impédance du réseau. En théorie si l'impédance était nulle, la tension et le courant seraient complètement découplés et les harmoniques du courant n'auraient aucun effet sur la tension. Cette solution n'est pas réalisable car elle exigerait des modifications très importantes et onéreuses, voire impossibles. Ajouter

des bifurcations au système de façon à introduire des voies privilégiées de circulation des harmoniques de courant qui évitent le réseau. Cette solution est la plus utilisée et est connue sous le nom de filtrage d'harmoniques [3].

I.2.2 Taux de distorsion harmonique THD (%)

Le taux individuel d'harmonique est défini comme le rapport (en %) de l'amplitude de l'harmonique au rang $_$ ramenée à celle du fondamental :

$$T_{aux(h)} = 100 \frac{Y_{h,trms}}{Y_{1,trms}} (\%) \quad (\text{I.1})$$

La notion la plus couramment usitée est le taux global de distorsion harmonique THD (Total Harmonique Distorsion) pour caractériser le taux de déformation d'une onde électrique. C'est le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental seul (norme IEC 61000-2-2) :

$$THD = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Y_{h,trms}^2}}{Y_{1,trms}} (\%) \quad (\text{I.2})$$

Il est possible, de façon moins usuelle, de définir le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle de la grandeur déformée :

$$THD = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Y_{h,trms}^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} Y_{h,trms}^2}} (\%) \quad (\text{I.3})$$

Dans la plupart des applications, il suffit de considérer les harmoniques entre le rang 2 et 25, même si pour la norme EN 50160 l'analyse des données doit s'effectuer jusqu'au rang 50 [4].

I.2.3 Normes et réglementations

Les consommateurs ainsi que les distributeurs de l'énergie électrique sont conscients de l'importance d'une réglementation standard unique pour les problèmes de la pollution

harmonique. Une telle réglementation universelle n'existe pas encore, cependant des organismes comme IEC (Commission Électrotechnique Internationale) en Europe et IEEE en Amérique, élaborent des normes efficaces qui peuvent être regroupées en trois catégories :

1. Niveaux de compatibilité harmonique en amont du point commun de raccordement :

- ✓ IEEE 519-1992
- ✓ IEC 61000-2-2
- ✓ IEC 61000-3-6

1. Limites sur l'émission harmonique des équipements:

- IEC 61000-3-2 (appareils de moins de 16 A par phase)
- IEC 61000-3-4 (appareils de plus de 16 A par phase)

2. Guide pour la mesure des harmoniques :

- IEC 61000-4-7

La norme IEEE-519, par exemple, définit des limites pour les tensions et courants harmoniques au point commun de raccordement (PCC) pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs dans d'autres sites. À titre d'exemple, les taux individuels maximaux des tensions harmoniques ainsi que le THD à ne pas dépasser sont donnés dans le tableau 1 [5].

Tableau I.1: Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519

Tension au jeu de barres	Composante harmonique individuelle maximale(%)	THD maximal (%)
-69 KV ou moins	3.0	5.0
-115KV a 161KV	1.5	2.5
-Plus de 161KV	1.0	1.5

I.3 Solutions de dépollution du réseau électrique

I.3.1 Solutions de dépollution traditionnelles

Afin de dépolluer les réseaux électriques de ce type de perturbation, plusieurs solutions ont été introduites dans la littérature.

I.3.1.1 Dépollution des courants perturbateurs

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur deca phase, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive [5].

Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché. Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de filtres actifs parallèles a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courant.

I.3.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices

D'autres solutions modernes pour la compensation des creux de tension se basent sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les Alimentation Sans Interruption (ASI). Ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est la limitation en puissance de ces dispositifs et leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves. Afin de réaliser une solution flexible universelle de dépollution de toutes les perturbations de tension des réseaux électriques, une famille de filtres actifs séries a été proposée [6].

I.3.2 Solutions de dépollution modernes

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées.

I.3.2.1 Solution de dépollution adoptée

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent

s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur [5].

I.3.4 Filtres actifs

Les inconvénients inévitables aux filtres passifs et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance (A.P.F), Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensembles ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser [1].

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants:

- le volume physique du filtre est plus réduit.
- La capacité de filtrage est supérieure.
- la flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils présentent quelques inconvénients :

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- Les pertes sont plus élevées.

Deux types de convertisseurs connus dans la littérature constituent l'APF: convertisseur à source de courant (SCI) ou à source de tension (VCI).

I.3.4.1 Filtre actif parallèle

- **Principe de fonctionnement**

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Figure I.2 est le plus souvent commandé comme un générateur de courant.

Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (*F.A.P*) consiste empêcher les courants perturbateurs

(harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [7].

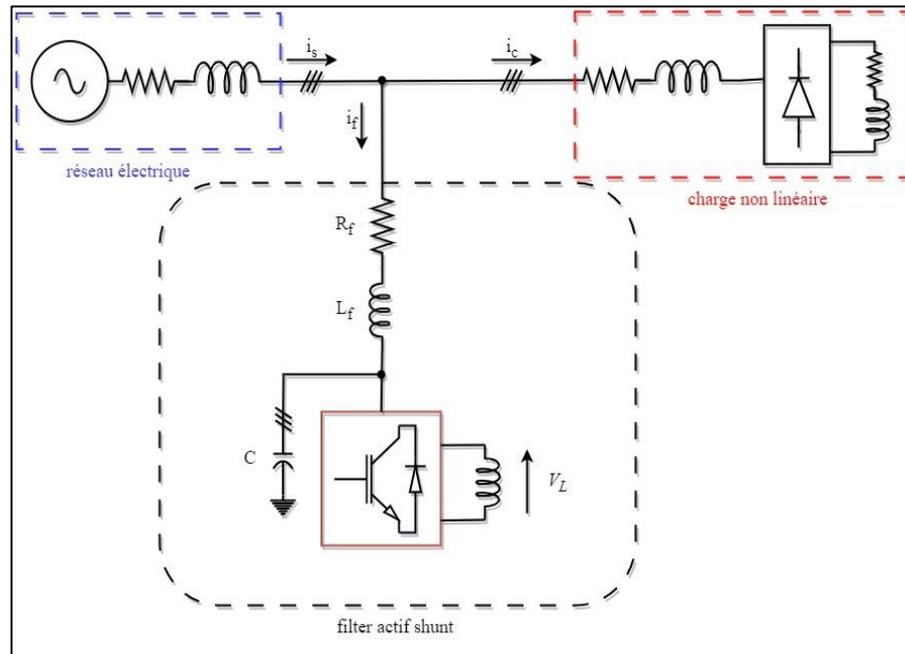


Figure I.2 : Filtre Actif Shunt type source de tension

I.3.4.2 Filtre actif série

Le but du filtre actif série est de créer une impédance en série avec le réseau qui sera nulle pour le fondamental et de valeur élevée pour les harmoniques. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, déséquilibres et creux de tension. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. En plus, ce filtre nécessite une protection complexe contre les court-circuits des réseaux. En effet, lors d'un court-circuit côté réseau, ce dernier peut être amené à supporter tout le courant de court-circuit.

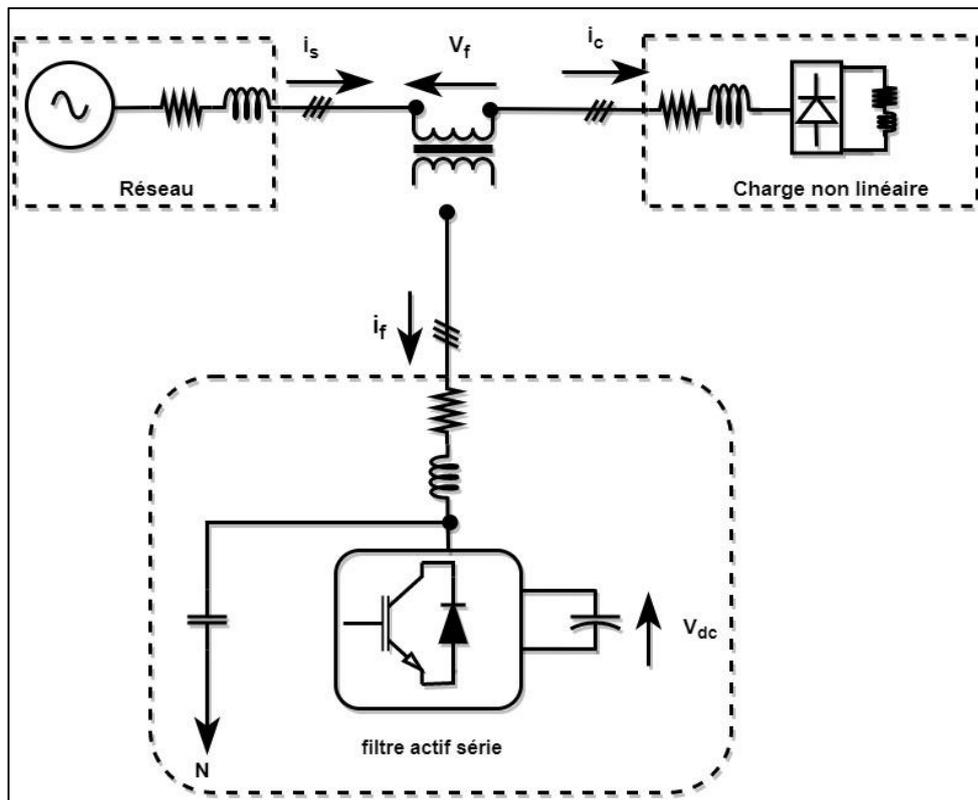


Figure I.3 : Filtre actif série.

Cependant, lorsque la puissance des charges polluantes est élevée, la solution d'un filtre actif par charge s'avère nécessaire. Cette dernière méthode est bien sûr plus coûteuse mais elle possède l'avantage d'éviter que la stabilité des harmoniques vienne perturber le réseau dans le cas où un filtre actif est défectueux.

I.3.4.3 Filtre actif hybride

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride (Figure I.4) est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation (HF) car il présente une haute impédance à cette fréquence [1].

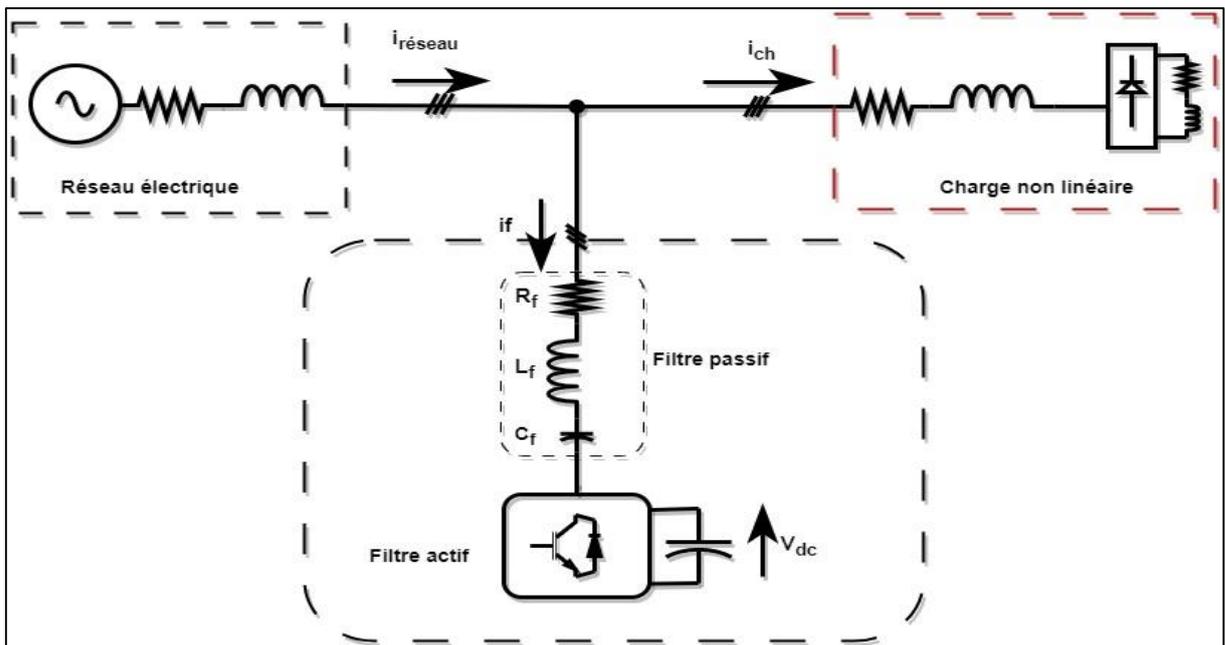


Figure I.4 : Filtre actif hybride.

I.3.5 Filtrage actif parallèle

Des trois solutions possibles présentées (filtres passifs, actifs et hybrides), on ne s'intéresse dans cette étude qu'au filtre actif, et en particulier, au filtre actif parallèle. Ce choix a été arrêté par le fait que le filtre actif est un dispositif bien connu, très développé et déjà commercialisé. On le considère donc comme un outil support pour nos travaux, à savoir pouvoir synthétiser et tester des structures de contrôle avancées qui seront présentées dans le chapitre suivant. Ainsi, par la suite, on va se concentrer sur le filtre actif shunt. Les filtres actifs parallèles de puissance sont composés d'un onduleur connecté au réseau à travers un filtre de nature inductive. Ils sont connectés avec ou sans transformateur en parallèle avec le réseau comme le montre la Figure 3.7. Les filtres actifs parallèles, à part pour compenser certains harmoniques, ont aussi d'autres possibles fonctionnalités :

- Contrôle de la puissance réactive
- Equilibrage des charges
- Réduction du Flicker
- Redresseur à prélèvement sinusoïdal

I.3.5.1 Applications des filtres actifs parallèles

La principale charge polluante, le redresseur à diodes ou à thyristors, est très utilisée que cela soit pour alimenter des charges continues à partir du réseau ou comme un élément d'interfaçage au réseau dans une conversion à étage intermédiaire continu. De plus en plus de dispositifs de ce type se connectent au réseau électrique. De ce fait, les filtres actifs parallèles ont un champ d'utilisation naturel dans les applications de réseau, notamment dans les réseaux faibles avec plusieurs charges polluantes et dans les réseaux à courant continu en haute tension. Les filtres actifs sont également utilisés dans des applications industrielles, afin de dépolluer une zone avec plusieurs charges non linéaires (redresseurs, certains éclairages, etc.). En fin, le filtrage actif est également employé dans les applications tertiaires car les filtres actifs peuvent être intéressants dans les bâtiments commerciaux, hôpitaux, etc. dans lesquels il y a de nombreuses charges polluantes comme des ordinateurs, éclairage économique, imprimantes lasers [15].

Ces filtres actifs compensent les courants harmoniques, les courants réactifs et les déséquilibres des charges. Les applications réseau, industrielles, tertiaires, domestiques et en télécommunications apparaissent comme des environnements particulièrement pollués par les harmoniques. On peut tout de même préciser que quelques fabricants proposent sur leurs catalogues des filtres actifs parallèles: ABB, Siemens, MGE UPS, AIM Europe et Mesta Electroniques. Tous ces fabricants utilisent des composants suffisamment rapides comme les transistors IGBTs. La puissance de ces filtres varie selon le fabricant et selon le modèle avec des gammes allant de 10 à 2000KVA. La quasi-totalité des filtres actifs sont triphasés, ils se connectent tous en basse tension ($V < 690V$), supportent des courants entre 300-480A et donnent le choix de se connecter avec ou sans neutre raccordé. Les filtres permettent une compensation globale des harmoniques, souvent jusqu'à l'harmonique 50. Ces filtres actifs, en plus de réduire le courant harmonique, améliorent le facteur de puissance et équilibrent les charges triphasées. L'utilisation de ces filtres produit une réduction des coûts d'exploitation et une prolongation de la durée de vie de l'installation.

I.3.5.2 Classement des filtres actifs parallèles

Il existe une grande variété de types de filtres actifs parallèles. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases, la technologie de l'onduleur et la topologie [16].

- Filtres actifs monophasés ou triphasés.
- Filtres actifs avec ou sans neutre raccordé.
- Filtres actifs basés sur l'onduleur de tension ou sur le commutateur de courant.

Actuellement, l'onduleur de tension est généralement préféré à cause de son meilleur rendement, de son moindre coût et de son volume plus réduit (si l'on compare le condensateur et l'inductance du côté continu). Par ailleurs, les modules à IGBT's disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de tension car en général une diode en antiparallèle est rajoutée pour chaque IGBT. Le commutateur de courant a quant à lui besoin de mettre en série avec chaque IGBT une diode anti-retour. De plus, un aspect vient clore provisoirement le choix : le commutateur de courant ne peut pas être utilisé avec des topologies multiniveaux classiques. En conséquence, presque tous les filtres actifs qui sont sur le marché sont composés d'onduleurs de tension. Ainsi, le choix le plus commun dans la plupart des applications consiste à utiliser un filtre actif triphasé basé sur un onduleur de tension sans neutre raccordé.

Conclusion

En conclusion, la pollution harmonique est un problème important dans les réseaux électriques, qui peut avoir des effets néfastes sur les équipements électriques et électroniques, ainsi que sur la qualité de l'énergie électrique fournie aux consommateurs. Heureusement, il existe plusieurs solutions pour dépolluer les réseaux électriques des harmoniques. L'une des solutions les plus courantes est l'utilisation de filtres passifs ou actifs pour atténuer ou éliminer les harmoniques indésirables. Les dispositifs tels que les convertisseurs statiques et les onduleurs peuvent également être utilisés pour réduire les harmoniques dans les systèmes d'alimentation électrique. D'autres approches peuvent inclure l'utilisation de systèmes de stockage d'énergie pour réduire les fluctuations de tension, ainsi que l'utilisation de techniques de modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour minimiser les harmoniques générés par les convertisseurs statiques. En fin de compte, la solution de dépollution la plus efficace dépendra des caractéristiques spécifiques du réseau électrique et des équipements qui y sont connectés. Il est donc important de réaliser une analyse détaillée de la situation et de travailler avec des experts pour concevoir une solution personnalisée qui répondra aux besoins spécifiques du système électrique concerné.

Chapitre II : Systèmes photovoltaïques

Introduction

Un système photovoltaïque (PV) est un type de système d'énergie renouvelable qui utilise des cellules solaires pour convertir directement la lumière du soleil en énergie électrique. Ces systèmes comprennent généralement plusieurs composants tels que :

- 1) Modules photovoltaïques
- 2) Onduleur
- 3) Batteries (en option)
- 4) Contrôleur de charge (en option)
- 5) Matériel de montage

Dans ce chapitre, notre étude consistera à la modélisation du système photovoltaïque connecté au réseau (PV+FAP) dans le but d'extraire le maximum de puissance du champ PV et de l'injecter réellement et efficacement dans le réseau et en même temps on conditionne avec une qualité d'énergie plus élevée. On commencera par détailler le principe de fonctionnement de le hacheur booste, le dimensionnement des différents éléments qui le compose. Et Après, on passe à la modélisation de l'onduleur de tension, réseau électrique, les charges non linéaires. Ensuite, on présentera une étude détaillée de l'onduleur de tension, sa structure, son principe de fonctionnement, la modélisation et la commande [8].

II.1 Effet photovoltaïque

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle-même, à la relation suivante :

$$E_{ph} = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (\text{II.1})$$

Où E_{ph} représente la quantité d'énergie, λ la longueur d'onde, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière. Principe de la génération photovoltaïque :

II.2 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

II.2.1 Cellule solaire

Une cellule est l'élément le plus important d'un module solaire. L'énergie solaire est définie comme le plus petit semi-conducteur avec une tension affectée à une seule intersection. Une rangée de cellules représente une rangée de cellules, Les modules à base de plaquettes ont généralement 10 ou 12 cellules, soit environ 60 à 100 cellules Les cellules d'un module à couches minces sont connectées électriquement en série. Deux ou plusieurs séries de cellules peuvent être connectées en parallèle avec des diodes Sauter pour créer des sous-modules électriquement indépendants, leur fonction Fractionner à partir de cellules ou de chaînes qui ne se trouvent pas dans le sous-module. La ligne arrière (doigts) forme le plus haut degré de métallisation. Il est placé directement sur la cellule et se compose d'une grille de lignes. Courant électromagnétique Les lignes du réseau sont collectées et placées sur des jeux de barres Également directement sur les cellules. L'illustration suivante montre un graphique de lignes de grille (doigts) et de barres. Omnibus (bus bar) de cellules en silicium monocristallin ou poly cristallin [9] [10].

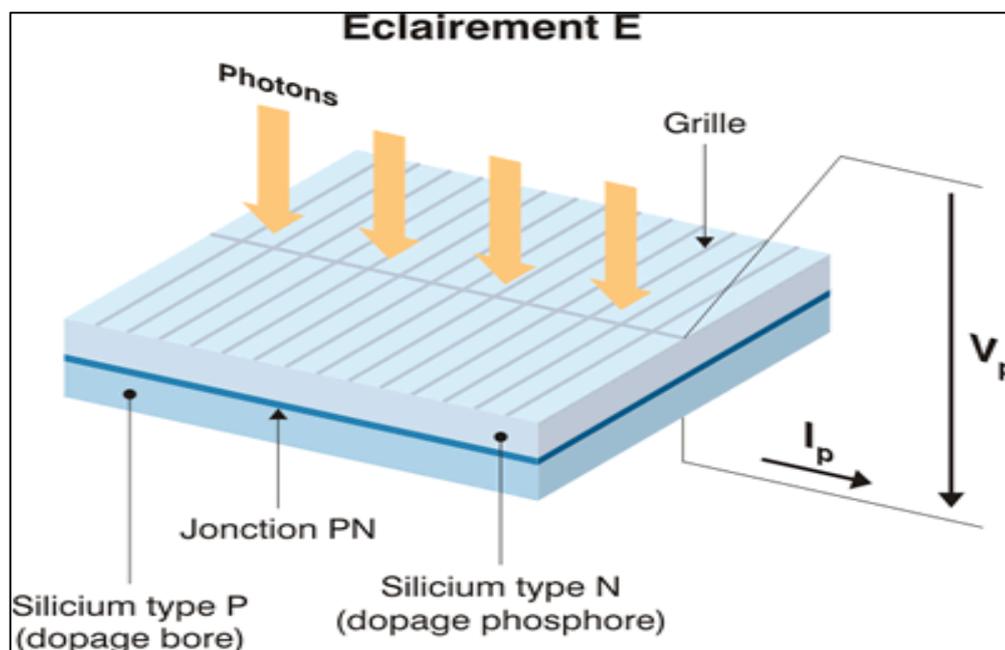


Figure II.1 : Schéma d'une cellule élémentaire.

L'effet du rayonnement lorsqu'il fournit assez d'énergie (si celle-ci est supérieure à la largeur de la bande interdite) fait apparaître des paires supplémentaires d'électron trou porteur (apparition simultanée d'un porteur n et d'un porteur p) dans la jonction.

Les porteurs p ainsi créés ont tendance à migrer vers le matériau p et les porteurs n vers le matériau n, renforçant la barrière de potentiel. Une partie des porteurs générés par le rayonnement sera elle aussi soumise à divers phénomènes de recombinaison (disparition simultanée d'un porteur n et d'un porteur p) [11].

II.2.2 Caractéristique d'une cellule PV

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- Sa tension à vide : V_{CO} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit: I_{CC} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{OPT} , I_{OPT} (parfois appelés aussi V_{MPP} , I_{MPP}) [11].

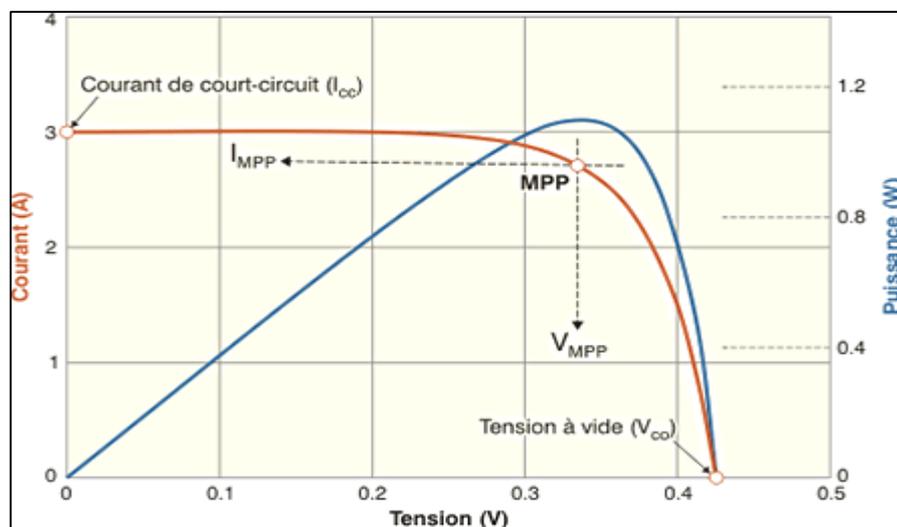


Figure II.2 : Caractéristique d'une cellule PV

II.3 Paramètres d'une cellule PV

II.3.1 Le courant de court- circuit et la tension à circuit ouvert

Les deux importants paramètres d'une cellule PV sont : le courant de court-circuit I_{sc} et la tension de circuit ouvert V_{oc} .

II.3.1.1 Le courant de court-circuit : $I_{sc} \approx I_{ph}$ il est plus grand valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit ou $V=0$.

II.3.1.2 La tension à circuit ouvert : est la tension à travers la jonction/diode PN ou

$I = 0$ et $I_D = I_{ph}$ Elle représente la tension de cellule lorsqu'elle est à l'ombre et peut être exprimé comme suit :

$$V = V_{oc} = \left(\frac{m \cdot k \cdot T_c}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} \right) = V_{th} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_o} \right) \quad \text{(II.2)}$$

Avec V_{th} : la tension thermique.

Ou encore : l'équation courant-tension de la cellule s'écrit donc :

$$I = I_{sc} \left(1 - \left(\exp \left[\frac{V - V_{oc} + IR_s}{V_{th}} \right] \right) \right) \quad \text{(II.3)}$$

Les équations donnant la variation de la tension de circuit ouvert (V_{oc}) et le courant de court-circuit (I_{sc}) en fonction de l'éclairement G_a (W/m^2) et de la température de jonction T ($^{\circ}C$) et par rapport aux conditions standards STC ($25^{\circ}C$, $1000W/m^2$, $AM1.5$) sont les suivantes :

$$I_{sc} = C_1 \cdot G_a [1 + (T_c - T_c(STC)) \cdot 5 \cdot 10^{-4}] \quad \text{(II.4)}$$

$$C_1 = \frac{I_{sc}(STC)}{G_a(STC)}$$

$$V_{oc} = V_{oc}(STC) + C_3 \cdot (T_c - T_c(STC)) + V_{th} \cdot \ln \left[\frac{G_a}{G_a(STC)} \right] \quad \text{(II.5)}$$

Avec : Le coefficient C_3 représente le facteur de correction de la tension de circuit ouvert en fonction de la température. La valeur type de ce facteur est égale à $C_3 = -2.3 \cdot 10^{-3} V/^{\circ}C$, la température des cellules T_c dépend exclusivement de l'ensoleillement G_a et de la température ambiante T_a .

$$T_c = T_a + C_2 \cdot G_a \quad (\text{II.6})$$

Où C_2 est approximativement cm^2/W . [12]

II.3.2 Le point de puissance maximal

C'est le point sur la courbe $I - V$ de la cellule où la puissance est maximale (la puissance absorbée par la charge résistive est maximale), ceci peut être vu sur la figure précédente (II.3). De cette figure, une condition de puissance maximum est vérifiée quand I_{mpp} rencontre V_{mpp} .

La figure II.3, montre les courbes typiques $I - V$ et $P - V$ pour un module PV de 60W. [13]

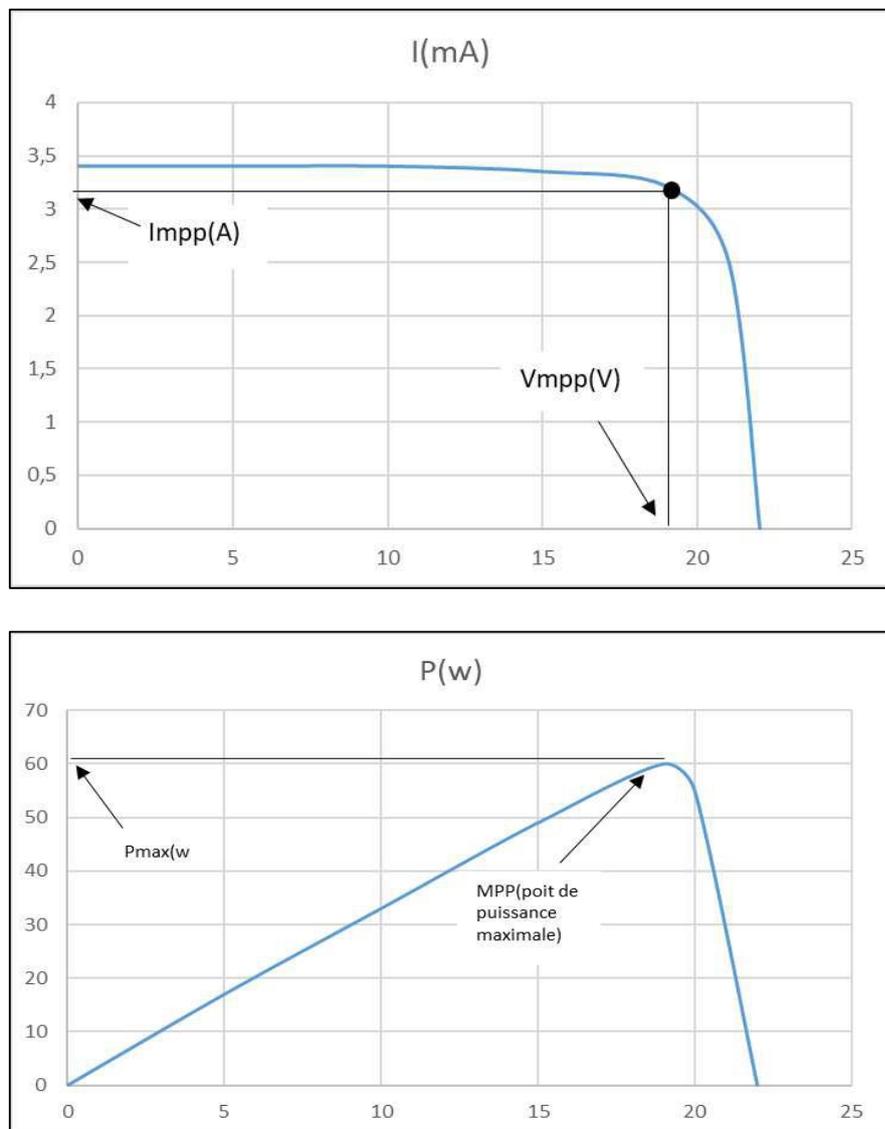


Figure II.3 : Caractéristiques V-I, P-V d'un module PV(MPP).

II.3.3 Le facteur de forme FF

Est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge et le produit de (I_{sc} , V_{oc}).

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (II.7)$$

Pour les cellules ayant moyen rendement, le FF a des valeurs d'ordre 0.7 à 0.85.

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad (II.8)$$

Le facteur de forme FF diminue si la température augmente. [13]

II.3.4 Influence de l'éclairement

L'augmentation d'ensoleillement se traduit par un déplacement de la caractéristique $I = f(V)$ suivant l'axe des courants pour une température $T=25^\circ\text{C}$.

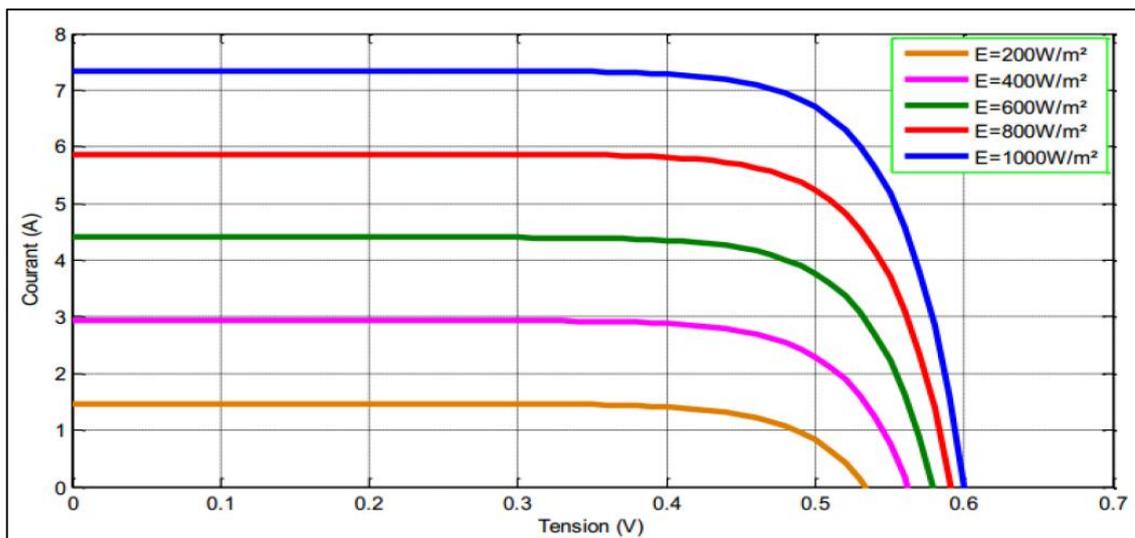


Figure II.4 : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

- On remarque que la valeur du courant de court-circuit est proportionnelle à l'intensité du rayonnement, alors que la tension ne varie presque pas même à faible éclairement.

- L'irradiation standard internationalement acceptée pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000W/m^2 et une température de 25C° . [12]

II.3.5 Influence de la température

Le comportement du même module sous une lumière de 1000 W/m^2 et à des températures différents est représenté ci-dessous.

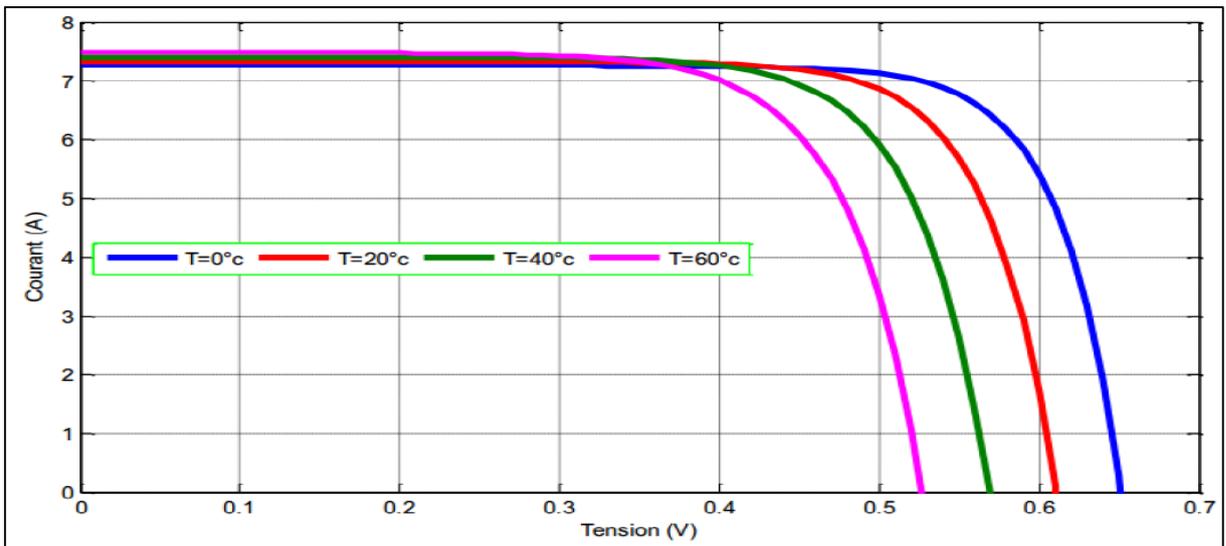


Figure II.5 : Caractéristique I(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).

La température est un paramètre important puisque les cellules sont exposées au rayonnement solaire. Nous avons mentionné précédemment que la cellule convertit ces rayons en énergie électrique, mais une partie de celle-ci apparaît sous forme de chaleur dans la cellule, ce qui la rend plus chaude que la température ambiante.

- On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit, par contre La tension de circuit ouvert diminue au fur et à mesure que la température augmente, ce qui entrain par la suite le changement de l'emplacement du PPM. [12]

II.4 Généralités sur les Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Les problèmes d'approvisionnements en énergie rencontrés à l'échelle mondiale ne sont pas uniquement dus à la destruction de l'environnement et aux changements climatiques qui en découlent, mais bien aussi à une croissance de la consommation mondiale en hausse, en

particulier en ce qui concerne l'énergie électrique et une tendance à la libéralisation sont à l'origine de changements considérables, tant dans le domaine des réseaux d'alimentation que pour le remplacement du parc des centrales électriques. Les conséquences, pour le moins préoccupantes, se répercutent sur la disponibilité et la qualité de l'énergie. C'est pourquoi les solutions recherchées doivent être réalisables techniquement parlant tout en répondant aux exigences en matière de durabilité. Dans cette partie, une étude descriptive générale des systèmes photovoltaïques reliés au réseau électrique est présentée. Cette étude comprend : la conception des systèmes photovoltaïques, les problèmes produits, les techniques d'interconnexions.

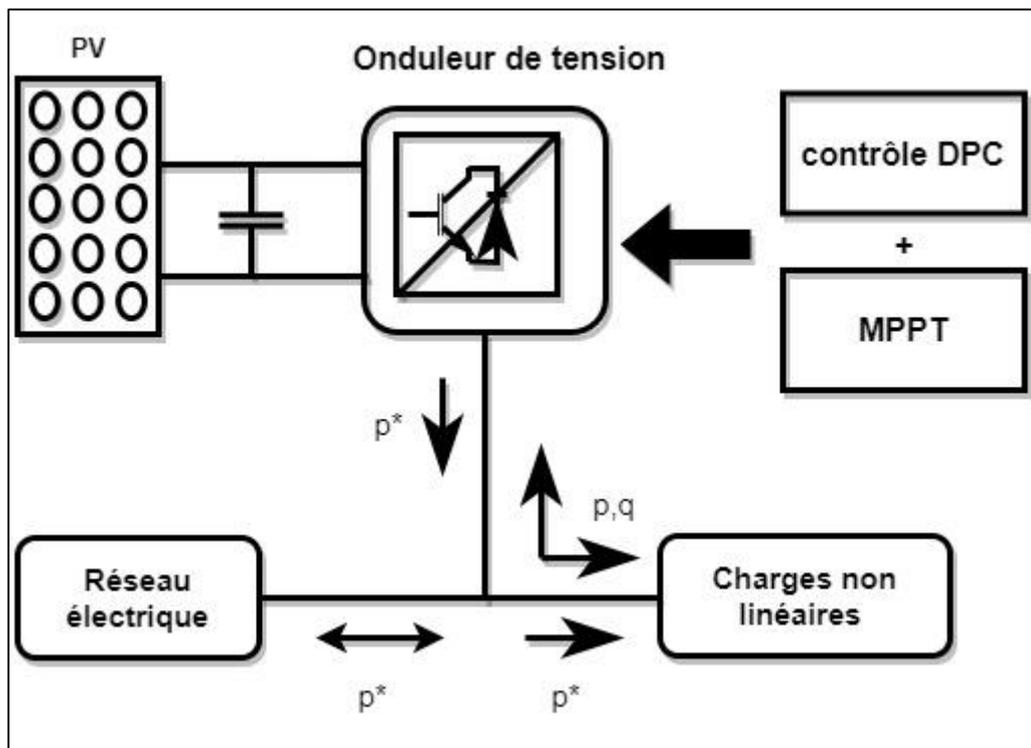


Figure II.6 : Schéma des systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

II.4.1 Les différents types de systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser

les modules, les câblages, la batterie en cas de stockage et sont régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

II.4.1.1 Structure générale d'un système photovoltaïque

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque :

- **Les systèmes à connexion directe au réseau** : cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique.
- **Le système à bus continu intermédiaire** : Le générateur photovoltaïque est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée, celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau.

Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable. Dans notre étude le système photovoltaïque proposer est connecté au réseau via un bus continu intermédiaire.

II.4.1.2 Système à bus continu intermédiaire

II.4.1.2.1 Structure avec hacheur et onduleur

Les hacheurs présentent la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un générateur photovoltaïque, ils sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé et élève la tension en sortie du module photovoltaïque en une tension délivrée sur le bus continu figure (12).

On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale. Cette structure est ainsi conçue pour fonctionner en parallèle et en interconnexion avec le réseau public d'électricité ou pour un compensateur des harmoniques (filtre actif). Le principal composant de ce type de système (filtre actif) est l'onduleur. Il convertit la puissance continue (DC) obtenue à partir des modules PV en puissance alternative en respectant les conditions de qualité de la tension et de la puissance exigées par le réseau, avec une possibilité d'arrêt automatique quand le réseau n'est pas en fonctionnement.

Cela permet de produire une puissance alternative à partir du système PV soit en alimentant directement toutes les charges électriques, soit en injectant le surplus d'électricité (PV) dans le réseau lorsque les besoins sont plus importants. Dans cette structure on va associer à la capacité du bus continu, un générateur photovoltaïque pour répondre aux mieux aux exigences du système de filtrage actif d'harmonique.

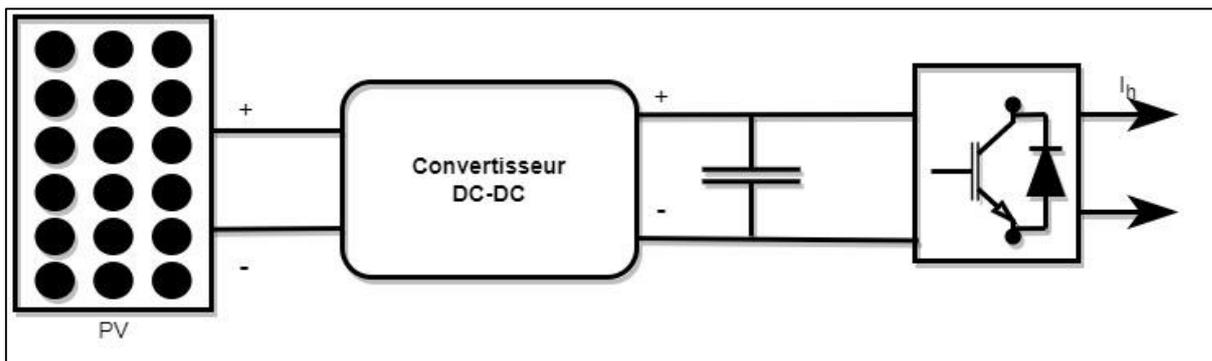


Figure II.7 : Générateur photovoltaïque et onduleur.

II.5 Convertisseur de puissance de système photovoltaïque

Par convention, des systèmes de conversion photovoltaïques reliés au réseau se composent de convertisseur DC-DC et d'onduleur. Le convertisseur DC-DC est contrôlé pour la poursuite du point de puissance maximum du panneau photovoltaïque et l'onduleur est contrôlé pour produire le courant de telle manière que le courant de système ait une faible déformation totale d'harmonique et il ait en phase avec la tension de réseau. Cette partie décrit certains convertisseurs d'électronique de puissance et les techniques de commande et de conversion (DC-DC).

II.5.1 Convertisseurs DC/DC

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs

(transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance.

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (figure 13), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues.

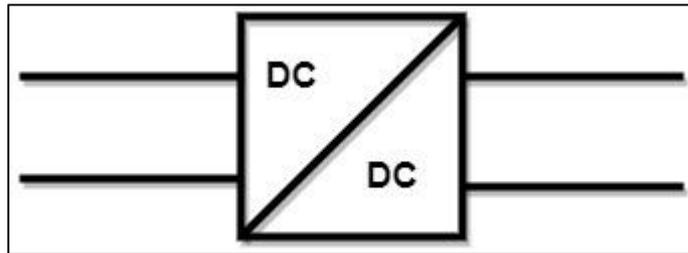


Figure II.8 : Symbole d'un convertisseur DC-DC

II.5.1.1 Description

Le but de la conversion *DC/DC* est d'assurer l'adaptation d'énergie entre une source de tension continue à l'entrée et une source de courant continu à la sortie. Dans le présent travail l'intérêt sera porté sur les convertisseurs de types continus appelés "Hacheurs", qu'ils soient abaisseurs, éleveurs ou bien dévolteurs/survolteurs, qui correspondent aux applications moyennes et forte puissance. La représentation symbolique la plus couramment utilisée est donnée par la figure suivante :

Les Hacheurs sont les convertisseurs statiques continu-continu permettant de donner une source d'énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) à partir d'une source continue fixe. Ils sont généralement utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et l'alimentation d'une charge continue et pour le stockage d'énergie dans des batteries. Ils permettent aussi de commander la poursuite du point de puissance maximale d'un système PV en suivant des stratégies de contrôle spécifiques. La conversion d'énergie se fait par commutation [14].

II.5.2 Onduleur de tension DC/AC

Les onduleurs sont des dispositifs qui convertissent la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries en une tension que les récepteurs peuvent comprendre diverses tensions continues ou alternatives. En effet, l'étude de l'onduleur est fascinante car il est

largement utilisé sources de production d'énergie dispersées connectées au réseau de nouvelles sortes (Éoliennes, panneaux solaires, piles à combustible, etc.)

La puissance nominale des onduleurs connectés au réseau varie de 100W à plusieurs centaines de kW. Ils fonctionnent généralement à 230V jusqu'à 5kW, Ils doivent être triphasés s'ils sont au-dessus du monophasé (basse ou moyenne tension).

Parce qu'ils sont directement connectés au générateur photovoltaïque, leur tension et leur courant d'entrée sont très variables en fonction de la quantité de lumière solaire et de la température ambiante. La recherche du point de la puissance maximum (PPT) pour "Maximum Power Point Tracking", c'est-à-dire l'adaptation constante de l'impédance d'entrée afin d'optimiser le produit $P = U.I$ sur la caractéristique du champ PV, est l'une des fonctions les plus importantes de l'onduleur réseau. L'onduleur doit alors générer une (ou trois) tensions sinusoïdales pour correspondre aux spécifications.

II.6 Stratégie de commande de l'onduleur coté réseau

La structure du système de contrôle de l'onduleur peut être divisée en deux sous-systèmes, chacun avec sa propre dynamique : le système rapide, qui est lié aux courants, et le système lent, qui est lié à la tension continue. Par conséquent, il est possible de synthétiser deux régulateurs pour les courants de boucle et la boucle de tension continue externe. Les performances de la boucle de courant sont critiques pour les performances globales du système, c'est pourquoi une commande avec une réponse rapide et un bon comportement à l'état stationnaire est requis. L'utilisation de commandes conventionnelles, en particulier les contrôleurs proportionnels-intégraux, semble être suffisante pour que la modification de la tension continue fournisse des performances satisfaisantes.

II.6.1 Objectif de la commande de l'onduleur

La commande pour le but de contrôler la séquence d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de semi-conducteur (IGBT), afin que la tension de sortie de l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Il est possible d'employer une approche de contrôle existante de la littérature :

- Contrôle basé sur l'hystérésis.
- Contrôle basé sur MLI-ST (modulation de largeur d'impulsion Sinus triangle).

- Commande base sur modulation de largeur d'impulsion vectorielle (MLI-V)

II.6.2 Principe de contrôle par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la Fig. 16, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations. [5]

Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis. De plus, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis.

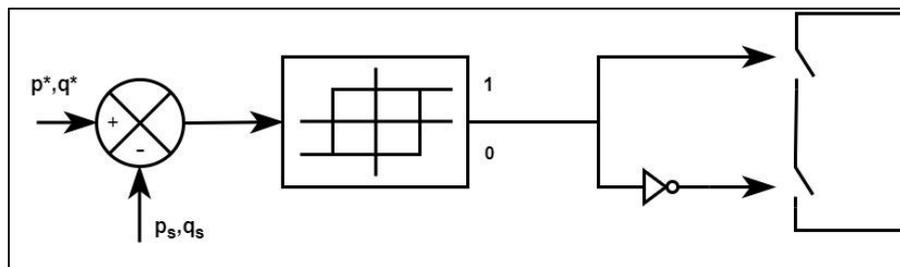


Figure II.9 : Principe de commande des courants par hystérésis.

Conclusion

Dans le chapitre précédent, nous avons effectivement présenté les différents composants d'un système photovoltaïque. Nous avons étudié le principe de l'effet photovoltaïque, qui est à la base de la conversion de l'énergie solaire en électricité, ainsi que les caractéristiques et les paramètres des cellules photovoltaïques. Nous avons également abordé les systèmes photovoltaïques dans leur ensemble, en mettant en évidence leurs performances et en soulignant l'importance d'optimiser la production d'énergie solaire. Et nous avons effectivement présenté brièvement quelques topologies de base des alimentations à découpage, qui sont essentiellement des convertisseurs. Voici une brève description de certains de ces convertisseurs : Convertisseur onduleur Redresseur, Hacheur, Gradateur.

Chacun de ces convertisseurs présente différentes variantes et configurations en fonction des besoins spécifiques des applications. Dans le chapitre, nous avons probablement présenté certains des types spécifiques de chaque convertisseur, en mettant en évidence leurs caractéristiques et leurs utilisations courantes.

Chapitre III : Résultats de simulation

Introduction

Dans ce chapitre, l'étude porte sur la simulation du fonctionnement du système de compensation des harmoniques en utilisant le contrôle direct de puissance. Cette approche de commande se distingue par l'emploi d'un onduleur (filtre actif) et la mise en œuvre de la commande en courant et de la commande de puissance. Les résultats de simulation obtenus sont partagés à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

III.1 Schéma de bloc du système

Le système utilisé dans ce travail se compose de plusieurs composants :

- Le générateur de puissance PV.
- Le convertisseur DC-DC.
- L'onduleur de tension triphasé.
- Réseau électrique de tension triphasé.
- La charge polluante.

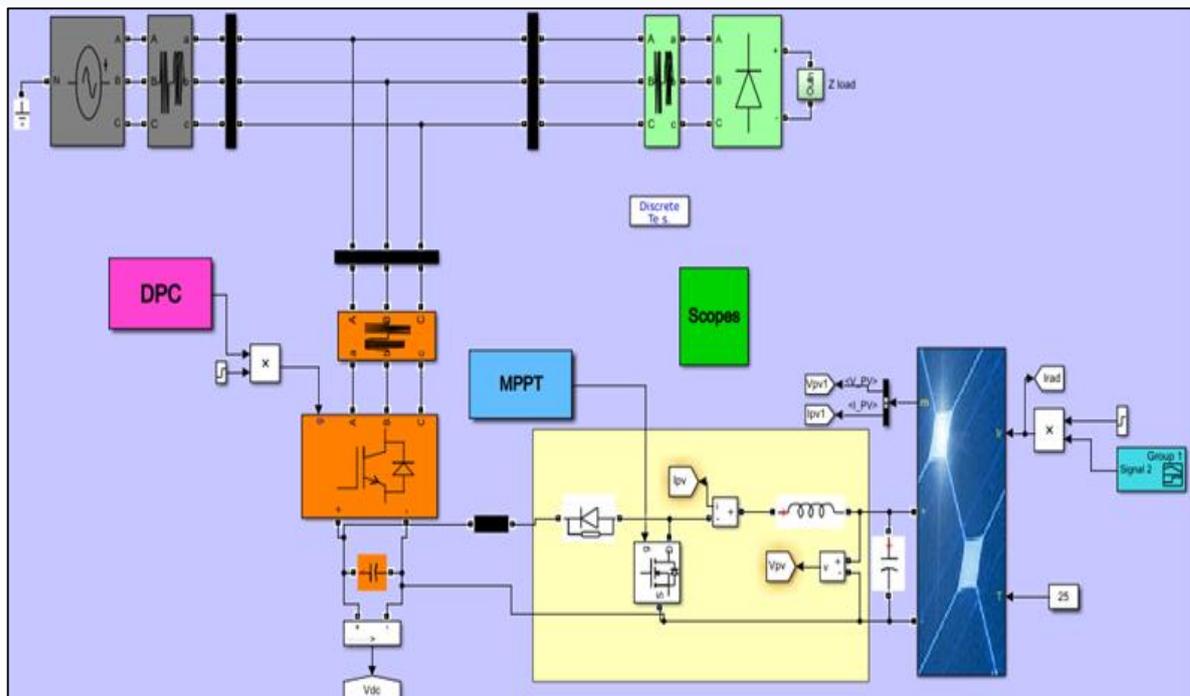


Figure III.1 : Schéma de bloc du système sous MATLAB/Simulink.

III.2 Simulation du module photovoltaïque

Dans cette étude, nous avons reproduit le module solaire 1Soltech 1STH-220-P, qui est composé de 6×10 Cellule poly cristalline connectées en série. Il peut produire 220 W de puissance et 7.47A de courant à une tension idéale de 29.3 V dans des conditions d’essai standard (CST : lumière de 1000W/m^2 et température $T = 25^\circ\text{C}$). La Figure III.2 présente le block du module photovoltaïque 1Soltech 1STH-220-P: Le tableau III.1 énumère les caractéristiques électriques de ce module PV.

Tableau III.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque dans les conditions standards de test (CST)

Puissance maximal	218.871W
Tension à puissance maximale ou tension optimale	29.3 V
Courant à puissance maximale ou courant optimal	7.47 A
Courant de court- circuit	7.97 A
Tension à circuit ouvert	36.6 V
Nombre des cellules	60

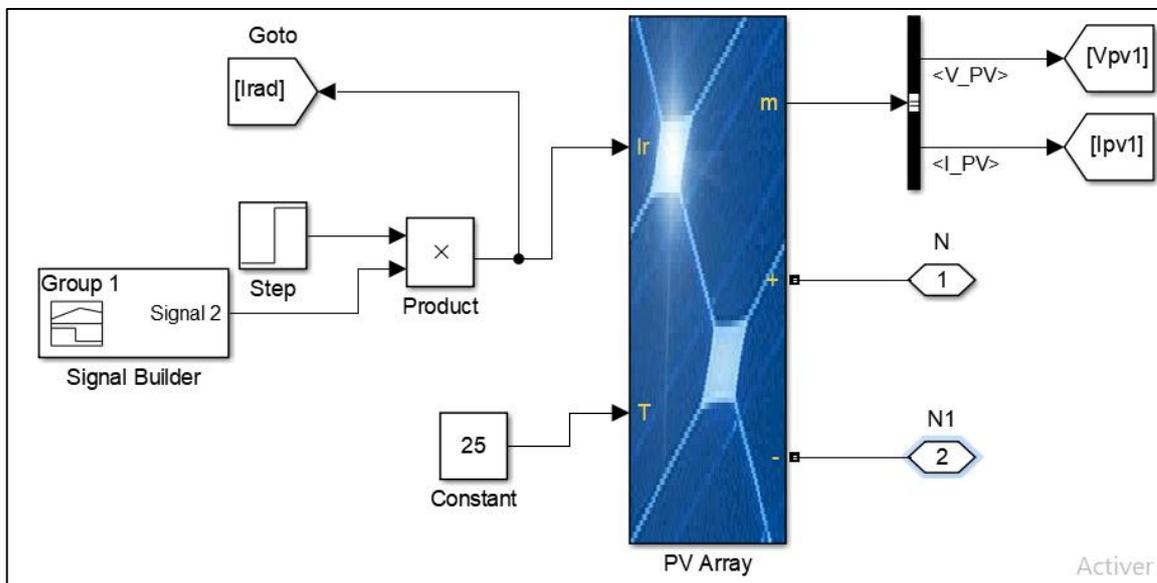


Figure III.2 : Le schéma block du module PV sous MATLAB/Simulink.

III.2.1 Les caractéristique I-V et P-V d'un module PV

Dans la figure III.3, nous représentons les résultats concernant les caractéristiques I(V) et P(V) du panneau à 25° .

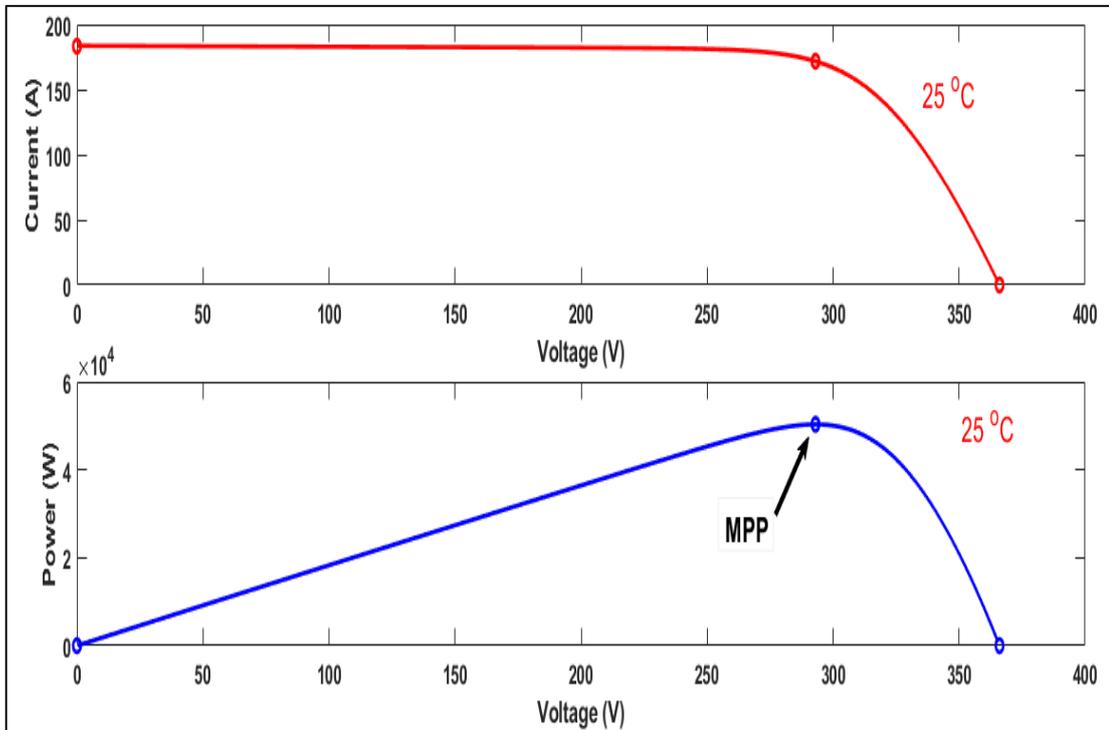


Figure III.3 : Caractéristique I-V et P-V d'un module

Le comportement des cellules PV est fortement influencé par la température. Le comportement du module sous un éclairage fixe de 1000W/m^2 et à de température allant de $25\text{ }^\circ\text{C}$ est illustré à la figure III.3. Nous observons que si la tension en circuit ouvert diminue à mesure que la température augmente, le courant ne le fait pas. La puissance maximale qui peut être utilisée est réduite en conséquence.

La figure III.4 présente le profil d'irradiation du GPV dans cette simulation,

- Le réseau électrique pollué par la charge avec l'injection du courant de filtre et sans l'injection de puissance de PV solaire dans le période 0s à 0.3s et 0.75s à 0.9s.
- Le réseau électrique pollué par la charge avec l'injection du courant de filtre et l'injection de puissance de PV solaire on fonction de l'irradiation dans le période 0.3s à 0.75s.

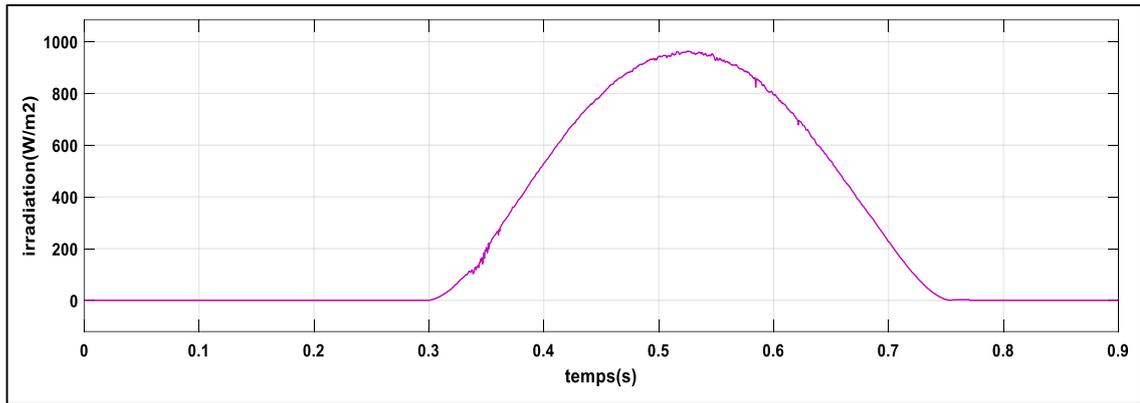


Figure III.4 : profile d'irradiation du GPV

III.3 Commande MPPT de type P&O du système GPV

Parmi les techniques conventionnelles de suivi du point de puissance maximale (MPPT), la technique de perturbation et d'observation (P&O) ainsi que la technique de conductance incrémentale sont les algorithmes les plus simples et les plus couramment utilisés. Ces méthodes induisent une oscillation autour du point de puissance maximale (PPM). En effet, cette oscillation est nécessaire pour détecter les variations de la puissance de sortie du générateur photovoltaïque (GPV) et ajuster en conséquence le rapport cyclique (D) du convertisseur DC-DC, de manière à maintenir le point de fonctionnement du GPV aussi proche que possible du MPP, même en présence de conditions de fonctionnement constantes. Cependant, cette oscillation entraîne des pertes en régime permanent.

D'autre part, la méthode de contrôle MPPT basée sur l'algorithme d'incrément de conductance utilise la dérivée de la conductance du GPV pour déterminer la position relative du MPP [19].

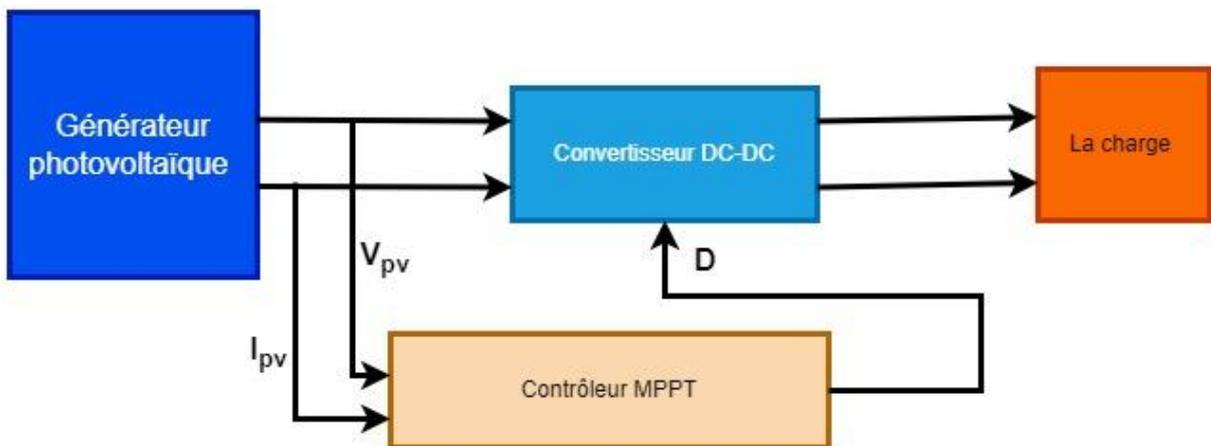


Figure III.5 : Schéma de Commande MPPT du système GPV.

III.3.1 MPPT de type P&O

L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

De nombreuses recherches sur les commandes (MPPT) ont été effectuées afin de trouver un système optimal permettant une recherche du (MPP) selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. Les commandes (MPPT) développées, sont toutes basées sur une commande extrême de type Perturbe & Observe (P&O).

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et en observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ($dP=dV < 0$), L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante. L'organigramme de la Figure III.6.

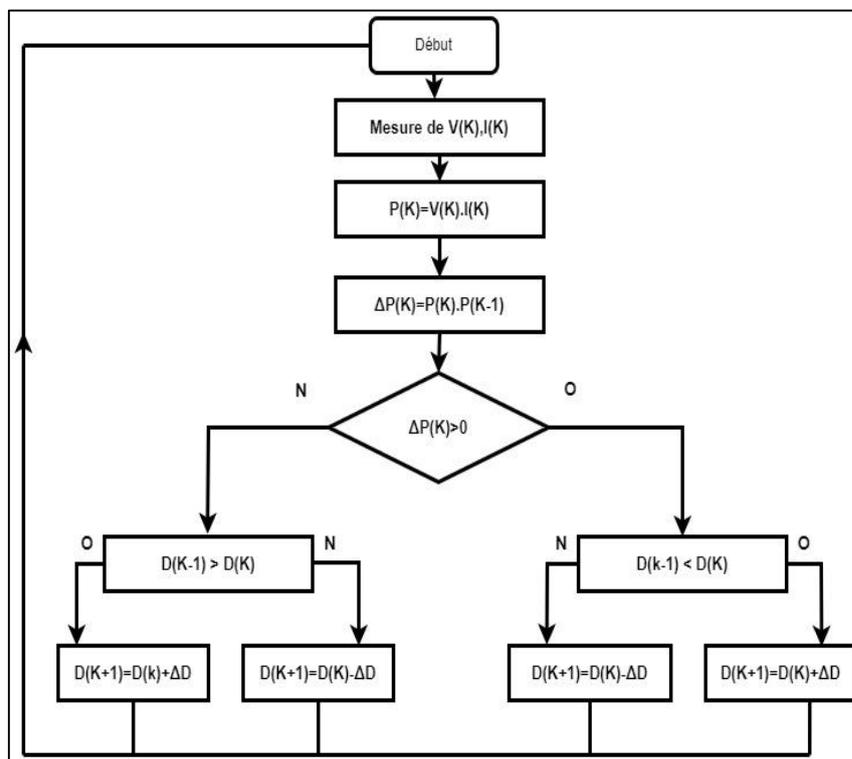


Figure III.6: Organigramme d'algorithme (P&O).

III.3.2 la tension de bus continu

La figure III.7 représente la tension de bus continu délivrée selon la durée de 0s à 0.9s.

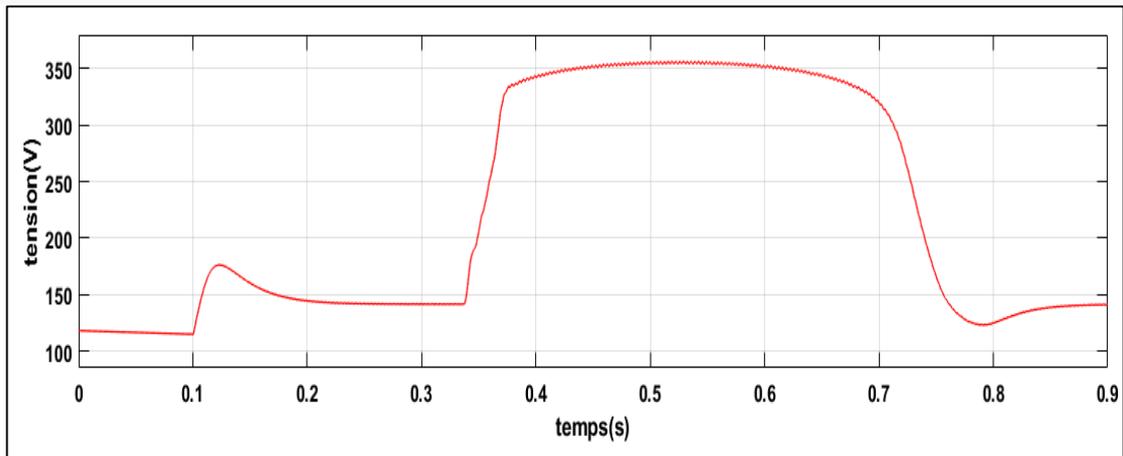


Figure III.7: la tension de bus continu d'un condensateur Cdc.

III.4 Commande directe de puissance

La définition générale décrit la DPC comme la technique de contrôle qui utilise directement les puissances instantanées comme variables de contrôle, sans utiliser des boucles de courant ou des blocs de modulation car les états de commutation de l'onduleur sont choisis directement par un tableau de commutation [16].

Dans les paragraphes suivants, nous présentons brièvement le principe de fonctionnement de la DPC, en analysant sa structure et en présentant ses points forts et ses points faibles. Dans notre étude, nous avons utilisé cette technique pour contrôler le système de compensation triphasé.

III.4.1 DPC classique

L'idée principale de la technique DPC classique est illustrée par la figure III.8. Généralement, la tension du bus continu est régulée pour un contrôle de la puissance active. Le fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire est obtenu en imposant à la puissance réactive une valeur nulle. Ainsi après la mesure des courants (a_s, b_s, I_c) et des tensions (a_s, b_s, V_c) du réseau, on calcule les puissances active et réactive (P et Q), ensuite on les compare avec leurs puissance de référence (P^* et Q^*). Les erreurs de puissance sont introduites vers deux bandes d'hystérésis. En utilisant la sortie de deux comparateurs à hystérésis à deux niveaux,

ainsi que la position angulaire du vecteur des tensions du réseau, on détermine les états de commutation de l'onduleur, pour chaque période d'échantillonnage [16,17].

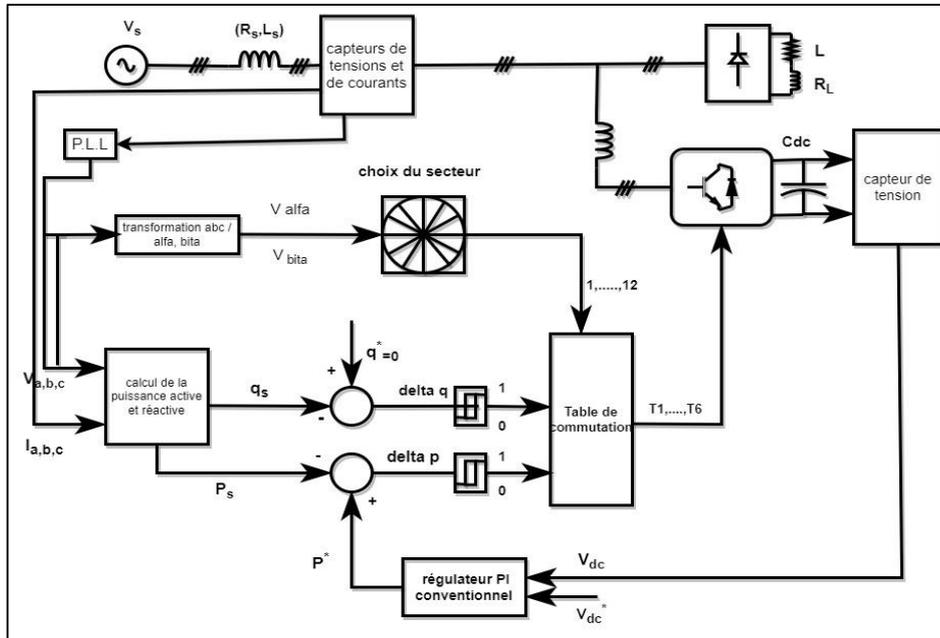


Figure III.8 : Schéma bloc de la technique DPC classique.

III.4.1.1 Calcul des puissances instantanées

Pour un système triphasé, la puissance active instantanée est définie par le produit scalaire des courants et des tensions de ligne. La puissance réactive est définie par le module de leur produit vectoriel. Ces puissances sont exprimées respectivement par la relation [16]:

$$p = \text{Re}(\vec{v}_s \cdot \vec{i}_s^*) \quad (\text{III.1})$$

$$q = \text{Im}(\vec{v}_s \cdot \vec{i}_s^*) \quad (\text{III.2})$$

Où p est la puissance active instantanée (aussi appelée puissance réelle), q est la puissance réactive instantanée (aussi appelée puissance imaginaire), v et i sont les vecteurs de tension et courant de ligne et le symbole $*$ dénote le conjugué.

Donc, les puissances active et réactive instantanées sont calculées par l'expression ci-dessous :

$$p(t) = v_{sa} \cdot i_{sa} + v_{sb} \cdot i_{sb} + v_{sc} \cdot i_{sc} \quad (\text{III.3})$$

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{sa} - v_{sb}) \cdot i_{sc} + (v_{sb} - v_{sc}) \cdot i_{sa} + (v_{sc} - v_{sa}) \cdot i_{sb}] \quad (\text{III.4})$$

III.4.2 Contrôleurs à hystérésis :

L'idée principale de la commande DPC est de maintenir les puissances active et réactive instantanées dans une bande désirée. Ce contrôle est basé sur deux comparateurs à hystérésis qui utilisent comme entrée les signaux d'erreurs entre les valeurs de références et estimées des puissances actives et réactive [17].

$$\Delta p = p^* - p \quad (\text{III.5})$$

$$\Delta q = q^* - q \quad (\text{III.6})$$

Le comportement du contrôleur à hystérésis relativement aux limites des erreurs de puissances peut être résumé comme suit [17]:

$$\Delta p, q > HB_{p,q} \quad (\text{III.7})$$

$$-HB_{p,q} \leq \Delta p, q \leq HB_{p,q} \text{ et } \frac{d(\Delta p, q)}{dt} < 0 \} dp, q = 1 \quad (\text{III.8})$$

$$\Delta p, q < -HB_{p,q} \quad (\text{III.9})$$

$$-HB_{p,q} \leq \Delta p, q \leq HB_{p,q} \text{ et } \frac{d(\Delta p, q)}{dt} > 0 \} dp, q = 1 \quad (\text{III.10})$$

III.4.2.1 Choix du secteur :

L'influence de chaque vecteur de sortie résultant du FAP sur les puissances active et réactive est très dépendante de la position réelle du vecteur de la tension de source. Ainsi, outre les signaux des deux contrôleurs à hystérésis, la table de commutation fonctionne selon la position du vecteur de la tension de source, qui tourne à la pulsation (ω), dans le plan complexe. Toutefois, au lieu d'introduire dans la table de commutation la position exacte du vecteur de la tension, le bloc du choix de secteur nous informe dans quel secteur se trouve le vecteur réel de la tension de source [17].

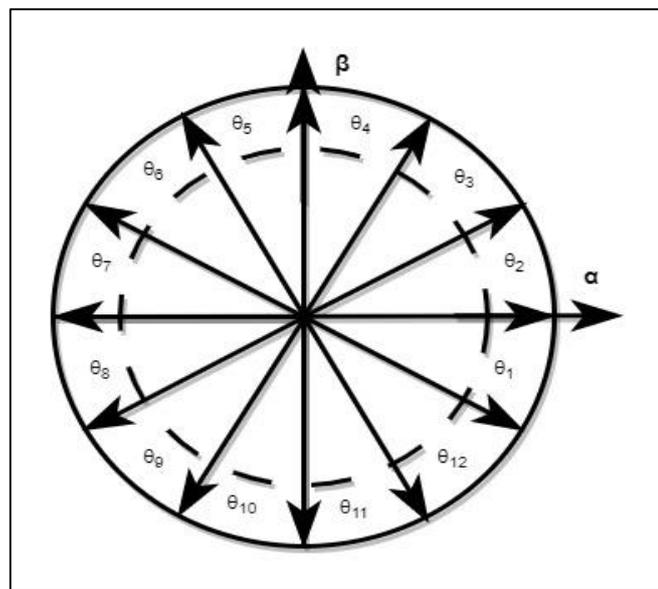


Figure III.10 : Représentation du vecteur de la tension dans le plan (α, β) divisé en douze (12) secteurs.

Afin d'augmenter la précision, le plan α - β est divisé en douze secteurs égaux de 30° , comme l'illustre le graphique de la figure III.10, où le premier secteur est défini entre $-\frac{\pi}{3} < \theta_1 < 0$. Les régions consécutives suivent dans le sens trigonométrique le même critère, qui peut être génériquement exprimé par :

$$(n - 2) \frac{\pi}{6} < \theta_n < (n - 1) \frac{\pi}{6} \quad n = 1, 2, \dots, 12 \quad \text{(III.11)}$$

L'angle est calculé en utilisant la fonction trigonométrique inverse, basée sur les composantes du vecteur de la tension dans le repère indiquée par l'équation :

$$\theta = \arctan \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}} \quad \text{(III.12)}$$

III.4.2.2 Table de commutation

Le tableau de commutations présenté dans cette partie a été développé dans [17]. L’auteur divise le tableau en douze secteurs afin d’améliorer la précision. Lorsque le vecteur de tension est aligné avec le référentiel tournant choisi, la puissance active instantanée est proportionnelle à la composante directe du courant de sortie et la puissance réactive instantanée au courant en quadrature.

La tension de sortie de l’onduleur dépend des états de commutation de l’onduleur (T1, T2, T3). Selon les valeurs de ces variables, huit différents vecteurs peuvent être appliqués : deux vecteurs nuls (v_0 et v_7) et six vecteurs actifs (v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , v_5 et v_6). Une fois les sorties logiques des comparateurs à hystérésis établies, et suivant le numéro du secteur où se trouve le vecteur, $v_{\alpha, \beta}$, le vecteur des tensions à appliquer à l’entrée de l’onduleur est sélectionné à partir de la table de commutation classique développée par Noguchi comme l’indique le tableau 2.

Tableau III.2: Table de commutation de la DPC

Dp	dq	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8	Θ9	Θ10	Θ11	Θ12
1	0	V_6	V_7	V_1	V_0	V_2	V_7	V_3	V_0	V_4	V_7	V_5	V_0
1	1	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0
0	0	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_6	V_6	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
0	1	V_1	V_2	V_2	V_6	V_6	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1

III.4.3 Contrôle de la tension du bus continu utilisant le régulateur conventionnel PI

Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante comme le montre la figure 28, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur. Dans l’objectif d’assurer une bonne qualité de compensation des perturbations de tension dans des cas de fonctionnements extrêmes du réseau électrique, les régulateurs classiques de type PI ont été employés. Ainsi, la multiplication de l’amplitude maximale des courant de source (I_{max}) avec la tension du condensateur (V_{dc}) donne la puissance active de référence (P^*) qui a été utilisée comme variable de contrôle dans la commande DPC classique.

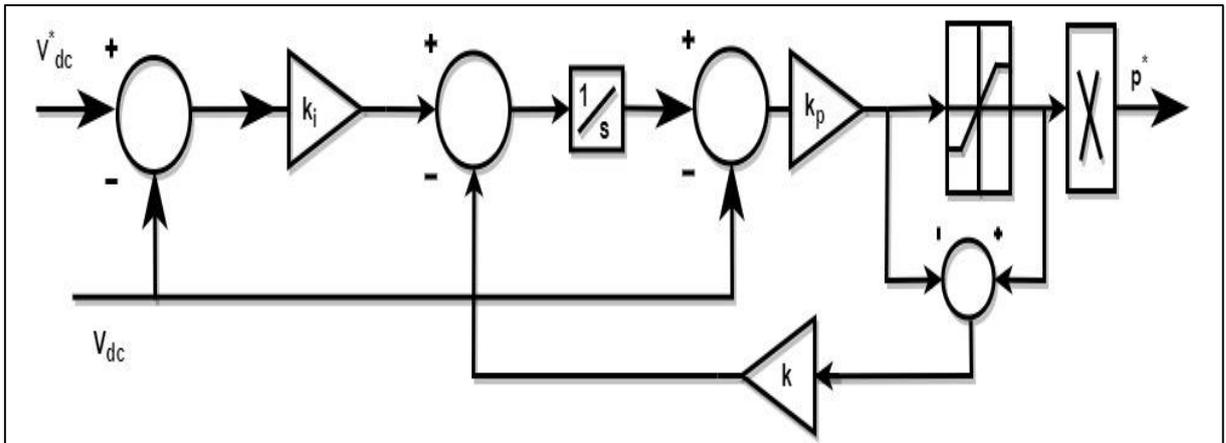


Figure III.11 : Boucle de régulation du bus continu du FAP triphasé.

III.4.4 Le résultat de la simulation de la technique DPC

Les paramètres de simulation utilisée sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : Les paramètres utilisés dans la simulation.

Elément de l'installation	Valeur de paramètres
Le réseau d'alimentation	$v_s = 50 \text{ v}$ $f_s = 50 \text{ hz}$ $R_s = 0.1 \Omega$ $L_s = 50e^{-6} \text{ H}$
La charge non linéaire	$R_L = 16.5 \Omega$ $L_L = e^{-3} \text{ H}$
Le Boost	$L_{Boost} = 3e^{-3} \text{ H}$ $C_{Boost} = 2200e^{-6} \mu F$
Le filtre	$C_{dc} = 1100e^{-6} \mu F$ $L_f = e^{-3} \text{ H}$ $B_h = 0.1$
Le GPV	$V_{oc} = 36.6 \text{ v}$ $I_{sc} = 7.97 \text{ A}$ $V_{mp} = 29.3 \text{ v}$ $I_{mp} = 7.47 \text{ A}$ $T_{cell} = 25^\circ\text{C}$

III.4.4.1 Avant la mise en œuvre de FAP et GPV

Dans cette section, nous procéderons à l'évaluation de la commande DPC avant la mise en œuvre des FAP et GPV, en tenant compte d'une durée s'étendant de 0 seconde à 0,1 seconde.

Les résultats de simulation sont présentés dans les figures suivantes :

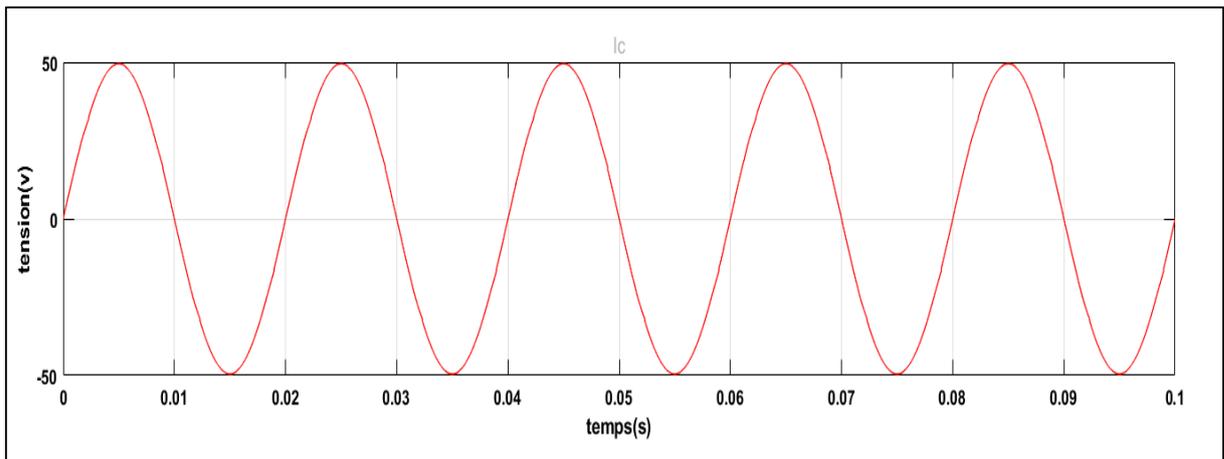


Figure III.12 : La tension de réseau électrique avant la mise en œuvre des FAP et GPV.

La courbe de la tension de réseau est représentée dans la figure, cette tension présente une forme sinusoïdale avec une amplitude de 50V.

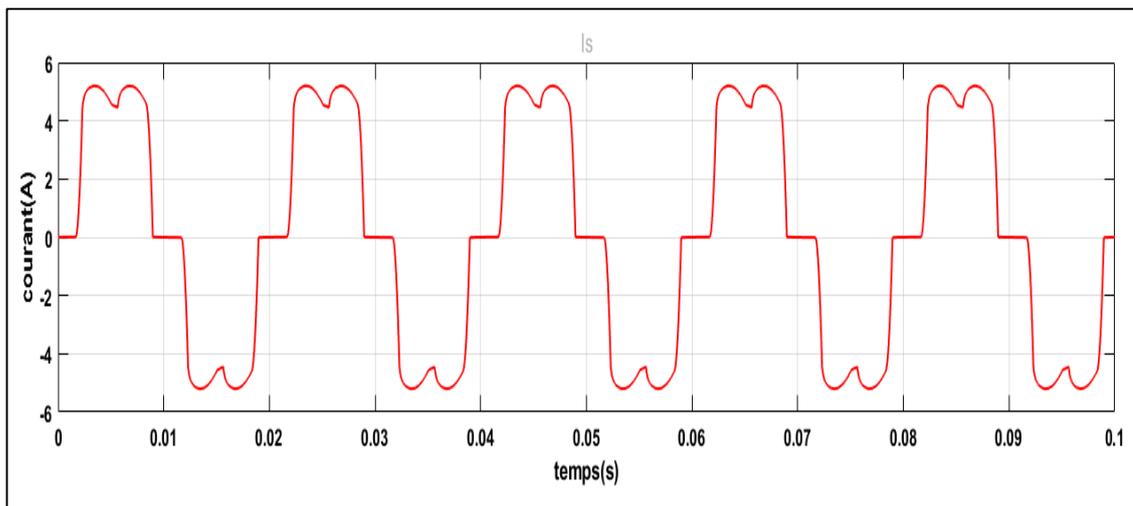


Figure III.13 : Le courant de source de la phase avant la mise en œuvre des FAP et GPV.

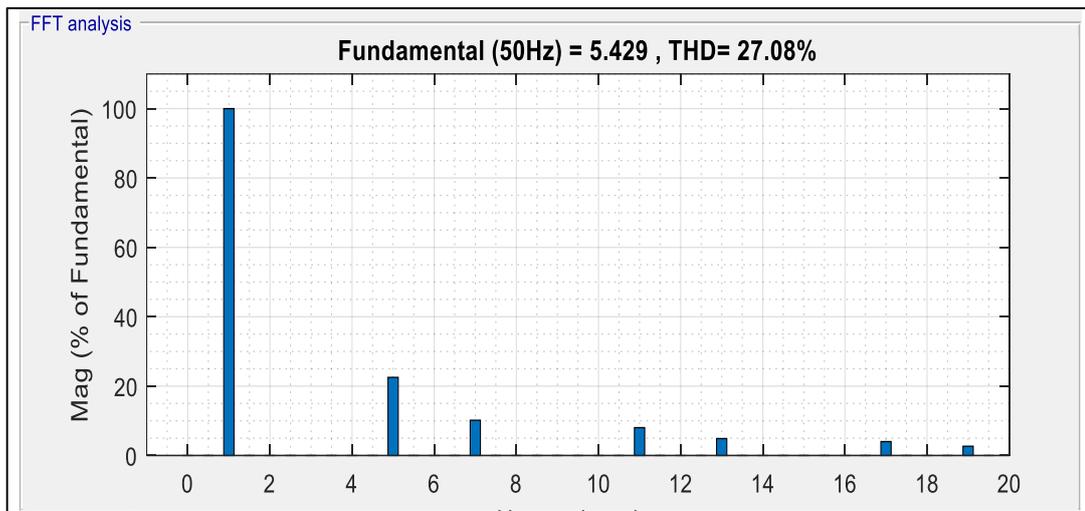


Figure III.14 : Les harmoniques de courant de source de la phase avant la mise en œuvre des FAP et GPV.

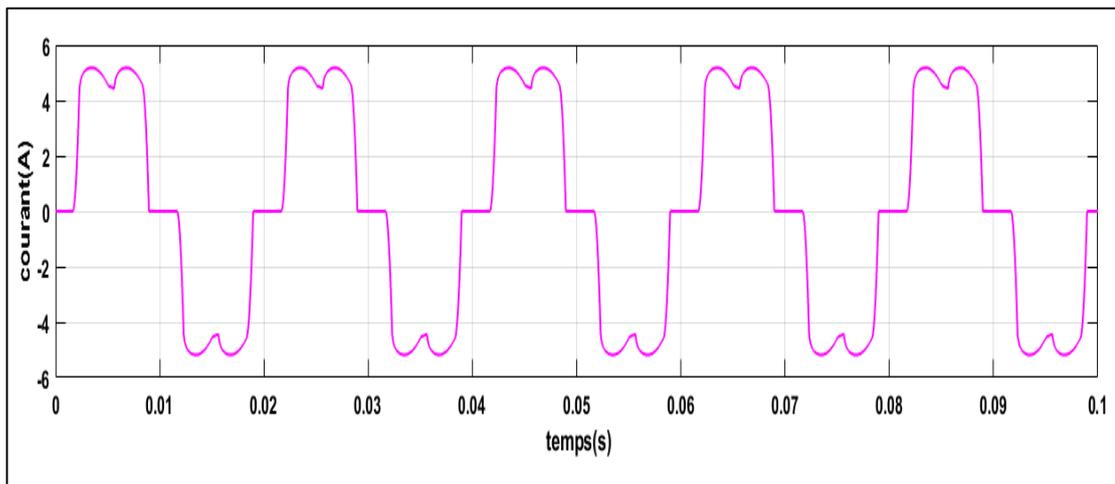


Figure III.15 : Le courant de la charge non linéaire avant la mise en œuvre des FAP et GPV.

Le courant de la source est le même forme que le courant de la charge non linéaire Cela nous montre que le réseau est pollué avec un taux de distorsion harmonique (THD) de 27.08%. On remarque une forte distorsion du courant de charge.

- Le courant de source n'est pas conforme à la norme IEEE 519-1992. Par ce que le THD doit être inférieur à 5%

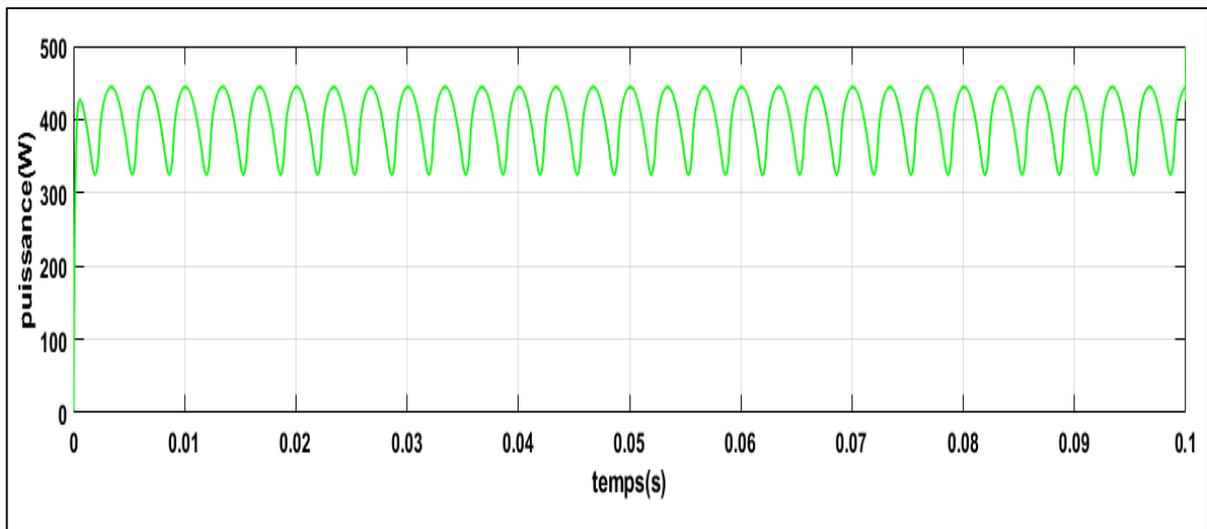


Figure III.16 : la puissance active de source avant la mise en œuvre des FAP et GPV

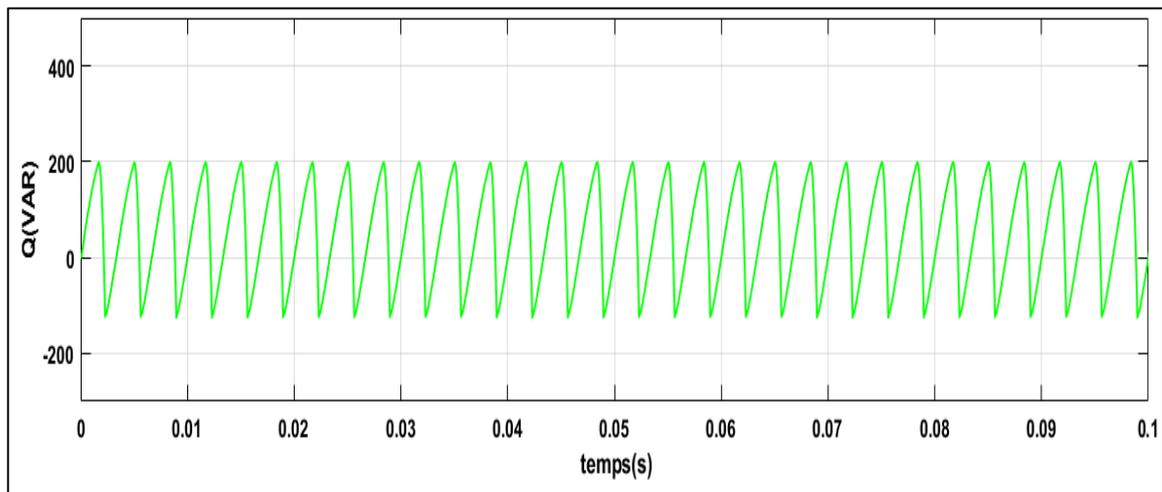


Figure III.16 : La puissance réactive de source avant la mise en œuvre des FAP et GPV.

D'après la figure III.14 et la figure III.15, la charge non linéaire consomme en moyenne 37.5 var de puissance réactive, ce qui impact négatif sur le système.

III.4.4.2 La mise en œuvre de FAP :

Dans cette section, nous procéderons à l'évaluation de la commande DPC avant la mise en œuvre des GPV et après La mise en œuvre de FAP, en tenant compte d'une durée s'étendant de 0,1 seconde à 0,35 seconde.

On a représenté les résultats des figures 17,18,19,20,21,22

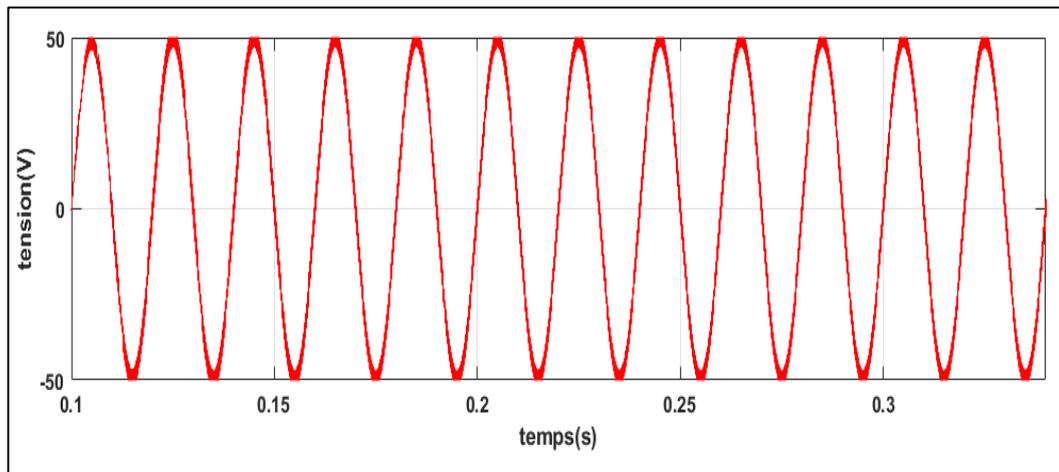


Figure III.17 : La tension de réseau électrique après La mise en œuvre de FAP.

La courbe de la tension de réseau n'a pas changé depuis l'état précédent, toujours présente une forme sinusoïdale avec une amplitude de 50V.

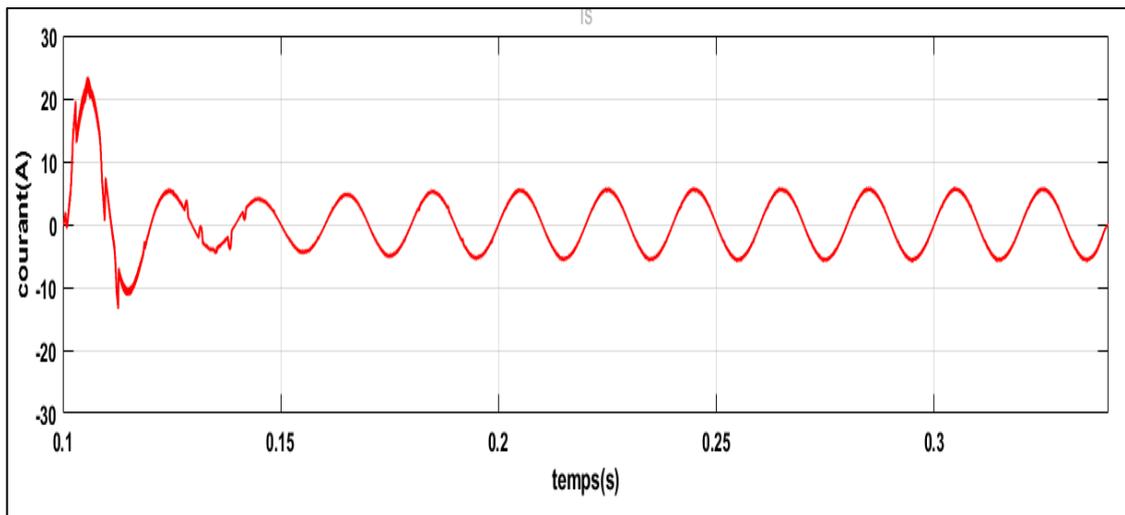


Figure III.18 : Le courant de source de la phase après La mise en œuvre de FAP.

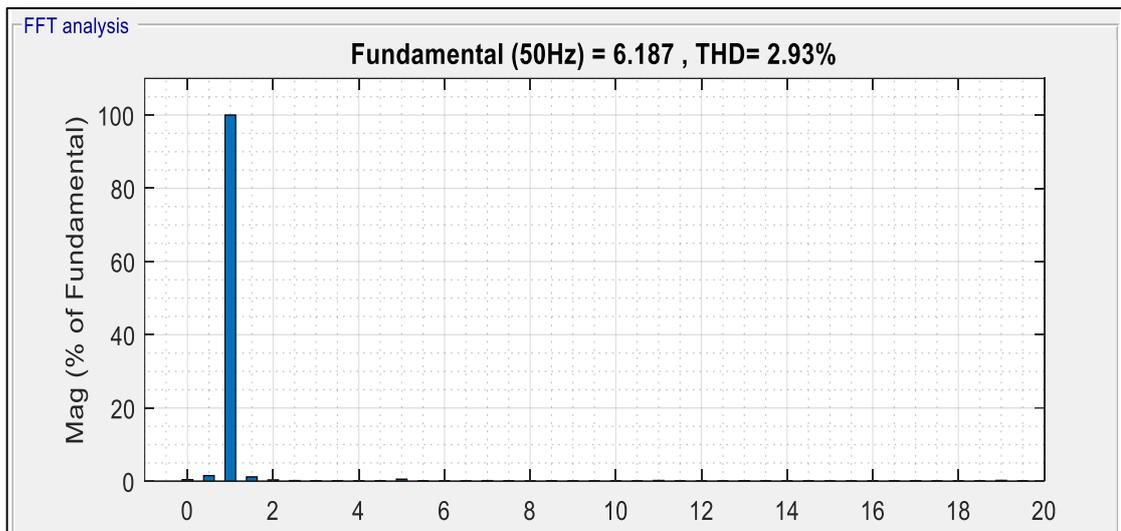


Figure III.19 : Les harmoniques de courant de source de la phase après La mise en œuvre de FAP.

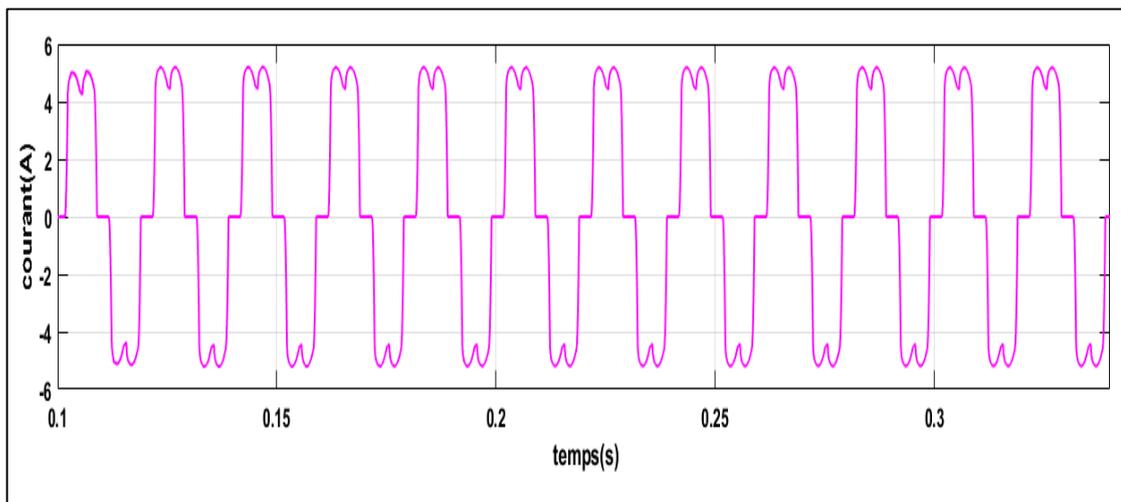


Figure III.20 : Le courant de la charge non linéaire après La mise en œuvre de FAP.

Le courant de source présente une différent forme que courant de charge non linéaire dans cette situation, ce qui témoigne d'une pollution du réseau avec un taux de distorsion harmonique (THD) de 2,93 %. Il convient de souligner que la distorsion du courant de charge est extrêmement faible, ce qui témoigne du bon fonctionnement du filtre suite à la mise en œuvre des filtres actifs de puissance (FAP).

- Le courant de source conforme à la norme IEEE 519-1992. (THD <5).

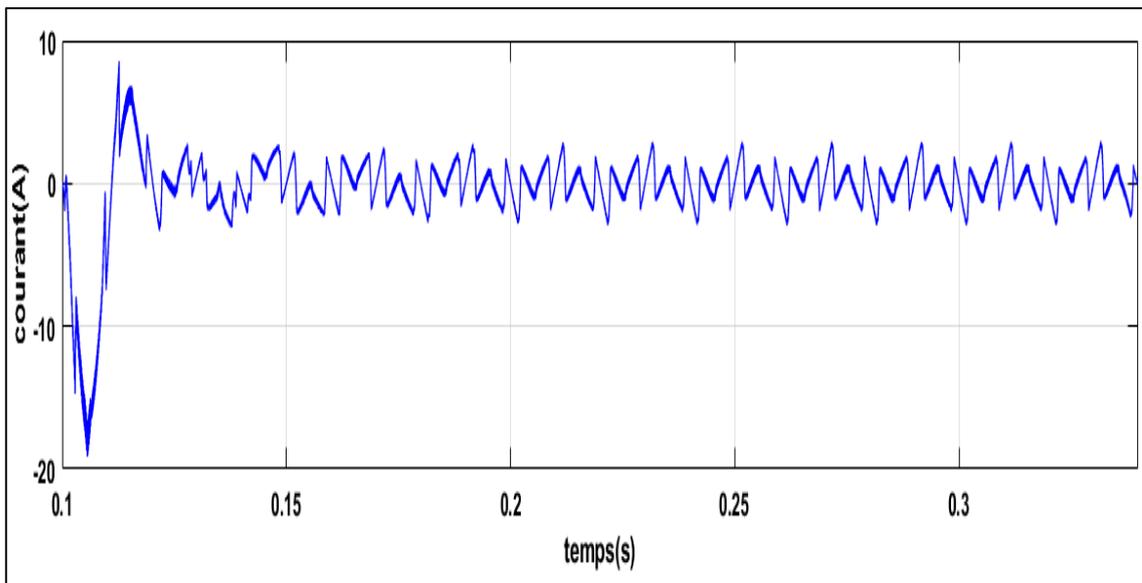


Figure III.21 : Le courant de la phase de filtre après La mise en œuvre de FAP.

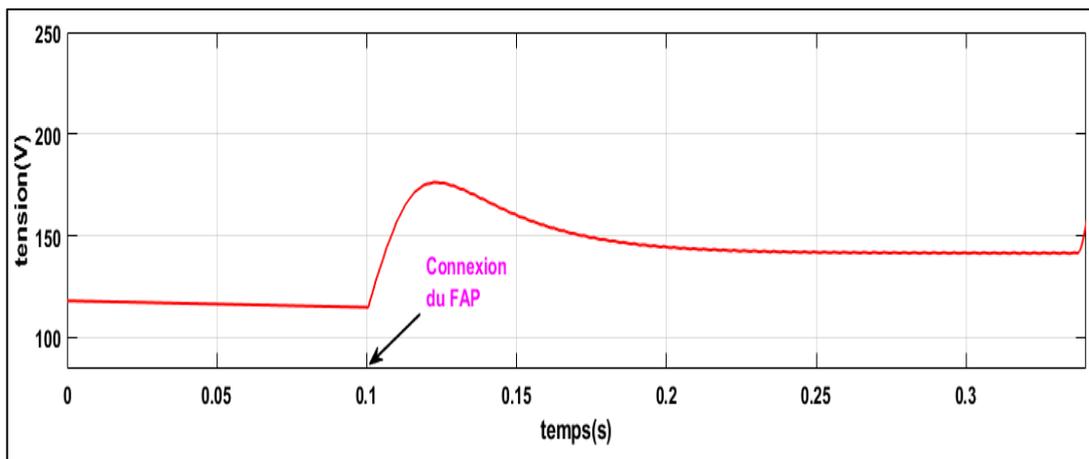


Figure III.22 : La tension de bus contenu après La mise en œuvre de FAP.

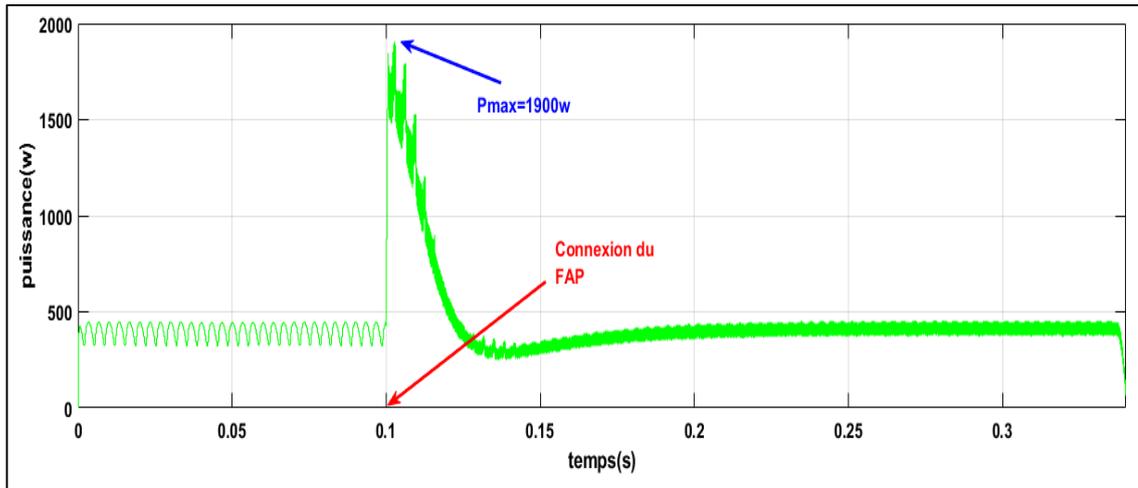


Figure III.23 : La puissance active consommée par la charge non linéaire après La mise en œuvre de FAP.

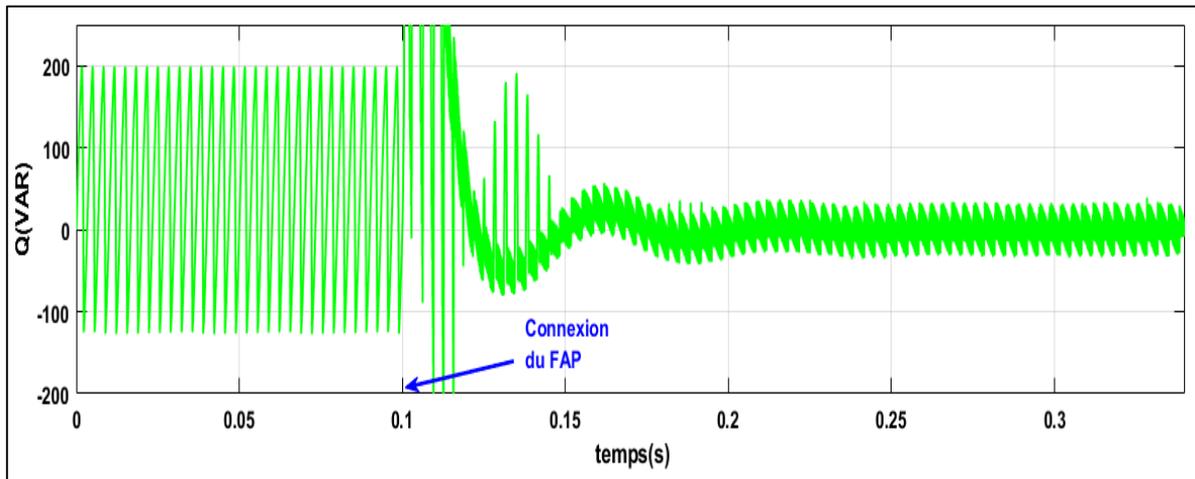


Figure III.24 : La puissance réactive consommée par la charge non linéaire après La mise en œuvre de FAP.

La figure III.23 et la figure III.24 présente les allures de la puissance active $P(W)$ et réactive $Q(Var)$, la puissance active reprend à chaque fois sa valeur optimale après un court transitoire. Cependant, l'énergie réactive quasi-compensée, continue à osciller autour de zéro.

III.4.4.3 Après la mise en œuvre de FAP et GPV

Dans cette section, nous procéderons à l'évaluation de la commande DPC après la mise en œuvre des FAP et GPV, en tenant compte d'une durée s'étendant de 0.34 seconde à 0,8 seconde.

On a représenté les résultats des figures 25, 26, 27, 28, 29.

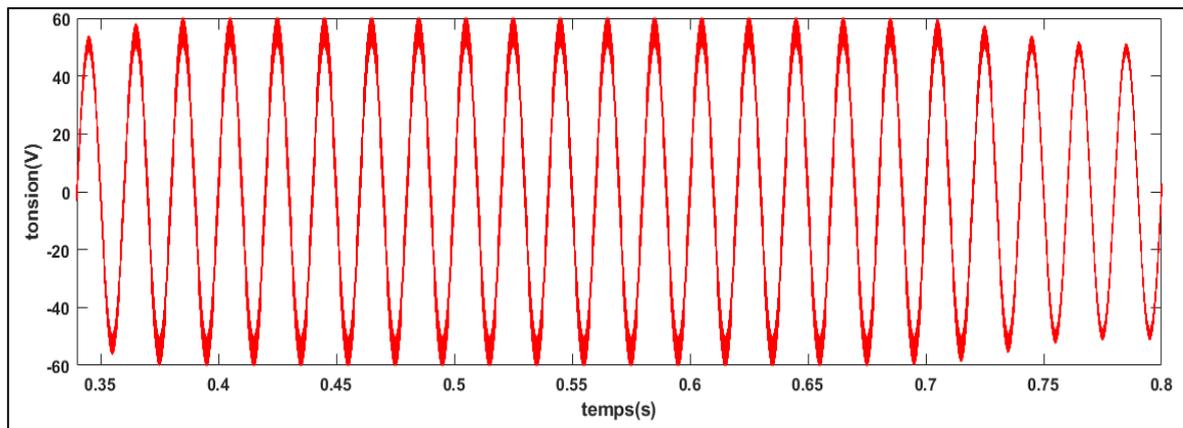


Figure III.25 : La tension de réseau électrique après la mise en œuvre des FAP et GPV.

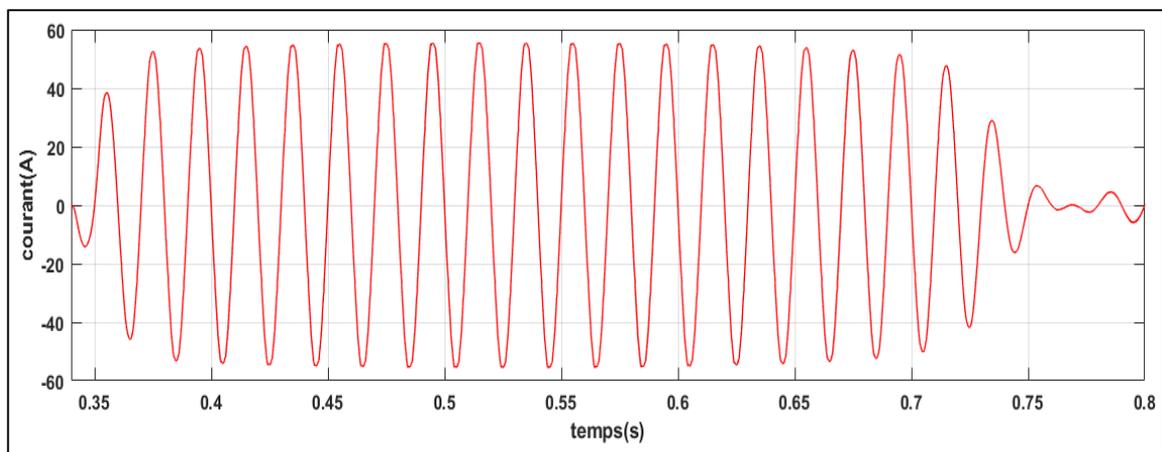


Figure III.26 : Le courant de source de la phase après la mise en œuvre des FAP et GPV.

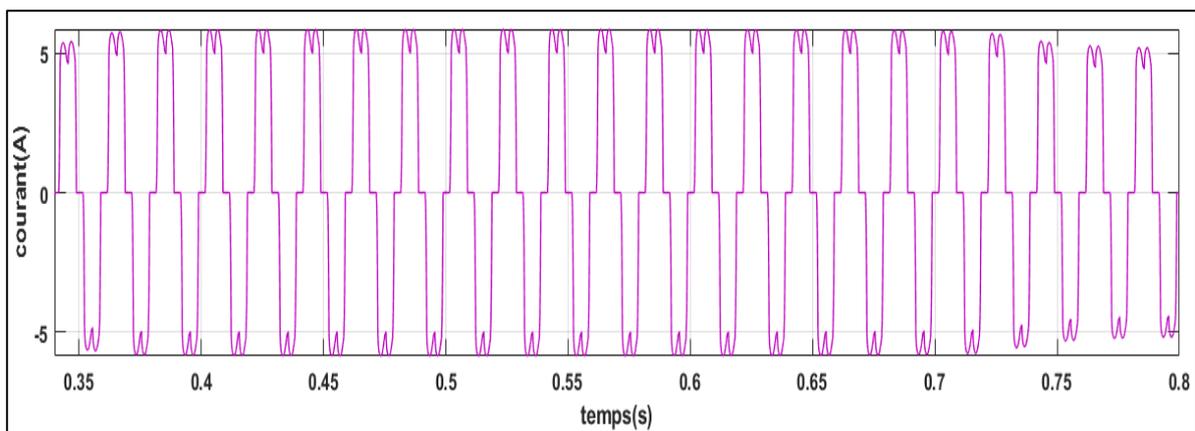


Figure III.27 : Le courant de la charge non linéaire après la mise en œuvre des FAP et GPV.

Après la mise en œuvre des filtres actifs de puissance (FAP) et du compensateur actif solaire (GPV) « dans les figures III.25, III.26 et III.27 », on observe une nette amélioration de la qualité de l'électricité produite par le système photovoltaïque et une réduction significative des

perturbations électriques. Dans cette configuration, le courant de source continue à présenter une forme différente du courant de charge non linéaire, indiquant une légère pollution du réseau avec un taux de distorsion harmonique (THD) de 1,25 %. Cependant, il est important de noter que la distorsion du courant de charge reste extrêmement faible, ce qui témoigne de l'efficacité des filtres actifs de puissance et du compensateur actif solaire.

- De manière significative, le courant de source est désormais conforme à la norme IEEE 519-1992, avec un THD inférieur à 5%. Cela démontre l'efficacité du contrôle direct de puissance du compensateur actif solaire dans la réduction des distorsions harmoniques et la conformité aux normes électriques.

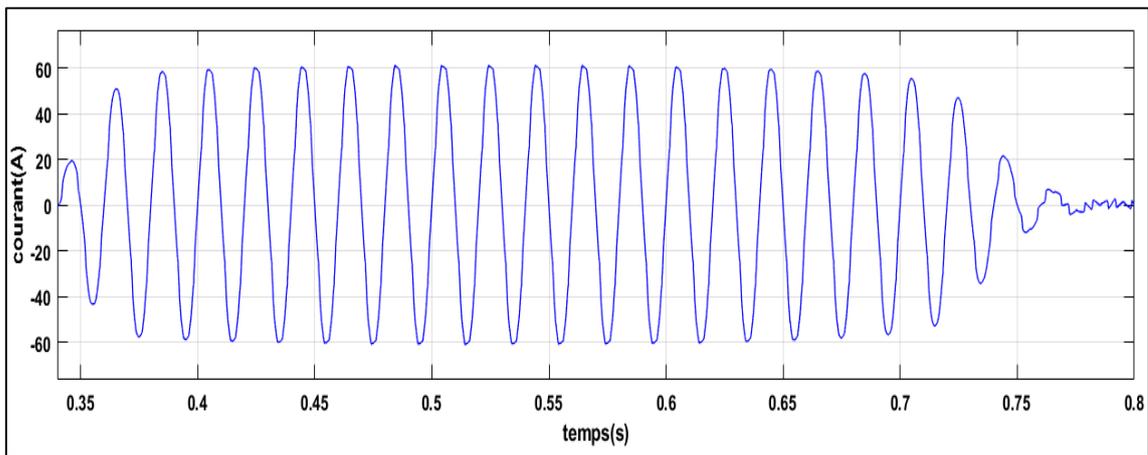


Figure III.28 : Le courant de la phase de filtre après La mise en œuvre des FAP et GPV.

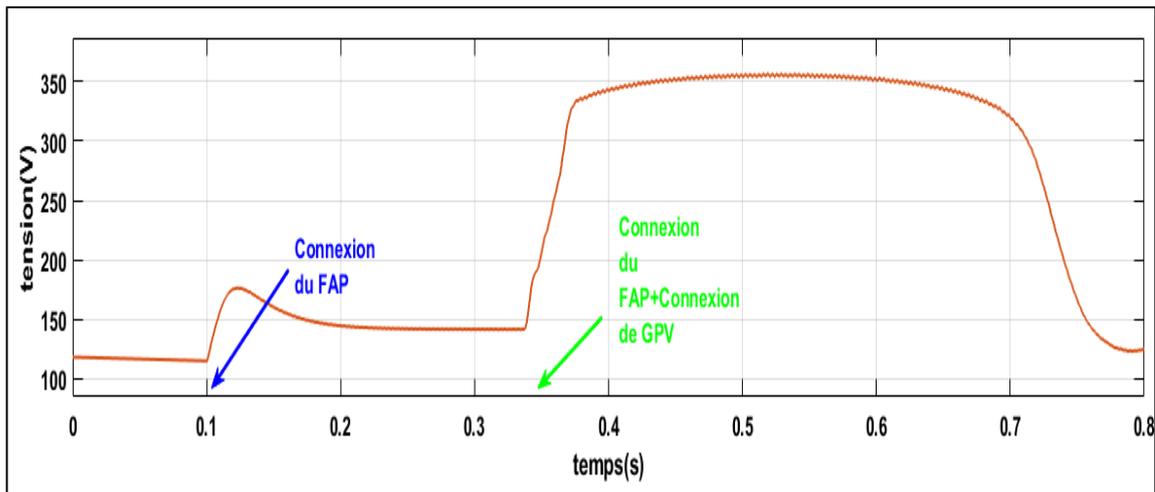


Figure III.29 : La tension de bus contenu après La mise en œuvre des FAP et GPV.

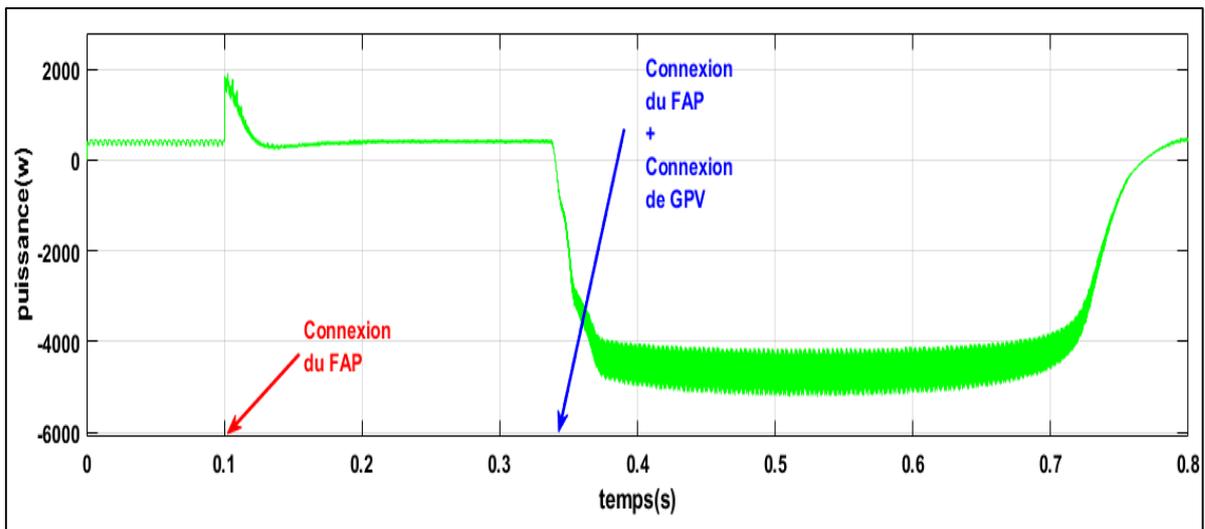


Figure III.30 : La puissance active consommée par la charge non linéaire après La mise en œuvre des FAP et GPV.

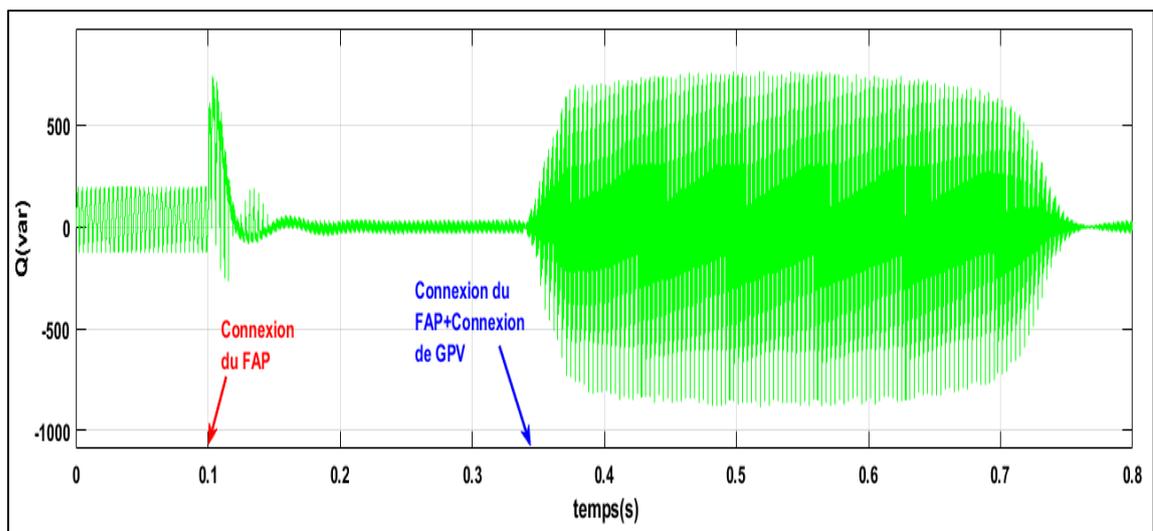


Figure III.31 : La puissance réactive consommée par la charge non linéaire après La mise en œuvre des FAP et GPV.

Les Figure III.30 et Figure III.31 montrent l'évolution des puissances dans toutes les situations de fonctionnement pendant la durée s'étendant de 0 seconde à 0,8 seconde.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande DPC (Direct Power Control) comme solution de dépollution des réseaux électriques. La commande DPC permet de contrôler les puissances instantanées actives et réactives en sélectionnant directement les états des interrupteurs de manière optimale.

Nous avons également exposé les résultats du système photovoltaïque avec la commande DPC. Cette approche de commande se caractérise par l'utilisation d'un onduleur (filtre actif) et la mise en œuvre de la commande en courant et de la commande de puissance.

Il est important de noter que les résultats présentés dans ce chapitre démontrent l'efficacité de la commande DPC pour la dépollution des réseaux électriques et l'amélioration des performances du système photovoltaïque.

Conclusion générale :

En conclusion, l'étude sur le contrôle direct de puissance d'un compensateur actif solaire interconnecté au réseau électrique a permis de mettre en évidence l'importance de cette technologie dans l'atténuation des perturbations électriques et l'amélioration de la qualité de l'électricité générée par les systèmes photovoltaïques.

Le premier chapitre a mis en évidence les diverses perturbations électriques auxquelles le réseau électrique peut être confronté. Les fluctuations de tension, les harmoniques, les déséquilibres de tension. Cependant, les solutions de dépollution, notamment le contrôle de puissance active et réactive, ont été présentées comme des méthodes efficaces pour atténuer ces perturbations et garantir une alimentation électrique de qualité.

Le deuxième chapitre a porté sur les systèmes photovoltaïques, qui représentent une source d'énergie renouvelable en plein essor. Leur fonctionnement et leur intégration au réseau électrique ont été étudiés en détail. L'accent a été mis sur l'importance de maximiser l'efficacité de conversion et de contrôler la puissance injectée pour assurer une intégration harmonieuse et une production d'électricité stable.

Enfin, le troisième chapitre a présenté les résultats de simulations qui ont démontré l'efficacité du contrôle direct de puissance d'un compensateur actif solaire. Ces simulations ont permis de valider les avantages de cette technologie en termes de réduction des perturbations électriques, de maintien de la qualité de l'électricité et de stabilisation du réseau électrique.

En somme, cette étude a mis en évidence le rôle crucial du contrôle direct de puissance d'un compensateur actif solaire dans l'amélioration de la qualité de l'électricité produite par les systèmes photovoltaïques et dans la réduction des perturbations électriques, contribuant ainsi à une intégration plus efficace et stable des énergies renouvelables au réseau électrique.

Bibliographie

- [1]. A. Chaoui, “ Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires“,Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Décembre 2010.
- [2]. C. Collombet, J.M. Lupin & J. Schonek, “Perturbation harmoniques dans les réseaux pollués et leur traitement “, Schneider Electric, cahier technique no.152, Septembre 1999.
- [3] K. Djazia “Amélioration de la qualité d’énergie électrique issue d’un système photovoltaïque utilisant la commande DPC“, master, Université de Msila, JUIN 2016.
- [4].Sahli Abdeslem “Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau” Université Ferhat Abbas – Sétif, 2012.
- [5]. Mustapha Sarra, « Contribution à l’étude des filtres actifs hybrides », Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2012.
- [6] L. Gyugyi and E.C. Strycula, « Active AC power filters », IEEE-IAS Annual Meeting, pp. 529-535. 1976.
- [7] J. Xu, « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d’électricité » Thèse de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 20 Janvier 1994.
- [8] P.Claux. Atlas solaire Français. PYC édition, 1982.
- [9] Leonard Leslie, “Design and analysis of a grid connected photovoltaic generation system with active filtering function”, Blacksburg, Virginia, March 14, 2003.
- [10] L.Protin and S. Astier. “ Convertisseurs photovoltaïques”, Technique d’ingénieur, D, 1996.
- [11]- ” Énergie+, Architecture et Climat, Faculté d’architecture, d’ingénierie architecturale, d’urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien du Service Public de Wallonie – Département de l’Energie et du Bâtiment durable. Disponible sur : <http://www.energieplus-lesite.be> “
- [12] **L.Bun**, "Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV", thèse de doctorat, université de Grenoble, France, 2011.
- [13].Y. Pankow, « Etude de l’intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension». Thèse de doctorat de l’école National supérieure d’Art et Métiers, décembre 2004
- [14] M. Bouzegane, F. Gaouaoui, « Alimentation d’un moteur à courant continu par une source photovoltaïque», Mémoire de Master, Université de Tizi-Ouzou, 2018.
- [16] L. Abbassen, «Etude de la connexion au réseau électrique d’une centrale photovoltaïque», Mémoire de Magistère, Université de Tizi Ouzou, Algérie, 2011.
- [17] K. Djazia “Active Power Filtering Using the ZDPC Method under Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions“ Article, 27 February 2015
- [18] B. Boukezata “Système solaire photovoltaïque connecté au réseau électrique et associé à un filtre actif parallèle” EF-EPF-MGE, July 2014.

[19] H. AFGHOUL “Approche avancée du filtrage actif et du contrôle de puissances dans les installations photovoltaïques interconnectées au réseau” Thèse de doctorat, Université de M’sila, 2016.

[20] B. Boukezata “Générateur photovoltaïque avec une commande directe de puissance connecté et avec adjonction de services au réseau de distribution” EF-EPF-MGE, JUIN 2016

Résumé :

Cette mémoire décrit un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique en associant les fonctionnalités d'un filtre actif parallèle de puissance afin d'améliorer la qualité de l'énergie. Le système proposé est constitué d'un champ de panneaux solaires, un onduleur de tension triphasé raccordé au réseau et une charge non linéaire. Une commande directe de puissance est proposée pour compenser les courants harmoniques ainsi que la puissance réactive au point de raccordement tout en injectant de la puissance active solaire vers le réseau. Le contrôleur MPPT est appliqué pour la poursuite du point de puissance maximale du système PV dans des conditions variables d'éclairement. La tâche de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) dans un système de puissance PV à un objectif de continuer à affiner le système de sorte qu'il tire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque GPV. La simulation du système sous l'environnement Matlab/Simulink et des résultats expérimentaux prouvent la robustesse de la commande directe.

Mots clés (*) : DPC, GPV, MPPT, MATLAB / Simulink.

Abstract :

This thesis describes a photovoltaic generator connected to the electrical network by combining the functionalities a parallel active power filter to improve the quality Energy. The proposed system consists of a field of solar panels, a three-phase voltage inverter connected to the network and a nonlinear load. Direct power control is applied to compensate harmonic currents as well as reactive power at the connection point while injecting solar active power to the grid. MPPT controller is applied for maximum power point tracking of PV system in variable lighting conditions. The task of maximum power point tracking (MPPT) in a PV power system has an objective of continuing to tune the system so that it draws the maximum power from the GPV photovoltaic array. The simulation of the system under Matlab/Simulink environment and results experiments prove the robustness of direct control.

Keywords (*) : DPC, GPV, MPPT, MATLAB / Simulink.

الملخص:

تصف هذه الأطروحة المولد الكهروضوئي متصل بالشبكة الكهربائية من خلال الجمع بين الوظائف مرشح طاقة نشط متوازي لتحسين الجودة من الطاقة. النظام المقترح يتكون من مجال الألواح الشمسية، عاكس جهد ثلاثي الأطوار متصل بشبكة وحمولات غير خطية. يتم تقديم التحكم المباشر في الطاقة للتعويض عن التيارات التوافقية وكذلك الطاقة التفاعلية أثناء حقن الطاقة الشمسية النشطة في الشبكة. يتم تطبيق وحدة التحكم MPPT لتتبع أقصى نقطة للطاقة للنظام الكهروضوئي في ظروف الإضاءة المتغيرة. تهدف مهمة تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) في نظام الطاقة الكهروضوئية إلى الاستمرار في ضبط النظام بحيث يستمد الحد الأقصى من الطاقة من المصفوفة الكهروضوئية. محاكاة النظام ونتائج التجارب تثبت متانة التحكم المباشر.