

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

## **Mémoire de Fin d'Études**

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## **MASTER ACADEMIQUE**

En Commande électrique

# **Thème**

## **Commande Directe De Puissance (DPC) D'un Filtre Actif Parallèle Associé A Un Système Photovoltaïque**

Présenté par :

- Leila DAOUDI
- Mohamed Tahar NOUNE

Dirigé par :

**Dr. Youcef BEKAKRA**

**Promotion 2021**

Mémoire préparé au sein du Laboratoire d'Exploitation et de Valorisation des Ressources Energétiques

Saharienne



## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste mémoire au bon dieu qui  
nous a aidé à réaliser ce travail.*

*A la belle mémoire de mon grand père : Ahmed.*

*A mes chers parents : merci beaucoup papa  
pour votre aides.*

*Ma très chère mère : merci pour ta douceur  
ton encouragement et tes précieux conseils.*

*A mon cher époux : Moussa, merci pour ta patience  
et ton aide.*

*A mes adorables petits enfants : Abderrahmane,  
Khalil et Firas que dieu vos bénisses.*

*A toutes mes jolies sœurs.*

*A tous ce qui m'aime de prés et de loin.*

*D.Leila*

# إهداء

أهدي هذا العمل المتواضع

إلى روح والدي الطاهرة رحمة الله عليه

إلى والدتي الغالية أطال الله في عمرها

إلى الزوجة الكريمة

إلى أبنائي الأعمام عبد العالي، آدم، أحمد أمين وأمجد

إلى كل أفراد عائلة نون وشرف الدين

محمد الطاهر نون

## *Remerciements*

- ❖ *Grâce à Dieu le plus puissant, nous sommes arrivés enfin au bout de nos peines, en achevant cet humble mémoire qui sans l'aide précieuse de nombreuses personnes; que grâce à eux notre tâche aurait été difficile.*
- ❖ *C'est pourquoi nous tenons à exprimer notre gratitude et sincère remerciement à:*
- ❖ *Notre encadreur : Mr BEKAKRA Youcef.*
- ❖ *Laboratoire : d'Exploitation et de Valorisation des Ressources Energétiques Sahariennes et tous ces personnels.*
- ❖ *Tous nos enseignants.*
- ❖ *Madame Rachida travaillant au sein de notre faculté, on la remercie pour ses encouragements.*
- ❖ *Tous ce que nous a aidé de près et de loin.*

D.Leila

N. Med .Tahar

# Résumé

## **Résumé**

Ce travail a été consacré à l'étude d'une combinaison entre un générateur solaire photovoltaïque connecté au réseau de distribution et participant à l'amélioration de la qualité de l'énergie au point de connexion grâce aux fonctionnalités de filtrage actif. Une commande directe de puissance (DPC) a été proposée dans ce travail pour contrôler simultanément la puissance active photovoltaïque injectée, la compensation de l'énergie réactive et l'élimination des courants harmoniques dans le réseau générés par les charges non linéaires. L'utilisation d'un système d'adaptation entre un générateur photovoltaïque et d'un onduleur de tension triphasé dans le but d'optimiser la production d'énergie à tout moment et plus en plus préconisée. Pour optimiser l'énergie extraite du générateur photovoltaïque, une technique d'extraction de puissance maximale de type P&O a été associée à la DPC afin de générer la tension de référence optimale sur le bus continu. Les résultats de simulation confirment les performances de cette stratégie.

**Mots-clés**— Photovoltaïque, filtre actif parallèle, DPC, extraction de puissance maximale, convertisseur DC-DC, MPPT. P&O.

## **Abstract :**

This work is devoted to the improvement of the study of a photovoltaic solar generator connected to the distribution network and participating in the improvement of the energy quality at the connection point thanks to the function. This work is devoted to the improvement of the study of a photovoltaic solar generator connected to the distribution network and participating in the improvement of the energy quality at the connection point thanks to the functionalities of active filtering. Direct power control (DPC) is developed to simultaneously control active photovoltaic power, reactive energy compensation and elimination of harmonic currents present on the network and non-linear load products. an adaptation system is structured around a photovoltaic generator and a three-phase voltage inverter. To optimize the energy extracted from the photovoltaic generator, a P&O type maximum power extraction technique is associated with the DPC in order to generate the optimum reference voltage on the DC bus. The simulation results confirm the performance of this strategy.

**Keywords**— Photovoltaic, shunt active filter, DPC, MPPT P&O.

## Liste des Figures

### CHAPITRE I : Généralité sur la qualité d'énergie électrique et solution de dépollution

<b>Figure I.1</b>	Creux et coupure de tension .....	4
<b>Figure I.2</b>	Fluctuations de tension.....	4
<b>Figure I.3</b>	Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension .....	5
<b>Figure I.4</b>	Variation de fréquence .....	5
<b>Figure I.5</b>	Harmoniques.....	6
<b>Figure I.6</b>	Arrangement des types d'harmoniques .....	7
<b>Figure I.7</b>	Diagramme de Fresnel avec présence d'une puissance déformante.....	9
<b>Figure I.8</b>	Raccordement d'un filtre passif.....	11
<b>Figure I.9</b>	Montage du filtre actif série .....	12
<b>Figure I.10</b>	Montage du filtre actif parallèle.....	12
<b>Figure I.11</b>	Combinaison parallèle série des filtres actifs.....	13

### CHAPITRE II : Stratégie de commande du filtre actif parallèle avec un système Photovoltaïque PV

<b>Figure II.1</b>	Structure d'un filtre parallèle .....	17
<b>Figure II.2</b>	: Onduleur .....	17
<b>Figure II.3</b>	: Principe de la conversion photovoltaïque .....	20
<b>Figure II.4</b>	: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	20
<b>Figure II.5</b>	: Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque .....	22
<b>Figure II.6</b>	: cellule, modules et panneau photovoltaïque .....	23
<b>Figure II.7</b>	: période ouverture et fermeture d'un commutateur .....	24
<b>Figure II.8</b>	: Schéma de principe de la méthode d'identification instantanée.....	25

<b>Figure II.9</b> : Principe de contrôle du courant par hystérésis. ....	28
<b>Figure II.10</b> Exemple d'une Commande deux interrupteurs par hystérésis.....	29
<b>Figure II.11</b> : Principe de la commande MLI .....	29
<b>Figure II.12</b> : commande vectorielle par MLI sinusoïdale .....	30
<b>Figure II.13</b> : représentation vectorielle des tension générées .....	31
<b>Figure II.14</b> : Schéma synoptique de GPV avec un convertisseur DC-DC contrôlé par la commande MPPT .....	32
<b>Figure II.15</b> : Caractéristiques I-V, P-V, d'un module PV .....	32
<b>Figure II.16</b> : Organigramme d'algorithme MPPT (P&O) .....	33
 <b>CHAPITRE III</b> : Application de la DPC au filtre actif parallèle	
<b>Figure III.1</b> : Contrôle du FAP par la commande DPC .....	36
<b>Figure III.2</b> : Principe de la commande directe de puissance .....	37
<b>Figure III.3</b> : Plan $\alpha\beta$ divisé en douze secteurs pour détecter la phase du vecteur de tension ....	38
<b>Figure III.4</b> : Schéma bloc du régulateur PI:(a), avec une compensation anti-windup: (b) .....	40
<b>Figure III.5</b> : Structure de base d'une PLL .....	41
<b>Figure III.6</b> : système photovoltaïque connecté au réseau interfacé avec un filtre actif parallèle .....	42
<b>Figure III.7</b> : (a), (b), (c) : Résultats de simulation avant la mise en service de FAP .....	44 ,45
<b>Figure III.8</b> : (a),(b),(c),(d), (e),(f),(g) et (h) :Résultats de simulation de l'ensemble du système dans le cas de variation de profil d'irradiation. ....	46,47,48 ,49

## **Liste des Tableaux**

<b>Tableau I.1:</b> limites des distorsions des tensions au Pcc (IEEE519_1996) .....	10
<b>Tableau I.2:</b> Comparaison entre filtrage actif et passif.....	14
<b>Tableau II.1:</b> Tension de sortie du l'onduleur .....	19
<b>Tableau II.2:</b> Tension de sortie du l'onduleur (commande MLI vectorielles) .....	31
<b>Tableau III.1:</b> Table de commutation classique.....	39
<b>Tableau III.2:</b> les Paramètres de simulation.....	43

## **Liste des abréviations et symboles**

**THD:** Total Harmonic Distortion.

**GPV:** Générateur Photovoltaïque.

**MPPT:** Maximum Power Point Tracking.

**P&O:** Perturbation et Observation.

**DC:** Courant Continu (Direct Current).

**AC:** Courant Alternatif (Alternative Current)

**PV:** Photovoltaïque.

**FP:** Facteur de Puissance.

**P:** Puissance active.

**S :** Puissance apparente.

**SAPF:** Shunt actif power filter.

**UPQC:** Unified Power Quality Conditioner.

**MLI:** Modulation de largeur d'impulsion.

**PLL:** Boucle de verrouillage de phase.

**PI :** Régulateur de type proportionnel-intégrateur.

**PV:** Photovoltaïque.

**GPV** Générateur photovoltaïque.

**MPPT:** Poursuite de point de puissance maximale.

**PPM:** Le point de puissance maximale.

**DC/DC** Continu-continu.

**P&O:** Perturbation et observation.

**STC** : Condition standards.

***h***: Harmonique d'ordre *h*.

**V<sub>dc</sub>**: Tension aux bornes du condensateur.

**L<sub>f</sub>** : Inductance de couplage du filtre.

**V<sub>dcref</sub>** : Tension de référence.

**ISM<sub>MAX</sub>** : Amplitude du courant de référence.

**K<sub>i</sub>** : Gain intégrateur.

**K<sub>p</sub>** : Gain proportionnel.

**ξ** : Facteur d'amortissement.

**ω** : Pulsation propre.

**I<sub>fref</sub>** : Courant de filtre de référence.

**I<sub>f</sub>** : Courant de filtre.

**f<sub>1</sub>** : Fréquence fondamentale.

**V<sub>s</sub>** : Tension de source.

**I<sub>s</sub>** : Courant de source.

**q(t)** : Puissance réactive instantanée.

**P(t)** : Puissance active instantanée.

**V<sub>s</sub>, R<sub>S</sub>, L<sub>s</sub>** : Tension, charge et inductance de source.

**R<sub>ch</sub>, L<sub>ch</sub>** : Résistance et inductance de charge.

**C<sub>dc</sub>** : Capacité du condensateur.

**V<sub>smax</sub>** : Tension maximale de source.

**I<sub>ph</sub>**: Courant photo-généré ou photo-courant (A).

**R<sub>S</sub>** : La résistance série ( $\Omega$ ).

**RP** : La résistance parallèle ( $\Omega$ ).

**V** : La tension aux bornes de la cellule (V).

**I** : Le courant fourni par la cellule (A).

**Icc**: Le courant de court- circuit(A).

**Voc** : La tension à circuit ouvert(V).

**ID** : Courant de la diode(A).

**Ga** : Irradiation ( $W/m^2$ ).

**Ta** : La Température ( $^{\circ}C$ ).

## **SOMMAIRE**

Introduction générale : .....	1
Chapitre I : Généralité sur la qualité d'énergie électrique et solution de dépollution	
I.1.Introduction: .....	2
I.2. Qualité de l'énergie électrique : .....	2
I.2.1 Qualité de la tension : .....	2
I.2.1.1 Amplitude : .....	2
I.2.1.2 Fréquence : .....	3
I.2.1.3 Forme d'onde : .....	3
I.2.1.4 Symétrie : .....	3
I.3 Les perturbations électriques et leurs origines : .....	3
I.3.1 Creux et coupures de tension : .....	3
I.3.2 Fluctuations de tension : .....	4
I.3.3 Dissymétrie du système triphasé de tension : .....	4
I.3.4 Variation de fréquence : .....	5
I.3.5 Les perturbations harmoniques et inter-harmoniques: .....	5
I.3.5.1 Causes et origines : .....	6
I.3.5.2 Types des harmoniques : .....	6
I.3.5.3 Les effets des harmoniques : .....	7
I.4 Caractéristiques des harmoniques : .....	7
I.4.1 Le taux global de distorsion harmonique (THD): .....	7
I.4.2 Facteur de puissance : .....	8
I.5 Normes et réglementation : .....	9
I.6 Solutions de dépollution des réseaux électriques : .....	10
I.6.1 solutions conventionnelles : .....	10
I. 6.1.1 Filtrage passif .....	10
I. 6.1.2 Les inconvénients du filtre passif : .....	11
I.6.2 Solution moderne : .....	11
I.6.2.1 Le filtre actif : .....	11

I.6.2.1.1 Filtre actif série : .....	11
I.6.2.1.2 Filtre actif parallèle : .....	12
I.6.2.1.3 Combinaison parallèle-série actif (UPQC):.....	12
I.6.2.1.4 Filtre actif hybride : .....	13
I.6.3 Comparaison entre un filtre actif et un filtre passif:.....	13
I.7. Conclusion:.....	15
Chapitre II :Stratégie de commande du Filtre Actif Parallèle avec un Système Photovoltaïque PV	
II.1 Introduction : .....	16
II.2 Principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle : .....	16
II.3. Structure du Filtre actif parallèle :.....	16
II.3.1 Description de la partie de puissance .....	17
II.3.1.1 Onduleur de tension : .....	17
II.3.1.2 Filtre de couplage :.....	19
II.3.1.3 Système de stockage d'énergie :.....	19
II.3.1.3.1 Généralité sur la technologie photovoltaïque :.....	20
II.3.1.3.1.1 L'effet photovoltaïque :.....	20
II.3.1.3.1.2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :.....	20
II.3.1.3.1.3 Générateur photovoltaïque :.....	22
II.3.1.3.1.4 L'étage d'adaptation et le Convertisseur DC/DC : .....	23
II.3.2 Description de la partie de commande .....	24
II.3.2.1 Identification des courants harmoniques :.....	24
II.3.2.1.1 Méthode des puissances actives et réactives instantanées (P-Q): .....	25
II.3.2.1.2 Théorie de la méthode des puissances instantanées :.....	25
II.3.2.2 Commande de l'onduleur .....	28
II-3.2.2.1 Commande par hystérésis. ....	28
II-3.2.2.2 Commande par Modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	29
II-3.2.2.3 Commande par MLI vectorielle.....	30
II-3.2.2.3.1 Principe de la commande .....	30
II.3.2.3 Commande de système photovoltaïque.....	31
II.3.2.3.1 Fonctionnement optimal d'un générateur photovoltaïque :.....	31
II.3.2.3.2 Technique de poursuite du point de puissance maximale : .....	32

II.3.2.3.2.1 Méthode de la perturbation et l'observation (P&O): .....	33
II.5 Conclusion : .....	34
CHAPITRE III : Application de la DPC au filtre actif parallèle	
III.1 Introduction :.....	35
III.2. Etat de l'art sur la commande DPC: .....	35
III.3. Principe de la Commande directe de puissance : .....	36
III.3.1 Contrôle directe de puissance (DPC) classique avec un tableau de commutation : .....	36
II.3.1.1 Signaux numérisés d'erreurs de puissance : .....	37
III.3.1.2 La position angulaire $\theta_n$ (choix du secteur):.....	38
III.3.1.3 Table de commutation : .....	39
III.3.1.4. Régulation du bus continu : .....	39
III.3.1.5. Boucle de verrouillage de phase PLL : .....	40
III.3.1.5.1 Structure de la P.L.L classique: .....	41
III.4. Simulation de système global sous Matlab-Simulink :.....	41
III.4.1 Simulation de l'ensemble du système sans filtre.....	44
III.4.2 Simulation de l'ensemble du système avec l'irradiation solaire variable .....	45
III-5 Conclusion : .....	49
Conclusion générale.....	50
Références Bibliographiques .....	51

# **Introduction générale**

### Introduction générale :

La production d'énergie électrique par un système photovoltaïque connaît une forte croissance et une évolution remarquable dans ces dernières années, car elle présente de nombreux avantages par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. Toutefois ; le raccordement du système PV avec le réseau électrique peut provoquer de nombreux impacts néfastes sur le fonctionnement du réseau. Parmi ceux-ci, citons les effets les plus significatifs ; l'injection d'harmoniques dans le réseau et l'augmentation de la consommation de puissance réactive. C'est pourquoi tous les domaines de recherche sur l'énergie photovoltaïque reposent sur l'amélioration de l'efficacité et la facilitation de l'intégration de ces systèmes dans le réseau.

On connecte un générateur PV (GPV) au réseau électrique, sur le bus continu d'un onduleur de tension qui est adopté en raison de ses capacités fonctionnelles et de sa flexibilité. Son apport de services au réseau se concrétise via sa contribution sur l'amélioration de la qualité des ondes électriques au point de couplage commun (PCC) . En effet, les courants harmoniques et réactifs générés par les charges non linéaires raccordées au PCC provoquent des perturbations et détériorent donc la qualité de l'énergie sur les réseaux de distribution électrique. Ce qui 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). La double fonctionnalité de ce concept assure une optimisation grâce à l'incorporation de la tâche filtrage actif en combinaison avec l'injection de la puissance active. Un algorithme de contrôle de l'onduleur de tension est utilisé. Dans ce travail un algorithme de commande intitulé contrôle direct de puissance (DPC) est élaboré pour ses principaux avantages. Par ailleurs, pour extraire une puissance maximale (MPPT) des modules PV, une stratégie de type P&O est insérée au niveau du contrôle du bus continu afin de générer une référence de tension optimale. L'ensemble de la structure est implémenté sous l'environnement Matlab/Simulink et des résultats de simulation sont exposés et analysés.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur la qualité d'énergie électrique et solution de dépollution**

## **I.1.Introduction:**

Ces dernières années, la qualité de l'énergie électrique (QEE) devient un sujet très important. Cette dernière est affectée de plus en plus par les charges non linéaires.

L'utilisation croissante dans les appareils industriels ou domestiques de systèmes commandes a base d'électronique de puissance entraine de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ces convertisseurs statiques apportent une souplesse d'utilisation, des fonctionnalités supplémentaires, une augmentation de la fiabilité, le tout avec un rendement élevé. De plus, avec la généralisation de leur utilisation les couts de ces modules d'électronique de puissance ne cessent de baisser. 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.[17]

Nous commençons ce chapitre par un exposé des principaux paramètres qui caractérisent la QEE également les différents phénomènes qui affectent la tension et le courant en se concentrant sur les perturbations harmoniques et leurs origines, effets. On parle aussi de la quantification de la QEE. Nous présentons aussi d'une manière générale les différentes solutions adoptées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques, nous présentons le filtre actif parallèle FAP comme solution curative pour la pollution harmonique ainsi que l'évolution de ses structures. Finalement on clôture ce chapitre par une comparaison entre le filtrage passif qui est une des solutions classiques de dépollution et le filtrage actif (solution moderne).

## **I.2. Qualité de l'énergie électrique :**

L'énergie électrique est principalement distribuée sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Donc, la qualité de l'énergie électrique est étroitement liée à la qualité de l'onde de tension, et la nature des charges (linéaire ou non linéaire). Pour cette raison la qualité de l'énergie électrique est souvent réduite à la qualité de la tension. [2,30]

### **I.2.1 Qualité de la tension :**

L'énergie électrique distribuée sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, dont les caractéristiques principales sont l'amplitude, la fréquence, la forme d'onde et la symétrie.[2]

#### **I.2.1.1 Amplitude :**

L'amplitude de la tension est un facteur important pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Généralement l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de  $\pm 10\%$  autour de la valeur

nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une valeur constante. [2]

### **I.2.1.2 Fréquence :**

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par exemple, des pertes importantes de production, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques.[2]

### **I.2.1.3 Forme d'onde :**

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. [2]

### **I.2.1.4 Symétrie :**

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre. [2]

## **I.3 Les perturbations électriques et leurs origines :**

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres:( fréquence, amplitude, forme d'onde et la symétrie), peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence, ou par la présence d'harmoniques. [15]

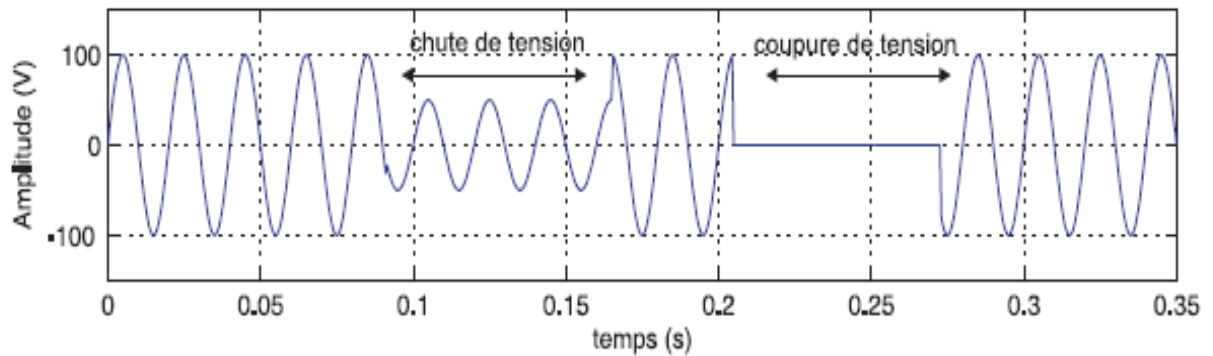
### **I.3.1 Creux et coupures de tension :**

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension a une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu''a quelques secondes. Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de :

- manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.) ;
- une coupure de tension quand a elle est une diminution brutale de la tension a une valeur supérieure a 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une

durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. [15]

La figure I-1 montre un exemple de creux et de coupure de tension.



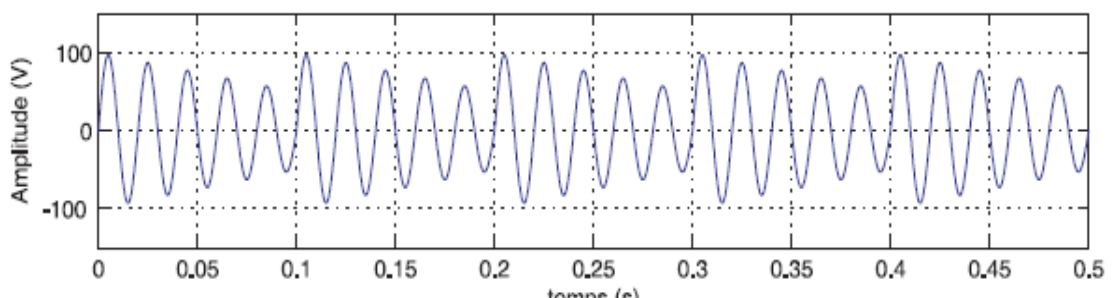
**Figure: I.1** Creux et coupures de tension.

### **I.3.2 Fluctuations de tension :**

Les fluctuations sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10% de sa tension absorbée et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courant d'appels importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide ; comme les fours à arc et les machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle ; ce phénomène de papillotement est appelé flicker. [15,1]

La figure I-2 montre un exemple de fluctuation de tension.

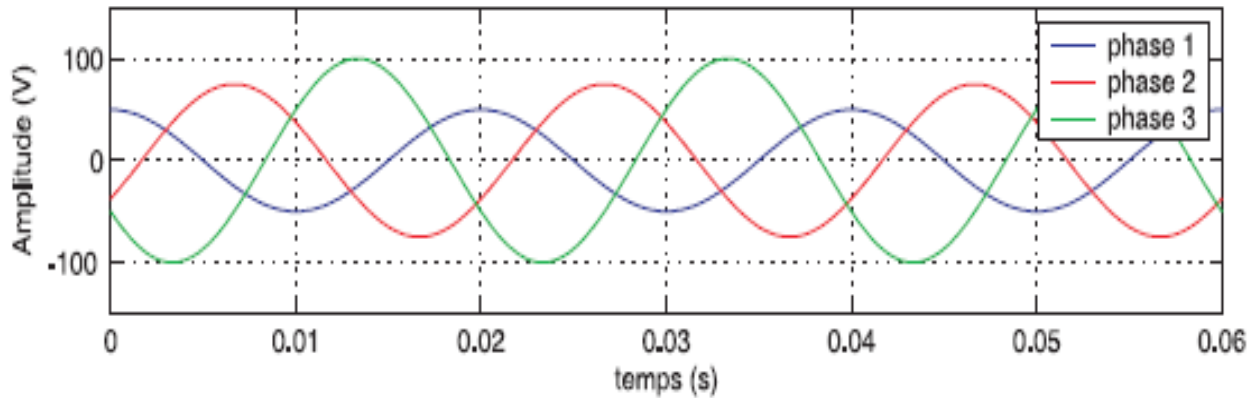


**Figure I-2** : Fluctuations de tension.

### **I.3.3 Dissymétrie du système triphasé de tension :**

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé. Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. . [15,1].

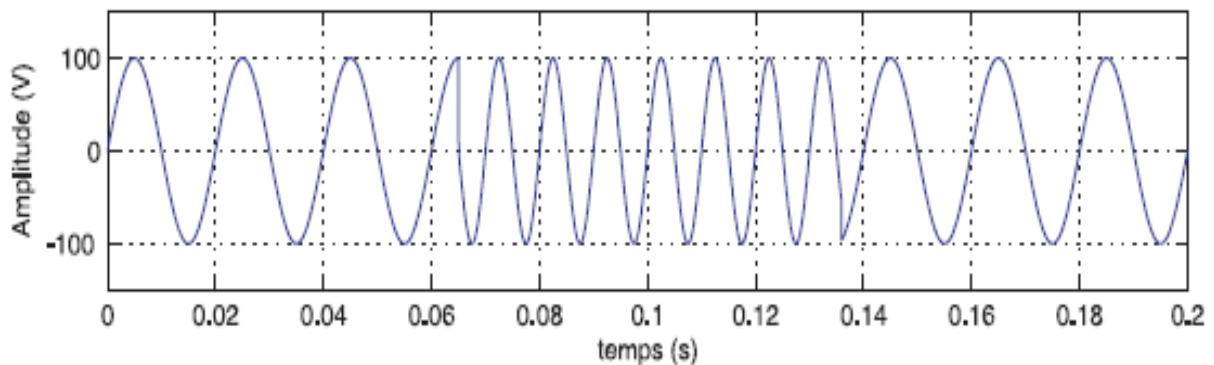
La figure I-3 montre un exemple de dissymétrie du système triphasé de tension



**Figure I-3** : Cas particulier de déséquilibre du système triphasé

### **I.3.4 Variation de fréquence :**

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, voir la figure I-4. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ . [15,1]

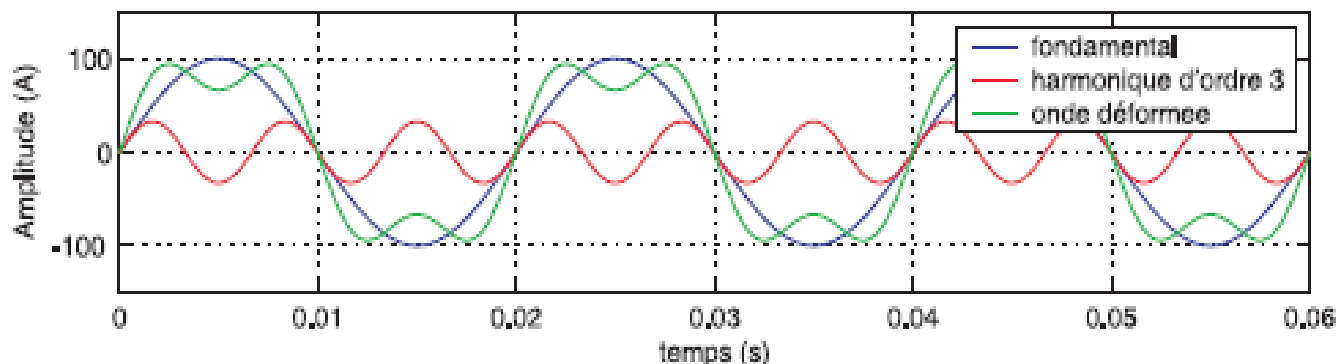


**Figure I-4** : Variation de fréquence

### **I.3.5 Les perturbations harmoniques et inter-harmoniques:**

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz ou 60 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental. La figure I-5 montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors.

Les inters harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. Leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande.[15]



**Figure I-5 : harmoniques**

Dans ce qui suit, notre étude sera limitée aux perturbations liées aux harmoniques.

### **I.3.5.1 Causes et origines :**

La cause principale des harmoniques est l'injection des courants non-sinusoïdaux par des charges non-linéaires, ainsi que les charges déséquilibrées branchées au réseau. Les onduleurs, les ponts redresseurs, les fours à arc et à induction, les variateurs de vitesse des machines électriques, les appareils domestiques tel que les téléviseurs et les lampes fluorescentes, et les alimentations à découpage représentent la majorité des sources d'émission des harmoniques [16]

### **I.3.5.2 Types des harmoniques :**

- Les harmoniques se divisent particulièrement par leur ordre ; il existe des harmoniques de type pair ou impair.
- Les harmoniques d'ordre pair (2, 4, 6, ...) très fréquemment négligeables dans un milieu industriel, ils s'annulent en raison de la symétrie du signal.

Par contre, les harmoniques d'ordre impair (3, 5, 7...) sont souvent rencontrés sur un réseau électrique. Dans les cas où il existe des changements périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs, on remarque qu'il existe d'autres types des composantes harmoniques.

Infra-harmoniques : Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamentale : 10 Hz, 20 Hz.

Inter-harmoniques : Ce sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas à des fréquences multiples de celle du fondamentale : 130Hz, 170Hz, 220Hz [ 3] .

L'arrangement des inter-harmoniques et des infra - harmoniques est indiqué par la figure : I-6

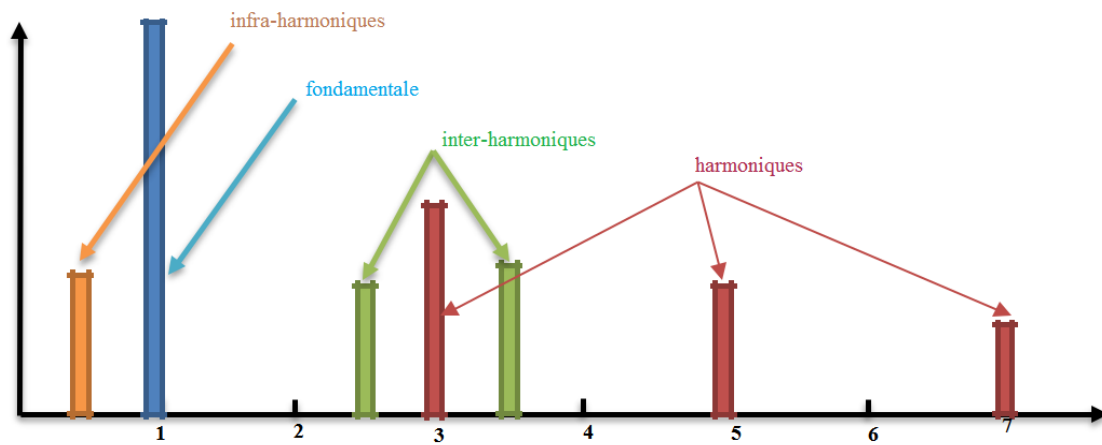


Figure I.6 : Arrangement des types d'harmoniques

### I.3.5.3 Les effets des harmoniques :

La circulation des courants harmoniques dans les réseaux électriques peut avoir des conséquences néfastes sur les réseaux et les équipements électrique ; ils mènent à la déformation de l'onde de tension, et ils causent :

- Détérioration du rendement, échauffements excessifs, vibrations et bruit dans les machines tournantes.
- Détérioration du facteur de puissance dans le réseau et augmentation des pertes joules.
- Échauffement et vieillissement des condensateurs ainsi que la fusion des fusibles de protection.
- Surcharge du fil du neutre à cause des courants harmoniques de rangs impairs multiples de trois, générées par des charges non linéaires monophasées.
- Abaissement de la précision des appareils de mesure.[17]

## I.4 Caractéristiques des harmoniques :

Différentes grandeurs sont définies pour évaluer ces perturbations. Parmi ces grandeurs les plus utilisées sont :

### I.4.1 Le taux global de distorsion harmonique (THD):

L'impact harmonique est caractérisé par le taux de distorsion harmonique globale (THD). C'est un indice important largement utilisé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à

une onde sinusoïdale. Le THD est défini comme la valeur efficace des harmoniques au-dessus de la fondamentale. Le THD est défini pour les signaux de tension de et courant [17] respectivement :

$$THDu = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left( \frac{U_{effh}}{U_{eff1}} \right)^2} \quad (I-1)$$

$$THDi = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left( \frac{I_{heff}}{I_{eff1}} \right)^2} \quad (I-2)$$

Avec :

$THDi$  : Taux de distorsion harmonique de courant.

$THDu$  : Taux de distorsion harmonique de tension.

$U_{effh}$  : Valeur efficace de la composante de tension harmonique du rang h,

Avec  $h > 1$ .

$U_{eff1}$  : Valeur efficace de la composante fondamentale de tension.

Dans ce qui suit on considère que la tension de la source est purement sinusoïdale.

#### **I.4.2 Facteur de puissance :**

Pour un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active (P) et la puissance apparente (S) . Dans le cas où il y'a des harmoniques, il apparait une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), d'où l'expression de la puissance apparente est comme suit : [17]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I-3)$$

Avec :

D: la puissance déformante. D due aux harmoniques du courant est définie par la formule suivante :

$$D = \sqrt{3} U \sqrt{I_{eff}^2 - I_{eff1}^2} \quad (I-4)$$

$I_{eff}$  : Valeur efficace de l'harmonique de rang h

$I_{eff1}$  : Valeur efficace du courant fondamental.

Alors, le facteur de puissance sera comme suit :

$$FP = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} \quad (I-5)$$

$$P = \sqrt{3} U I_{eff1} \cos(\varphi_1) \quad (I-6)$$

$$Q = \sqrt{3} U I_{eff1} \sin(\varphi_1) \quad (I-7)$$

Le diagramme de Fresnel est donné par la Figure I-7 :

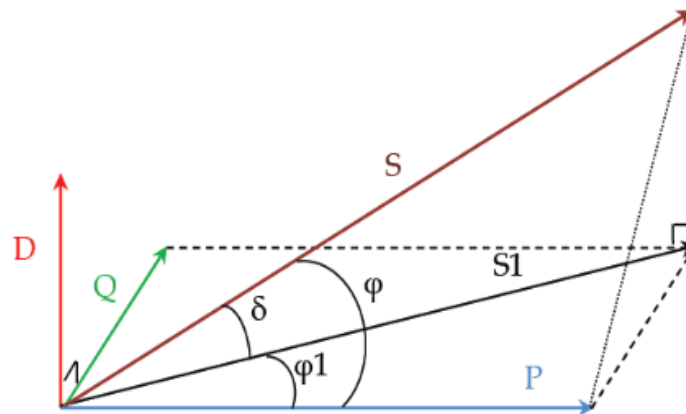


Figure I.7 : Diagramme de Fresnel avec présence d'une puissance déformante

## I.5 Normes et réglementation :

La C.E.I. (Commission Electrotechnique Internationale) et l'I.E.E.E (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sont les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine de l'électrotechnique. [32]

La présente norme (IEEE 519\_1996), détermine les limites à appliquer sur les émissions harmoniques en courant et en tension au point de couplage commun Pcc .Le tableau I-1 indique ces limites de distorsion des tensions. [33]

<b>Niveau des tensions au P<sub>cc</sub></b>	<b>Taux individuel d'harmoniques(%)</b>	<b>Taux de distorsion global THD(%)</b>
$V_n \leq 69 \text{ KV}$	3	5
$69 \text{ KV} \leq V_n \leq 161 \text{ KV}$	1.5	2.5
$V_n \geq 161 \text{ KV}$	1	1.5

**Tableau I.1:** limites des distorsions des tensions au Pcc (IEEE 519\_1996)

## **I.6 Solutions de dépollution des réseaux électriques :**

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des éléments passifs, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques à base des semi-conducteurs. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : solutions conventionnelles et solutions modernes. [ 9 ]

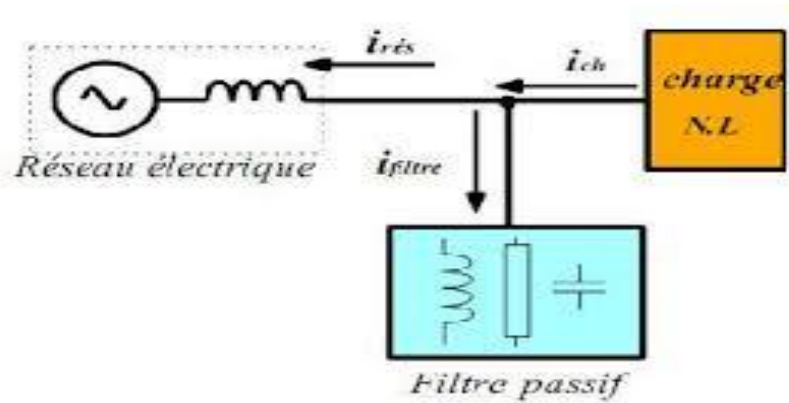
### **I.6.1 solutions conventionnelles :**

Ce sont des solutions simples, les plus connus sont basée sur l'utilisation des composant passif (inductances, condensateurs et résistances) appelé filtres passifs.[9]

#### **I. 6.1.1 Filtrage passif**

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à diminuer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire. Le dimensionnement de ces filtres est effectué de sorte que son impédance soit très faible à la fréquence de l'harmonique à éliminer. Il existe deux classes de filtres passifs (résonant, amorti) permettant de réduire les harmoniques [9].

La figure I- 8 montre le raccordement d'un filtre passif.



La Figure I- 8 : raccordement d'un filtre passif.

### I. 6.1.2 Les inconvénients du filtre passif :

Malgré sa large utilisation vu ça simplicité et moins couteux par rapport au filtre actif, il présente certains inconvénients :

- Nécessite une connaissance approfondie du réseau électrique ;
- Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer la performance du filtre ;
- Ces filtres sont inadaptables en cas d'évolution du réseau et présente un risque ; d'amplification des harmoniques en cas de modification ;
- Risque de surcharge par pollution externe.[10]

### I.6.2 Solution moderne :

Les inconvénients inévitables aux filtres passifs et l'avancement technologique en électronique de puissance et surtout avec l'apparition des nouveaux composants semi-conducteurs comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, ces raisons ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage appelé filtre actif.[10]

#### I.6.2.1 Le filtre actif :

Le filtre actif est un convertisseur de puissance agissant comme une source de courant ou de tension il permet à neutraliser l'effet d'une perturbation en injectant une grandeur (courant ou/et tension) égale à la perturbation mais de phase opposée. Il existe trois grandes familles des filtres actifs, à savoir les filtres actifs parallèles (FAP), séries (FAS) et hybrides.[10]

##### I.6.2.1.1 Filtre actif série :

Ce filtre fournit une tension harmonique de même amplitude et en opposition de phase avec la tension harmonique venant de la charge non linéaire. Ce type des filtres est utilisé pour la compensation de toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension. Il est monté en série sur le réseau à travers un transformateur comme le montre la figure (I-9).En revanche, ce dispositif ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.[10]

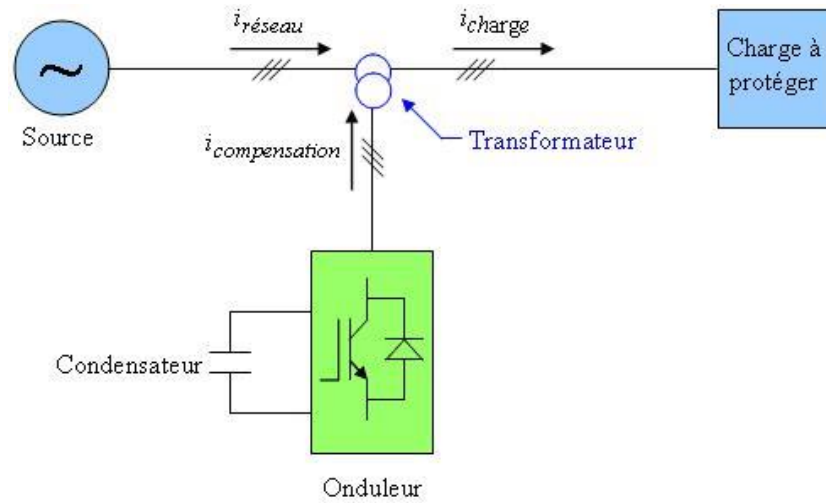


Figure I-9 : montage du filtre actif série.

### I.6.2.1.2 Filtre actif parallèle :

Contrairement au filtre actif série, le filtre actif parallèle (FAP) est la solution la plus adaptée à la compensation de courant. Le (FAP) est composé d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. Il est connecté en parallèle au point de connexion commun. Ce filtre se comporte comme une source de courant harmonique contrôlable, il injecte un courant égal à celui absorbé par la charge non linéaire, mais en opposition de phase avec ce dernier, de telle sorte que le courant de source après compensation soit sinusoïdal et en phase avec la tension correspondante.[10]

Ce filtre est connecté en parallèle sur le réseau comme le montre la figure (I-10)

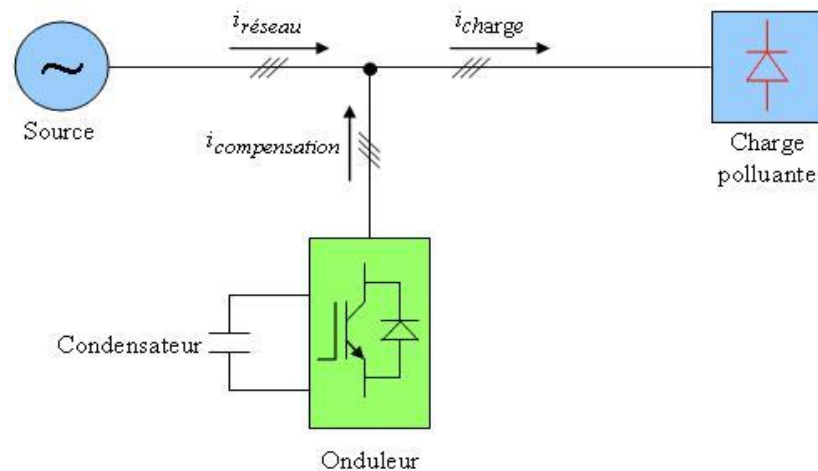


Figure I-10: Montage du filtre actif parallèle

### I.6.2.1.3 Combinaison parallèle-série actif (UPQC):

La combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre sur La figure I.11. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [2].

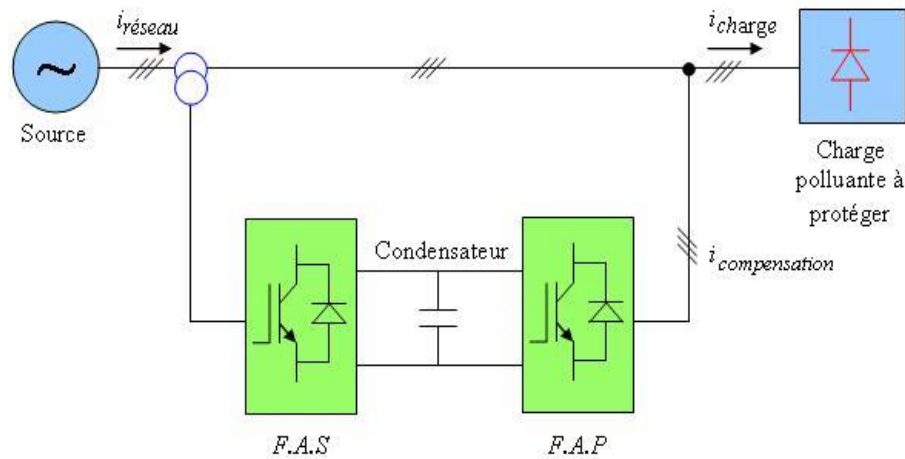


Figure I.11: Combinaison parallèle série des filtres actifs.

#### I.6.2.1.4 Filtre actif hybride :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas on connectera en parallèle ou en série des filtres passifs pour compenser les harmoniques prépondérants. Plus qu'elle permet d'optimiser les coûts, cette structure permet aussi d'améliorer les formes d'ondes. [ 34]

De nombreuses configurations existent combinant éléments passifs et filtre actif série ou parallèle. On distingue alors plusieurs types d'association de filtres actifs et passifs, les plus étudiées étant :

- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle. [ 34 ]

#### I.6.3 Comparaison entre un filtre actif et un filtre passif:

Dans le tableau I.2 ci-dessous, on résume une comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.[3]

<b>Critère de comparaison</b>	<b>Filtre actif</b>	<b>Filtre passif</b>
Action sur les courants harmoniques	Agit simultanément sur plusieurs fréquences selon sa bande passante	Nécessite un filtre pour chaque harmonique
Interaction entre filtres voisins	Pas de risque	Risque de destruction du filtre accordés à des fréquences voisins (résonances)
Influence d'une variation de fréquence	Aucun risque	Efficacité réduite (le filtre est calculé pour une fréquence exacte)
Surcharge	Pas de risque	Risque de détérioration lorsque le courant harmonique à compenser dépasse ses capacités.
Raccordement	Pas d'étude préalable	Etude au cas par cas
Surveillance de fonctionnement	Réalisée par le système de contrôle commandé	Pas de surveillance
Influence d'une augmentation de courant	Aucun risque de surcharge. mais l'efficacité diminuée	Risque de surcharge et de détérioration
Encombrement	Faible	Important
Poids	Faible	Elevé
Coût	Coût des composants plus élevé Pas de coût d'étude de dimensionnement	Coût des composants plus faible Etude de dimensionnement obligatoire

**Tableau. I.2:** Comparaison entre filtrage actif et passif [ 3 ]

## **I.7. Conclusion:**

Ce chapitre a été consacré à l'étude des problèmes de la qualité d'énergie électrique d'une part et les solutions de dépollution d'autre part. On a exposé les effets, les causes et les conséquences des harmoniques sur le réseau électrique. Ensuite, pour réduire ces effets, différentes solutions ont été exposées. On a aussi montré les différents normes et réglementations qui doivent être respectés. L'utilisation des filtres actifs se présente comme une meilleure solution pour tous types de perturbations qui apparaissent dans le réseau électrique. On a clôturé ce chapitre par une comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.

# **Chapitre II**

## **Stratégie de commande du Filtre Actif Parallèle avec un Système Photovoltaïque PV**

## **II.1 Introduction :**

Dans ce chapitre nous allons présenter la structure générale d'un filtre actif parallèle connecté à un système photovoltaïque. Cette structure est divisée en deux parties, la partie de puissance et la partie de commande-contrôle.

La partie de puissance de ce système est composée d'un onduleur, filtre de couplage ainsi d'un système photovoltaïque.

La partie commande comporte trois blocs de commande, identification des courants harmoniques, régulation de la tension de bus continu ainsi la commande de l'onduleur.

L'objectif de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement de ce système et en particulier la théorie de la méthode d'identification des courant harmonique et la méthode de suivi de la puissance maximale de générateur photovoltaïque.

## **II.2 Principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle :**

Le système se compose généralement d'un réseau électrique, une charge non linéaire qui produit des harmoniques et consomme de l'énergie réactive et le filtre de puissance active pour éliminer ces harmoniques. Le circuit de l'identification de distorsion du courant sépare le courant harmonique du courant de charge, qu'il est inversé pour produire un signal de commande afin de compenser le signal de courant harmonique, de sorte que le circuit de commande de l'onduleur génère des impulsions de commutation et l'onduleur produit un courant de compensation, qui suit sa référence. Par conséquent, le courant de réseau ne contient que la composante fondamentale, de sorte que la fonction de compensation de l'harmonique est réalisée.[1]

Si le filtre actif doit à la fois compenser le courant harmonique et l'énergie réactive, il est nécessaire d'ajouter uniquement le composant réactif du courant de charge au signal de compensation du courant.[1].

## **II.3. Structure du Filtre actif parallèle :**

Le SAPF est une structure de tension connectée en parallèle au réseau. Il est composé essentiellement de deux parties, une partie de puissance et une partie de commande,[20] comme le montre la figure II.1.

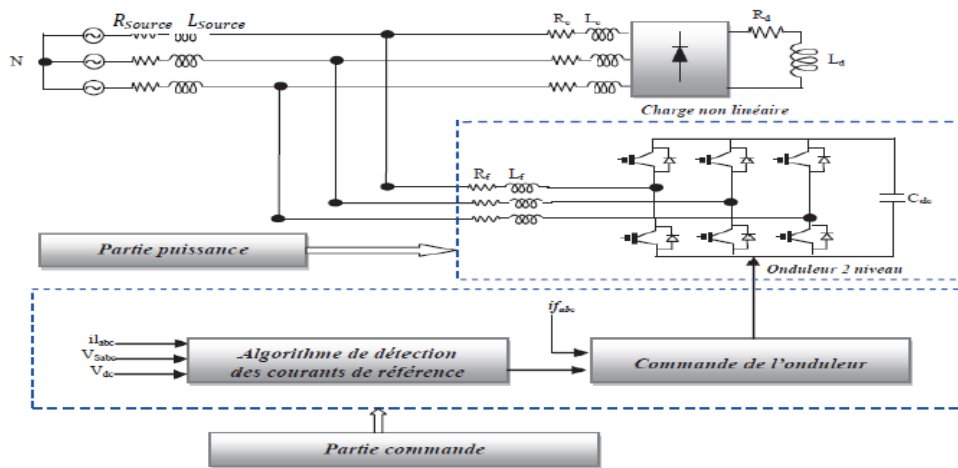


Figure II.1 Structure d'un filtre parallèle

### II.3.1 Description de la partie de puissance

#### II.3.1.1 Onduleur de tension :

L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (IGBT, Thyristor, GTO) montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- a un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension ;
- le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mise en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs.[20]

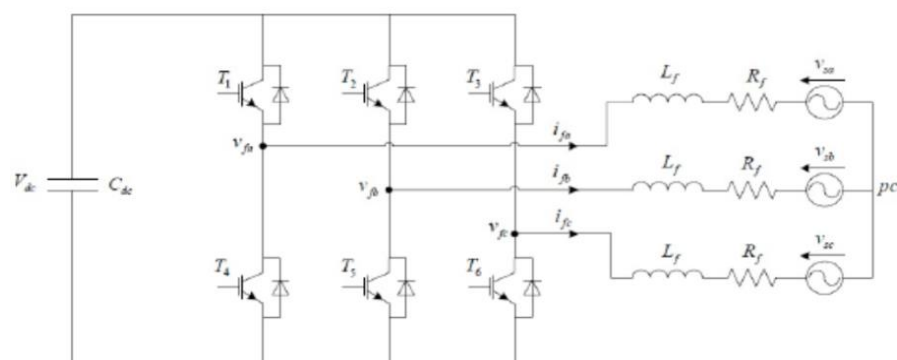


Figure II.2 : Onduleur

On constate que la fermeture et l'ouverture des interrupteurs dépend de l'états des signaux de commande Sa, Sb et Sc qui peuvent prendre chacune deux valeurs 0 ou 1; comme définit ci-dessous. [20].

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{T1 fermé et T4 ouvert} \\ 0 & \text{T1 ouvert et T4 fermé} \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{T2 fermé et T5 ouvert} \\ 0 & \text{T2 ouvert et T5 fermé} \end{cases}$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{T3 fermé et T6 ouvert} \\ 0 & \text{T3 ouvert et T6 fermé} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} U_{ab} &= v_{fa} - v_{fb} \\ U_{bc} &= v_{fb} - v_{fc} \\ U_{ca} &= v_{fc} - v_{fa} \end{aligned} \quad (\text{II-1})$$

$$v_{fa} = \frac{U_{ab} - U_{ca}}{3}$$

$$v_{fb} = \frac{U_{bc} - U_{ab}}{3} \quad (\text{II-2})$$

$$v_{fc} = \frac{U_{ca} - U_{bc}}{3}$$

Les tensions  $v_{fa}$ ,  $v_{fb}$  et  $v_{fc}$  sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient les équations suivantes

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} + R_f \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-3})$$

On suppose que les trois tensions du réseau soient équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$\begin{aligned} v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} &= 0 \\ i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{II-4})$$

Donc on peut déduire la relation suivante

$$v_{fa} + v_{fb} + v_{fc} = 0 \quad (\text{II-5})$$

A partir de la relation (II-2) et (II-5) nous obtenons

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_a & -S_b & -S_c \\ -S_a & 2S_b & -S_c \\ -S_a & -S_b & 2S_c \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (\text{II-6})$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de la tension de sortie du l'onduleur, comme il est indiqué dans le tableau II.1 . [20]

<i>Vecteur</i>	$S_{a1}$	$S_{b1}$	$S_{c1}$	$S_{fa}$	$S_{fb}$	$S_{fc}$
$v_0$	0	0	0	0	0	0
$v_1$	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
$v_2$	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
$v_3$	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
$v_4$	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
$v_5$	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
$v_6$	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
$v_7$	1	1	1	0	0	0

**Tableau. II.1:** tension de sortie du l'onduleur

### II.3.1.2 Filtre de couplage :

Afin de connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau, il est nécessaire de disposer entre les deux un filtre de raccordement ou dit de sortie de nature inductive. La fonction de ce filtre permet :

- de générer des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau ;
- de réduire au point de raccordement au réseau , l'amplitude des créneaux de tension générés. [17].

### II.3.1.3 Système de stockage d 'énergie :

Le stockage de l'énergie du côté continu est assuré généralement par un condensateur, le condensateur joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes  $V_{dc}$  est maintenue à une valeur quasi-constante. La fluctuation de cette tension doit être faible d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs et d'autre part pour ne pas dégrader la performance du filtre actif [17,18] . Mais dans notre étude nous allons remplacer le condensateur par un générateur photovoltaïque (PV) pour répondre mieux aux exigences du

systèmes de filtrages actif d'harmoniques et cela vue les difficultés de la régulation du bus continu .[7]

### II.3.1.3.1 Généralité sur la technologie photovoltaïque :

#### II.3.1.3.1.1 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839; il réfère au processus physique de transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique. Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie. Quand un photon heurte des matériaux semi-conducteurs, son énergie est transférée aux électrons de ces derniers. Avec cette énergie supplémentaire, l'électron (couche N) peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome créant un trou (couche P). Ces charges sont alors maintenues séparées par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel, ensuite il suffit de fermer le circuit entre ces deux zones (P et N) pour créer un courant électrique. Comme il est indiqué par la figure II.3 [5]

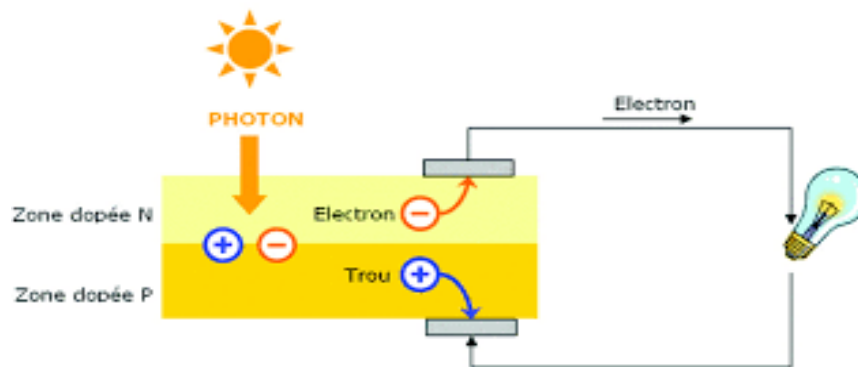


Figure II.3 : Principe de conversion photovoltaïque

#### II.3.1.3.1.2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances.[6]

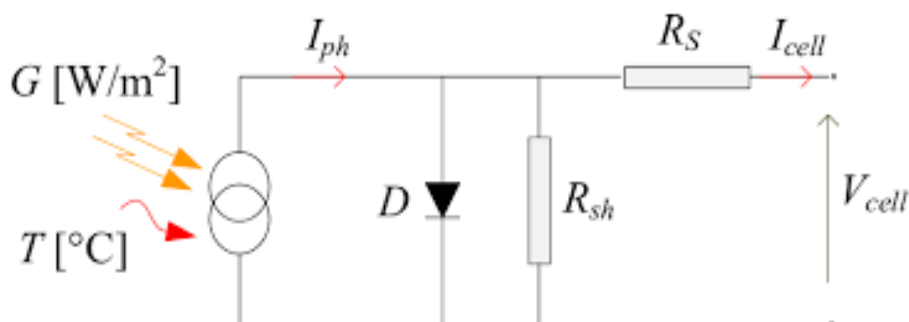


Figure II.4 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

G : Source de courant parfaite.

$R_{sh}$ : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

$R_s$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contact).

D : Diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens.

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants :

- **Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )** : C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle ( $V_{pv}=0$ ). [6]
- **Tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ )** : Représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photo-courant  $I_{ph}$  ( $I_d = I_{ph}$ ) quand ( $I_{pv}=0$ ). Elle reflète la tension de la cellule en absence de lumière, elle est exprimée mathématiquement par :

$$V_{oc} = \frac{mkT_c}{e} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) = V_t \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (II.7)$$

Ou

$$V_t = \frac{mkT_c}{e} \quad (II.8)$$

Avec :

$V_t$  : La tension thermique ;

$T_c$  : La température absolue ;

m : Facteur idéal de la jonction ;

K : Constante de Boltzmann ( $K= 1.38 \cdot 10^{-23}$  J/k) ;

e : Charge de l'électron ( $e=1.6 \cdot 10^{-19}$ ). [6]

- **Point de puissance maximale ( $P_{max}$ )**: C'est le point M( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ) de la figure (II.2) où la puissance dissipée dans la charge est maximale .[6]

$$P_{max} = V_{opt} \cdot I_{opt} \quad (II.9)$$

Avec :

$V_{opt}$  : La tension optimale.

$I_{opt}$  : Le courant optimale.

- **Rendement maximum** : est le rapport entre la puissance maximale et la puissance à l'entrée de la cellule solaire.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{A_{pv} \cdot G} \quad (II.10)$$

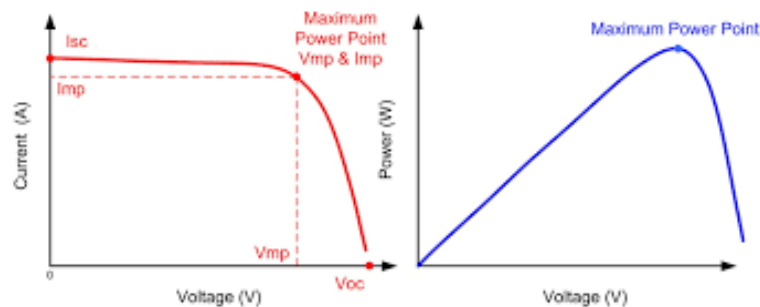
Où :

$G$  : l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface ( $W/m^2$ ) ;

$A_{pv}$  : Surface effective des cellules. [6]

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de  $1000W/m^2$  d'une température ambiante de  $25^{\circ}C$  et d'un spectre AM de 1.5. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort. [6]

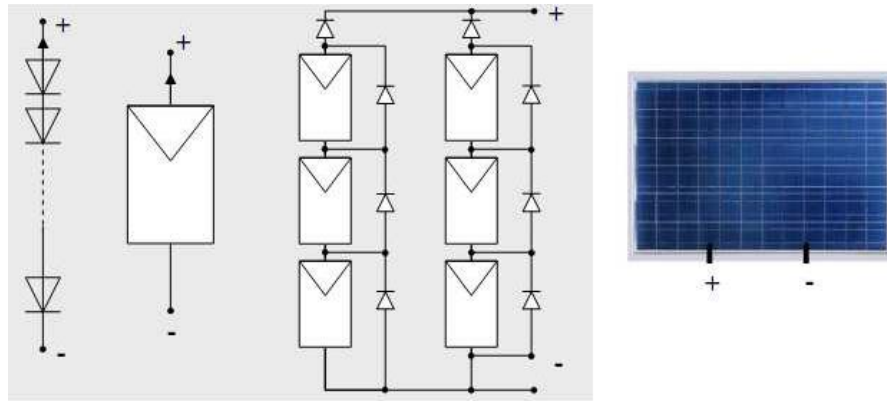
La figure II.5 présente la courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque avec les points importants qui la caractérise.



**Figure II.5** : Courbe courant -tension d'une cellule photovoltaïque

### II.3.1.3.1.3 Générateur photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque est un ensemble des lignes connectées en parallèle, chaque ligne est constituée d'un nombre des modules photovoltaïque connectés en série. Comme illustre la figure II.6.[7 ]



**Figure II.6:** cellule, modules et panneau photovoltaïque

Les panneaux solaires de première génération sont généralement dimensionnés pour que leurs (PPM) correspondent à la tension nominale de batterie de 12 ou 24 Volts. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit pour effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques. L'utilisation d'un étage d'adaptation afin d'optimiser la production d'énergie à tout moment et plus en plus préconisée [19].

#### II.3.1.3.1.4 L'étage d'adaptation et le Convertisseur DC/DC :

Afin que le GPV fonctionne dans son régime optimal et extraire à chaque instant le maximum de puissance MPP quelles que soit les conditions météorologiques, une solution adoptée est d'introduire un étage d'adaptation d'impédance entre le GPV et la charge [10] comme il sera illustrée par la suite à la figure II.8 ,ainsi les hacheurs présentent la partie essentielle dans le dispositif de commande du 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 aussi élève la tension en sortie du module photovoltaïque en une tension délivrée sur le bus continu. Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs.[7]

Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT fonctionnant en mode (bloqué/saturé),le transistor sera commuté à une fréquence constante  $f_s$  avec un temps de fermeture égal à  $dT_s$  et un temps d'ouverture égal:

$$(1-d)T_s ,$$

Où:

$T_s$  : est la période de commutation qui est égale à  $1/f_s$

$d$  : est le rapport cyclique du commutateur ( $d \in [0,1]$ ). [7]

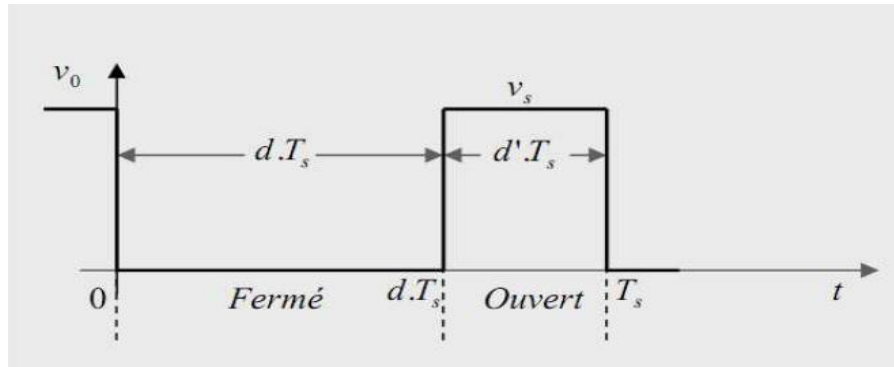


Figure II.7: période ouverture et fermeture d'un commutateur

On distingue trois types de convertisseurs DC-DC:

- Les abaisseurs (Buck) dans lesquels  $V_i > V_0$  ;
- Les élévateurs (Boost) dans lesquels  $V_0 > V_i$  ;
- Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents. [7]

### II.3.2 Description de la partie de commande

Le contrôle-commande d'un filtre actif parallèle est mise en œuvre en trois étapes :

- la première étape ; la tension de réseau et le courant de charge sont détectés à l'aide d'un capteur de mesures ;
- la deuxième on détermine le courant de référence à partir d'une méthode d'identification approuvée. [23]
- la troisième étape de commande ; les signaux de commutation de semi-conducteur de l'onduleur du FAP sont générés ont utilisant l'un des techniques de contrôle connus [21,22].

#### II.3.2.1 Identification des courants harmoniques :

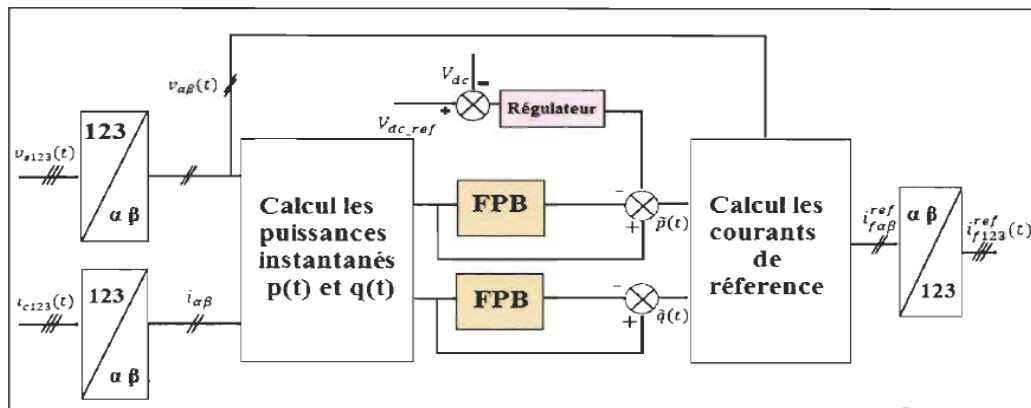
Les méthodes d'identification des grandeurs harmoniques sont classées dans deux domaines, fréquentiel et temporel [26]. La première est basée sur la transformée de Fourier de la tension ou du courant non sinusoïdal pour en extraire les harmoniques de compensation. Cet algorithme présente la difficulté de nécessiter beaucoup de calcul surtout lorsque on augmente le nombre d'harmoniques à éliminer ; il en résulte un temps de réponse élevé [27]. La deuxième approche est basée sur la comparaison instantanée des grandeurs de compensation harmonique de référence, sous forme de tension ou de courant, aux grandeurs harmoniques réels. Beaucoup de méthodes entrent dans cette famille, notamment la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

On distingue des méthodes d'extraction globale (tous les harmoniques à compenser sont présents dans la référence) et sélective (les harmoniques à compenser sont choisis et limités) [28]. Le choix de la méthode dépendra des objectifs fixés : compensation de tous les courants harmoniques, compensation sélective de certaines harmoniques, compensation des harmoniques dans des cas de configurations défavorables susceptibles de survenir dans les réseaux triphasés industriels car la tension du réseau est souvent perturbée ou déformée.[29] , dans cette partie nous allons décrire la méthode des puissances réelle instantanées.

**II.3.2.1.1 Méthode des puissances actives et réactives instantanées (P-Q):**

Elle était utilisée afin d'éviter les difficultés dues lors de la mise en œuvre des méthodes fréquentielles. L'extraction des harmoniques est réalisée à partir de la puissance instantanée calculée en repère fixe. En utilisant la transformation de Concordia des tensions simples et courants de ligne, afin de calculer les puissances réelles, imaginaires instantanées.

Ensuite, pour déterminer les courants harmoniques de la charge, les puissances sont décomposées en une composante continue liée au fondamental, et l'autre alternative liée aux harmoniques. Afin de ne garder que la composante alternative liée aux harmoniques de la puissance active instantanée et éliminer la composante continue (correspondant à la composante fondamentale) on utilise généralement, soit un filtre passe-haut (FPH), soit un filtre passe-bas (FPB), cette transformation est nécessaire si nous voulons éliminer facilement la composante continue. La figure II.8 montre le schéma de principe de cette méthode.[7].



**Figure II.8 :** Schéma de principe de la méthode d'identification instantanée.

**II.3.2.1.2 Théorie de la méthode des puissances instantanées :**

On note respectivement les vecteurs des tensions simples d'alimentations [Vs] et les courants de charge d'un système triphasé équilibré [Ic] par:

$$[Vs] = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \tag{II.11}$$

$$, [Ic] = \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} \tag{II.12}$$

La transformation des valeurs triphasées instantanées de la tension et du courant dans le repère des coordonnées  $\alpha$ - $\beta$  à l'aide de transformation de Concordia est donnée par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{(2/3)} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{(2/3)} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

la puissance active et la puissance réactive instantanées sont données par les relations suivantes:

$$p(t) = p_{\alpha\beta} = V_{\alpha} * I_{\alpha} + V_{\beta} * I_{\beta} \quad (\text{II.15})$$

$$q(t) = q_{\alpha\beta} = V_{\alpha} * I_{\beta} - V_{\beta} * I_{\alpha} \quad (\text{II.16})$$

Ces relations peuvent être écrites sous forme matricielle par:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Chacune de ces puissances est constituée d'une partie continue image de la puissance du fondamental, et d'une partie alternative image de la puissance liée aux ondulations ou harmoniques. Ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous

$$\begin{cases} p(t) = \bar{p} + \tilde{p} \\ q(t) = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$\bar{p}, \bar{q}$  Sont les composantes continues des puissances actives et réactives respectivement, correspondant à la composante fondamentale active et réactive du courant et de la tension.[7]

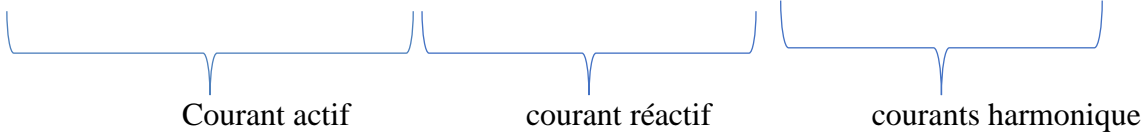
$\tilde{p}, \tilde{q}$  Sont les Composantes alternatives de la puissance active et réactive respectivement. Liées à la somme des composantes harmoniques du courant et de la tension.

La compensation des harmoniques par le filtre actif se fait en général par les puissances suivantes :  $p^* = \tilde{p}$  ,  $q^* = \tilde{q}$  .

Les courants de référence selon les axes ( $\alpha, \beta$ ) est exprimé à partir de l'équation en fonction des puissances à compenser comme le montre l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} I\alpha \\ I\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V\alpha & V\beta \\ -V\beta & V\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v\beta^2} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

En considérant les équations (II.19) et (II.20), nous pouvons séparer le courant dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques.

$$\begin{bmatrix} I\alpha \\ I\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v\beta^2} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v\beta^2} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v\beta^2} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$


Cette expression montre que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère ( $\alpha, \beta$ ) revient à séparer les composantes continues des puissances réelles et les imaginaires des composantes alternatives.

Si l'objectif est de compenser juste les harmoniques du courant. Dans ce cas il faudrait compenser les composantes harmoniques du courant identifié. Nous éliminons alors la composante continue de la puissance active et réactive simultanément à l'aide d'un simple filtre passe-bas (FPB). Les courants de référence seront dans ces conditions comme suit:

$$\begin{bmatrix} I\alpha \\ I\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v\beta^2} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

En tenant compte des pertes dans le filtre  $p_c$ , on obtient :

$$\begin{bmatrix} I\alpha \\ I\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v\beta^2} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} - pc \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

En appliquant la transformation inverse de Concordia on trouve les courants de référence produits par charge non linéaire comme suit ;

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{p\alpha} \\ I_{p\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Avec  $I_{p\alpha}$ ,  $I_{p\beta}$  : courants perturbateurs calculés dans le repère ( $\alpha, \beta$ ) à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (II.20). [ 7 ]

### II.3.2.2 Commande de l'onduleur

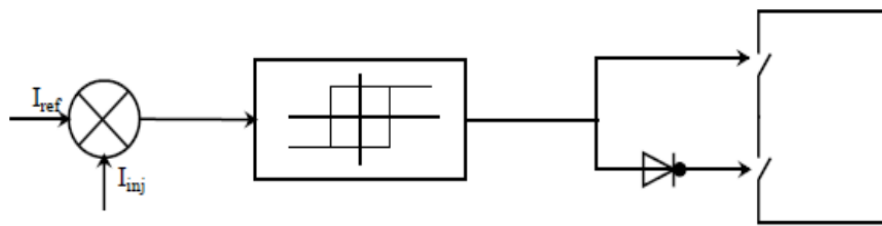
L'objectif de la commande est de générer des ordres d'ouverture et fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence.

Trois types de commandes rapprochées des convertisseurs statiques sont principalement mis en œuvre :

- la commande par hystérésis ;
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinusoïdale ;
- Commande par MLI vectorielle.

#### II-3.2.2.1 Commande par hystérésis.

Cette commande est connue sous la dénomination de commande en tout ou rien, son objectif est de contrôler les courants de compensation en les forçant à suivre ceux de référence. Un système de base pour le contrôle de la bande d'hystérésis est représenté sur la Figure II.9 [35]



**Figure II.9** : Principe de contrôle du courant par hystérésis.

Cette technique peut être caractérisée par une bande centrée autour de la référence, la dimension de ce filtre se résume à fixer la largeur de cette bande. Une règle pratique consiste à la prendre à 5% du courant nominal. Cette bande est le seul paramètre de contrôle de courant de chaque bras de l'onduleur. [35]

Les signaux de sortie des comparateurs à hystérésis sont utilisés pour commander l'ordre de commutation des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur. Le courant de compensation va rester dans une bande autour du signal de référence, voir la Figure II.10. [35]

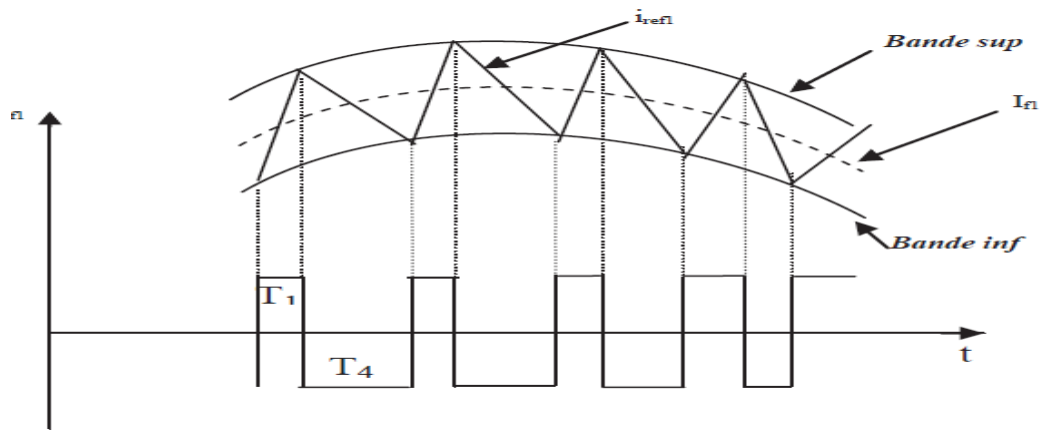


Figure II.10 Exemple d'une Commande deux interrupteurs par hystérésis.

Cependant elle ne garantit pas d'une manière systématique le respect de la fréquence de commutation maximale des semi-conducteurs.

### II-3.2.2.2 Commande par Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Le principe du contrôle par MLI est décrit à la figure II.11, la différence entre le courant référence  $i_f^*$  et le courant réel  $i_f$  est appliquée à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur appelé modulatrice est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence de la porteuse triangulaire fixe donc la fréquence de découpage des semiconducteurs de puissance. [35]

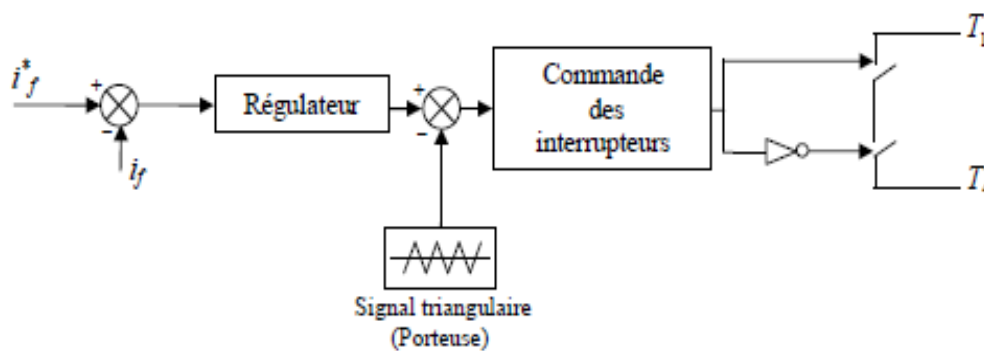


Figure II.11: Principe de la commande MLI

Le contrôle par MLI est d'une complexité réduite ; il garantit un fonctionnement à fréquence fixe et conduit à un contenu harmonique parfaitement identifié. Cependant, cette technique a des propriétés dynamiques qui peuvent être limitatives et la réponse du système lors d'un changement brutal des courants de référence est plus lente que celle d'une commande par hystérésis. [35]

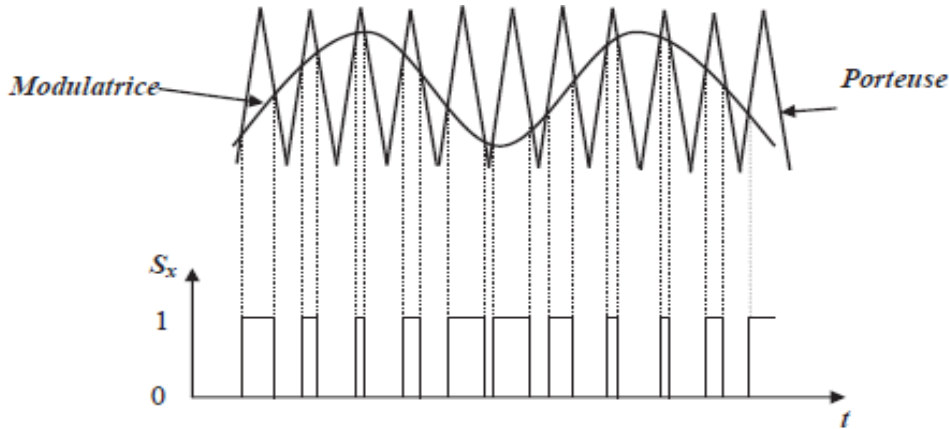


Figure II.12 : commande vectorielle par MLI sinusoidale

### II-3.2.2.3 Commande par MLI vectorielle

Cette technique est largement utilisée dans la commande des onduleurs, elle peut augmenter la valeur maximale de la tension de sortie de l'onduleur avec un taux de distorsion harmonique réduit par rapport à ceux obtenus par la méthode MLI sinusoidale. Il y a plusieurs algorithmes utilisant la MLI vectorielle pour commander l'onduleur ou le redresseur. Le but de toutes les stratégies de modulation est de réduire les pertes de commutation et les harmoniques, et d'assurer une commande précise. [35]

#### II-3.2.2.3.1 Principe de la commande

La commande MLI vectorielle consiste à placer le vecteur de commande dans le référentiel diphasé qui sera obtenu après l'utilisation de la transformation de Clarck. Le codage des commutations possibles des interrupteurs peut être effectué sur trois états ( $S_a, S_b, S_c$ ) ce qui donne huit vecteurs possibles dont deux sont nuls ( $V_0$  et  $V_7$ ) [35]

Les commandes dans le référentiel diphasé de Clarck sont données par

$$\begin{bmatrix} V\alpha \\ V\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Le tableau (II.2) permet de trouver pour une combinaison des interrupteurs donnée, le vecteur obtenu dans le référentiel de Clarck.

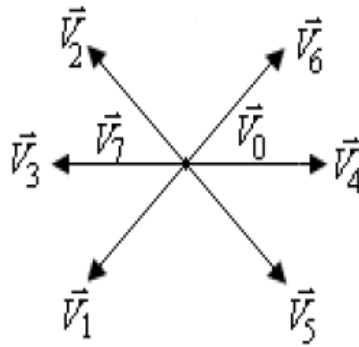


Figure II.13 : représentation vectorielle des tensions générées

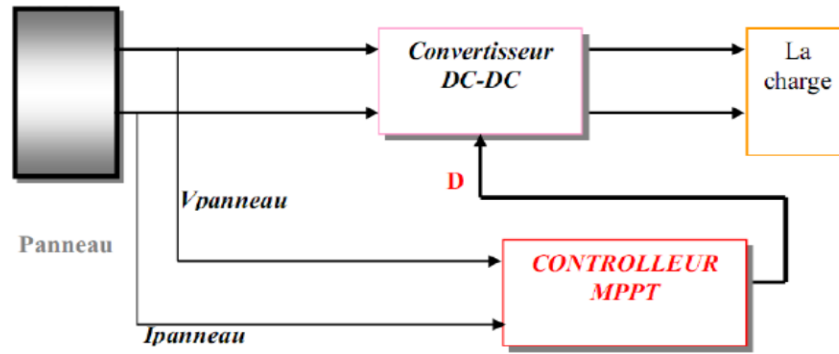
Vecteurs	S <sub>c</sub>	S <sub>b</sub>	S <sub>a</sub>	V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>	V <sub>α</sub>	V <sub>β</sub>
V <sub>0</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
V <sub>1</sub>	0	0	1	2V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	2V <sub>dc</sub> /3	0
V <sub>2</sub>	0	1	0	-V <sub>dc</sub> /3	2V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /√3
V <sub>3</sub>	0	1	1	V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	-2V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /√3
V <sub>4</sub>	1	0	0	-V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	2V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /√3
V <sub>5</sub>	1	0	1	V <sub>dc</sub> /3	-2V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /√3
V <sub>6</sub>	1	1	0	-2V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	-2V <sub>dc</sub> /3	0
V <sub>7</sub>	1	1	1	0	0	0	0	0

Tableau II.2 : tension de sortie d'un onduleur (commande MLI vectorielle)

### II.3.2.3 Commande de système photovoltaïque

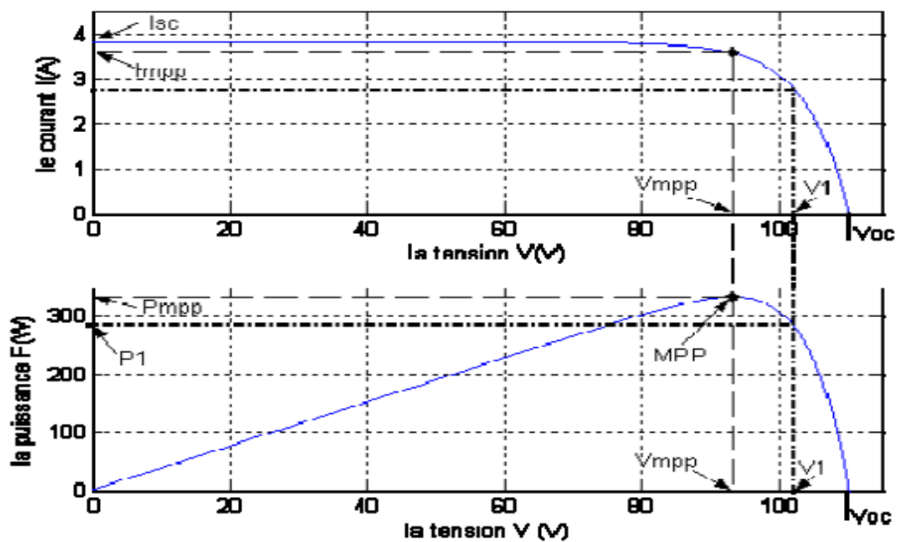
#### II.3.2.3.1 Fonctionnement optimal d'un générateur photovoltaïque :

La puissance fournie par un générateur photovoltaïque GPV varie fortement en fonction des conditions météorologiques comme l'éclairement et la température ainsi que les caractéristiques de la charge, ce qui conduit à une puissance de sortie non linéaire. Il se pose donc un problème d'adaptation de GPV avec la charge ainsi l'extraction le maximum de la puissance aux bornes du (GPV) et de la transférer vers la charge. Dans ce cas, il est nécessaire de concevoir et de réaliser un dispositif qui permet de réguler et maximiser la puissance fournie à la charge figure II.14 .[10]



**Figure II.14 :** Schéma synoptique de GPV avec un convertisseur DC-DC contrôlé par la commande MPPT

Cet étage d'adaptation est souvent réalisé par un convertisseur statique, ce convertisseur en tant que suiveur de point de puissance maximale (MPP) de la caractéristique puissance en fonction de la tension présentée à la figure II-15 dite MPPT «En anglais : Maximum Power Point Tracking », il se compose d'un circuit de puissance de topologie DC/DC ou DC/AC selon la nature de la charge, menu d'un circuit de commande où il y'aura un algorithme qui permette à suivre le point de puissance maximale (PPM) .[10]



**Figure II.15 :** Caractéristiques I-V, P-V, d'un module PV

### II.3.2.3.2 Technique de poursuite du point de puissance maximale :

Pour obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, la technique appelée la poursuite de la puissance maximale (MPPT) qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source de l'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter. Elle doit être utilisée dans toute application utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire et même indispensable selon la théorie du transfert optimal de puissance [25].

De nombreuses recherches ont été effectuées sur les commandes MPPT afin de trouver une commande optimale. Bien qu'il existe plusieurs types d'algorithmes poursuite de la PPM. ,dont

la méthode de la dérivée de la puissance, méthode de la perturbation et l'observation (P&O), méthode MPPT à base des algorithmes génétiques, méthode par incrémentation de conductance ; MPPT à base de Logique floue .[4]

Dans notre travail on va aborder la Méthode Perturbation et Observation (P & O).

### II.3.2.3.2.1 Méthode de la perturbation et l'observation (P&O):

La méthode perturbation et observation (P&O) est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce processus fonctionne par la perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et en observant l'effet sur la puissance de sortie.

Suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l' instant k, puis on la compare à la précédente de l'instant (k-1). Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle (Hua et Shen, 1998). [10 ]. Elle doit être déterminée expérimentalement.

L'Organigramme de l'algorithme perturbation et de l'observation (P&O) est illustré dans la figure II.16, le  $\Delta D$  est le pas de la perturbation

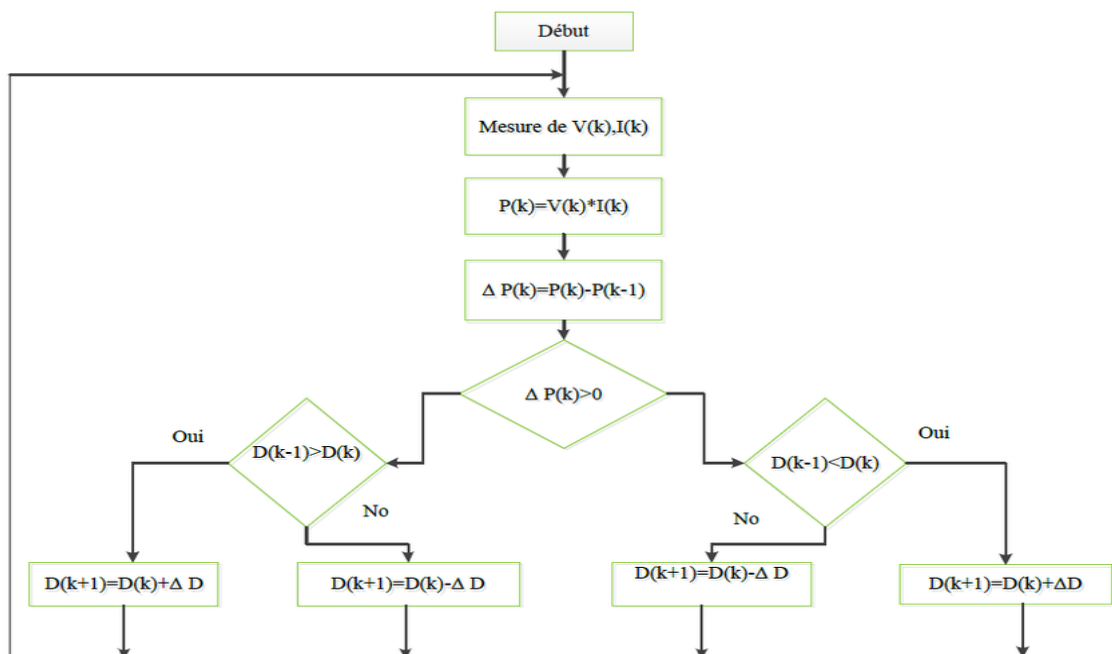


Figure II.16 : Organigramme d'algorithme MPPT (P&O)

## **II.5 Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre la structure générale de l'ensemble de notre système, nous avons commencé par sa partie de puissance, dont l'onduleur, filtre de couplage et le système photovoltaïque, ensuite nous avons consacré une grande partie aux différents blocs de commande, l'identification des courants harmoniques, commande de l'onduleur et la technique de suivi du point la puissance maximale MPPT P&O d'un GPV.

Nous avons vu que la commande de ce système s'articule sur l'identification des courants harmoniques, nous avons exposé la Théorie de la méthode des puissances instantanées. Cette théorie est la base de la commande choisie dans notre travail cette dernière dite Direct Power Control qui sera l'objet de notre prochain chapitre.

# **CHAPITRE III**

## **Application de la DPC au Filtre Actif Parallèle**

### **III.1 Introduction :**

La commande DPC est une stratégie de contrôle de haute performance pour les convertisseurs basés sur la théorie de la puissance instantanée.

L'idée de base de cette commande est de choisir le meilleur état de commutation des commutateurs de puissance à travers une table de commutation avec des comparaisons d'hystérésis pour maintenir un courant purement sinusoïdal et atteindre aussi un facteur de puissance unitaire.

Une commande directe de puissance (DPC) associée à la méthode de poursuite de la puissance maximale d'un groupe photovoltaïque GPV est proposée pour contrôler simultanément la puissance active photovoltaïque injectée, la compensation de l'énergie réactive et l'élimination des courants harmoniques générés par charges non linéaires.

Nous allons procéder à une simulation de la combinaison entre le filtre actif parallèle et le système solaire dans le but d'avoir une idée sur la qualité de l'énergie du système en particulier la compensation courant harmonique, la compensation de la puissance réactive ainsi l'injection de la puissance active supplémentaire dans le réseau par le filtre.

### **III.2. Etat de l'art sur la commande DPC:**

Le principe de la commande DPC est basé sur le calcul des puissances active et réactive à travers les mesures du courant et de la tension d'entrée du convertisseur MLI et effectué instantanément la commande de puissance en utilisant les comparateurs d'hystérésis et la table de commutation.

Le vecteur de tension de la commande est sélectionné à partir d'une table de commutation qui se compose des erreurs des puissances active et réactive ainsi que la position angulaire du vecteur tension Il existe plusieurs types de stratégies pour le contrôle des convertisseurs MLI .

La commande directe de puissance (DPC) est l'une de ces stratégies, elle a été proposée pour la première fois en 1991 par Ohnishi pour le contrôle des puissances instantanées active et réactive d'un redresseur à MLI triphasé. Elle provient du contrôle du couple direct (DTC) proposé par Takahashi ; utilisé dans la commande des machines électriques. Plus tard, en 1998, un algorithme similaire a été présenté par Noguchi et qui est aujourd'hui considéré comme un point de référence vers lequel les nouvelles implémentations DPC sont de source.

Plusieurs modifications ont été effectuées sur la commande DPC classique, malgré les mérites d'une structure simple, d'une réponse rapide et d'une forte robustesse, cette commande présente des ondulations de puissance élevées en régime stationnaire et une fréquence de

commutation variable qui est causée par les contrôleurs d'hystérésis et la table de commutation. Malheureusement, ces modifications et ces techniques de commande exigent des calculs complexes.

### III.3. Principe de la Commande directe de puissance :

Cette stratégie de contrôle non linéaire est définie comme une technique de contrôle direct, car elle choisit le vecteur de tension appropriée du convertisseur sans aucune technique de modulation. Le concept de base consiste à sélectionner les états de commutation appropriés à partir d'une table de commutation sur la base des erreurs, qui sont limitées par une bande d'hystérésis, présentes dans les puissances active et réactive, comme illustré sur la figure III 1.[13]

La boucle de tension du bus continu est réglée avec un correcteur IP et la référence du bus continu est extraite à l'aide d'un algorithme de maximisation MPPT: P&O globale afin d'extraire la puissance maximale du générateur solaire photovoltaïque (PV). [ 13 ]

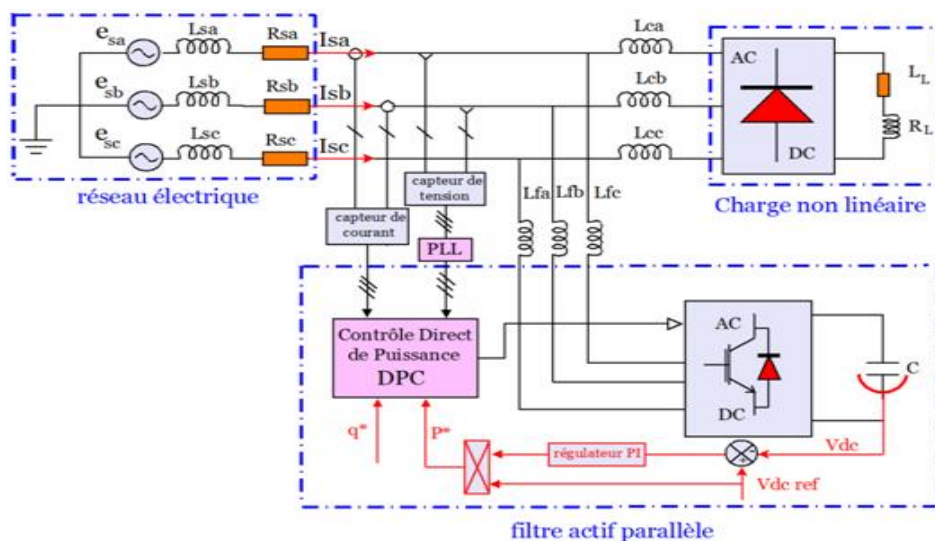


Figure III .1 : Contrôle du FAP par la commande DPC

#### III.3.1 Contrôle directe de puissance (DPC) classique avec un tableau de commutation :

- Les tensions et les courants alternatifs du réseau triphasé sont mesurés et transformés vers le référentiel stationnaire ( $\alpha\beta$ ) ;
- Les puissances active et réactive sont calculées par l'équation ( II-17) ;
- La position angulaire du vecteur de tension du réseau est estimée à l'aide d'une boucle de verrouillage de phase (PLL) .

- Les puissances active et réactive calculées ( , ) sont respectivement comparées à leurs consignes de référence ( $P_s^*$ ,  $Q_s^*$ ) afin de générer des signaux d'erreurs de puissance numérisés  $S_p$ ,  $S_q$  ;
- La sélection d'état de commutation optimal s'effectue via un tableau de commutation prédéfinie.
- Une bonne sélection de commutation nécessite un calcul précis des signaux d'erreurs de puissance numérisés et de la position angulaire de la tension du réseau. [12]

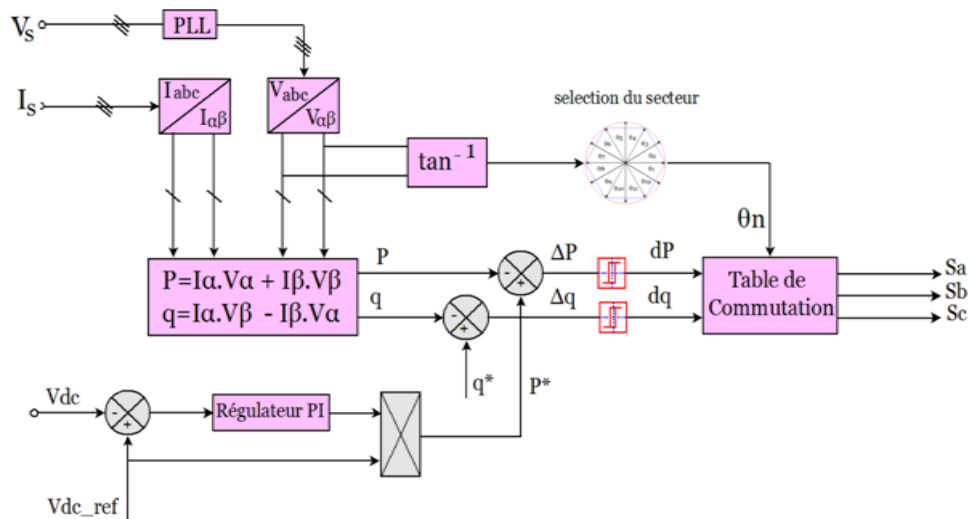


Figure III .2: Principe de la commande directe de puissance

### II.3.1.1 Signaux numérisés d'erreurs de puissance :

L'information sur les erreurs instantanées entre les puissances active et réactive et des références exigées est très importante dans le processus de sélection du vecteur de contrôle optimal, d'où on a:

$$\Delta P = P^* - P \quad (III.1)$$

$$\Delta Q = Q^* - Q \quad (III.2)$$

L'erreur de la puissance active  $\Delta P$ : est la différence entre la valeur de la puissance active désirée  $P^*$  et la valeur réelle de la puissance active  $P$ , formule (III.1).

L'erreur de la puissance réactive  $\Delta Q$ : est liée à la différence entre la valeur de puissance réactive désirée  $Q^*$  et à la valeur de puissance réactive réelle  $Q$ , formule (III.2).

Le contrôleur DPC nécessite des signaux d'erreurs de puissance: ( $S_{\Delta p}, S_{\Delta Q}$ ) sous forme numérisée, on les obtiens en utilisant deux comparateurs à hystérésis à deux niveaux.

$$S \Delta P = 1 \quad \text{si:} \quad P^* - P \geq hp \quad (\text{III.3})$$

$$S \Delta P = 0 \quad \text{si:} \quad P^* - P \leq -hp$$

$$S \Delta Q = 1 \quad \text{si:} \quad Q^* - Q \geq hq \quad (\text{III.4})$$

$$S \Delta Q = 0 \quad \text{si:} \quad Q^* - Q \leq -hq$$

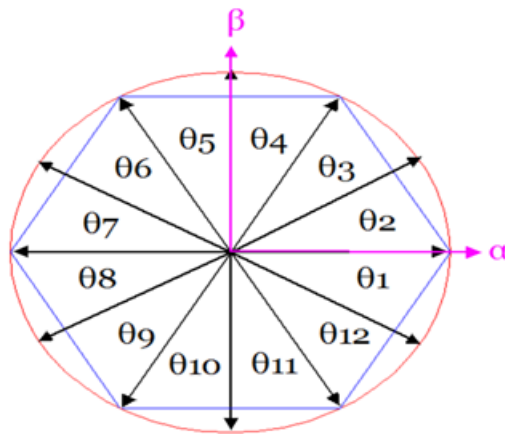
$hp, h$  : sont des bandes d'hystérésis. [12]

### III.3.1.2 La position angulaire $\theta_n$ (choix du secteur):

La phase de la vectrice tension du réseau est convertie en signal numérisé  $\theta_n$  (position angulaire). Le calcul de cette position nécessite la connaissance des composantes  $e\alpha$  et  $e\beta$ , qui peuvent être calculées à partir de la transformation des tensions du réseau du plan triphasé abc au plan stationnaire  $\alpha$ - $\beta$  :

$$\arctan \theta_n = \frac{e\alpha}{e\beta} \quad (\text{III.5})$$

Ainsi, les coordonnées stationnaires sont divisées en 12 secteurs pour optimiser les performances du FAP, comme l'indique la Figure III.3 [3]



**Figure.III.3:** Plan  $\alpha\beta$  divisé en douze secteurs pour détecter la phase du vecteur de tension

La sélection d'état de commutation optimal s'effectue via un tableau de commutation prédéfinie. Une bonne sélection de commutation nécessite un calcul précis des signaux d'erreurs de puissance numérisés et de la position angulaire de la tension du réseau.[12]

### III.3.1.3 Table de commutation :

Les signaux d'erreurs numérisées et la position angulaire sont introduits dans une table de commutation [3] ; d'ou La table de commutation est la partie primordiale dans la commande directe de puissance. Elle sélectionne le vecteur de tension approprié de l'onduleur pour permettre d'orienter les puissances active et réactive instantanées dans leur valeur désirée, en se basant aussi sur la position du vecteur de la tension de la source et des erreurs des puissances active et réactive. [13]

Le vecteur de tension à l'entrée de l'onduleur à MLI, 'v', dépend des états de commutation Sa, Sb et Sc des IGBT.

Selon les différentes combinaisons possibles de ces trois états, huit vecteurs de tension peuvent être appliqués à la sortie de l'onduleur ; deux vecteurs nuls: (v0 et v7) et six vecteurs non nuls (v1, v2, v3, v4, v5, v6). Les six vecteurs non nuls divisent le plan  $\alpha$ - $\beta$  en six secteurs dont chacun est divisé en deux secteurs égaux, afin d'obtenir un contrôle précis de 12 secteurs [13].

Dp	Dq	$\theta 1$	$\theta 2$	$\theta 3$	$\theta 4$	$\theta 5$	$\theta 6$	$\theta 7$	$\theta 8$	$\theta 9$	$\theta 10$	$\theta 11$	$\theta 12$
1	0	V6	V7	V1	V0	V2	V7	V3	V0	V4	V7	V5	V0
	1	V7	V7	V0	V0	V7	V7	V0	V0	V7	V7	V0	V0
0	0	V6	V1	V1	V2	V2	V3	V3	V4	V4	V5	V5	V6
	1	V1	V2	V2	V3	V3	V4	V4	V5	V5	V6	V6	V1

v1(100), v2(110), v3(010), v4(011), v5(001), v6(101), v0(000), v7(111).

Tableau III.1 : Table de commutation classique

### III.3.1.4. Régulation du bus continu :

La régulation de la tension du bus continu porte l'information relative à l'échange de puissance active entre le système photovoltaïque et le réseau électrique.

- Un contrôleur proportionnel intégral PI est utilisé dans la boucle de tension de régulation du bus continu pour réduire les fluctuations de la tension du condensateur et la maintenir à sa valeur souhaitée.
- La valeur de la tension du bus continu est comparée à la tension optimale du GPV élaborée par l'algorithme P&O et l'erreur est appliquée à un régulateur PI pour la maintenir à sa valeur optimale pour diverses valeurs d'irradiation et conditions de charge.

- La sortie est multipliée par la tension du bus continu effective pour générer la référence de la puissance active instantanée.
- Le système est modélisé comme un système du second ordre :

$$\frac{V_{dc}}{V_{dcref}} = \frac{K_p \cdot K_i / K}{S^2 + K_p / K \cdot S + K_p \cdot K_i / K} \quad (III.6)$$

Où :

$$K = \frac{\sqrt{2} C V_{dcref}}{3 V_s} \quad (III.7)$$

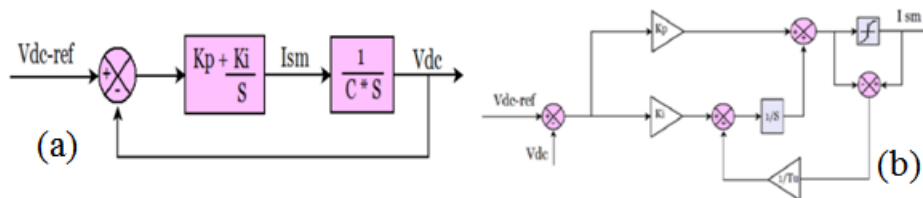
D'après l'équation (III.6), la relation entre  $V_{dc}$  et  $V_{dcref}$  se révèle être une fonction de transfert du second ordre [14] :

$$\frac{V_{dc}}{V_{dcref}} = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\varepsilon\omega_n S + \omega_n} \quad (III.8)$$

Où  $\omega_n, \varepsilon$  : sont respectivement la fréquence naturelle et le coefficient d'amortissement.

La fonction de transfert contient deux pôles et ne possède pas de zéro; cela prouve que le contrôleur PI assure une réponse rapide et une bonne stabilité pour le régime transitoire relativement au contrôleur PI. Par identification des équations : (III. 6) et (III. 8), les paramètres du contrôleur PI sont choisis comme suit:

$$K_p = 2\varepsilon\omega_n K \quad \text{et} \quad K_i = \omega_n / 2\varepsilon \quad [13]$$



**Figure.III.4** : Schéma bloc du régulateur PI:(a), avec une compensation anti-windup: (b)

### III.3.1.5. Boucle de verrouillage de phase PLL :

PLL: en anglais: phase-locked loop, est l'un des circuits plus utilisés dans la commande électronique de puissance dans les systèmes connectés au réseau, comme dans les filtres actifs de puissance. Il est utilisée dans les applications électroniques pour identifier la fréquence ou la position angulaire d'un signal périodique, pour générer un autre signal synchronisé avec le dernier. De nombreuses applications de puissance nécessitent une phase d'un signal sinusoïdal

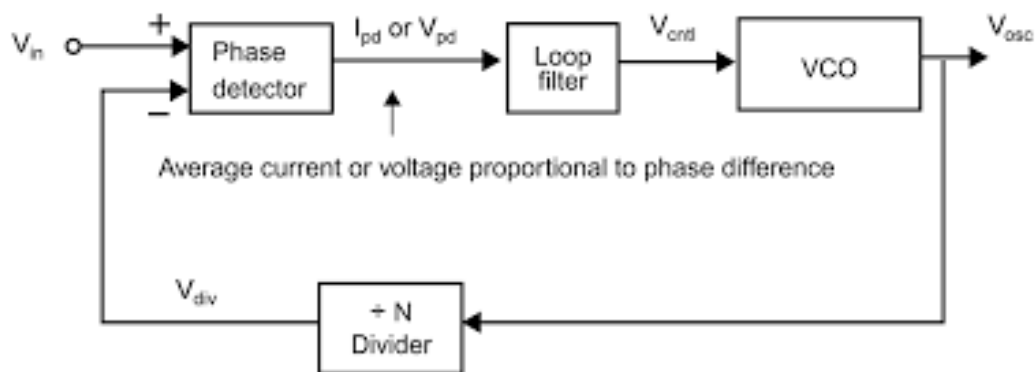
idéal verrouillé sur les tensions de fonctionnement. Puisque les tensions de service public ne sont pas toujours sinusoïdales et équilibrées. La PLL est utilisée pour extraire la composante fondamentale. [ 3 ]

### III.3.1.5.1 Structure de la P.L.L classique:

La structure minimale comprend :

- un comparateur de phase ;
- un filtre passe-bas ;
- un oscillateur commandé en tension (VCO).

La technologie des PLL peut être analogique (c'est souvent le cas pour les fréquences les plus élevées en R.F.) ou digitale (pour les fréquences moins élevées : jusqu'à 1 à 20 MHz environ selon le type de circuit intégré). Le raisonnement et les équations restent semblables avec les deux technologies.[11]



**Figure III.5** : Structure de base d'une PLL

la commande DPC avec l'ensemble des éléments constituant l'architecture proposé; d'ou des simulation sont exécuté sous l'enivrement MATLAB/SIMULINK. sont faites par la suite .

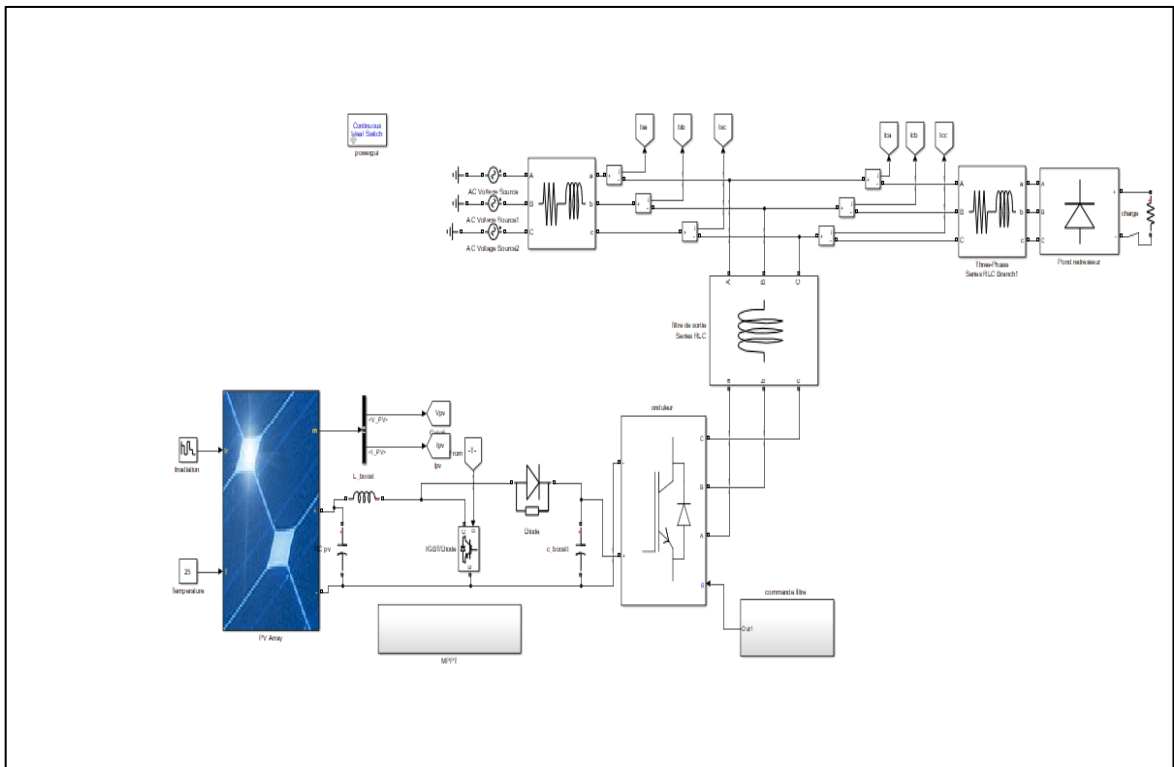
## III.4. Simulation de système global sous Matlab-Simulink :

Dans le but d'évaluer et de vérifier les performances, la validation de la stratégie de contrôle et commande DPC proposée pour la commande du filtre actif parallèle FAP

Notre système illustré dans la figure III -6 est composé de :

- une source d'énergie a une tension sinusoïdale équilibrée ;
- un filtre actif parallèle FAP ;
- une charge non linéaire ;

- un générateur photovoltaïque + Boost charge.



**Figure III.6 :** système photovoltaïque connecté au réseau interfacé avec un filtre actif parallèle

On a effectué sous Matlab/Simulink deux tests de simulation, dont simulation du système sans filtre et avec filtre (une variation d'irradiation)

L'ensemble des paramètres de simulation du système globale sont récapitulés dans le

tableau :III-2

Parties de système	Désignation	Valeur
- Source	- La tension efficace	41v
	- La fréquence	50 HZ
	- La résistance interne	0.3 $\Omega$
	- L'inductance interne	1-10 <sup>-3</sup> H
- Charge non linéaire	- une charge R alimenté via un Pont Redresseur triphasé alimentant	20 $\Omega$
	- Impédance de filtrage a l'entrée du pont  La résistance R L'inductance L	0.3 $\Omega$  1-10 <sup>-3</sup> H
- Filtre actif parallèle FAP	- Inductance de couplage Lf	0.0043H
	- Tension de Référence Vdc	148 v
- Générateur photovoltaïque + Boost charge	- Type de module	1Soltech 1 STH 215-P
	- Nombre de cellules en série (NS)	5
	- Nombre de cellules en parallèle (NP)	3
	- Condensateur sortie GPV	0.01 F
	- Inductance entrée boost charge L boost	1.90 10 <sup>-5</sup> H
	- Capacite de sortie boost charge C boost	0.0034 F

Tableau III.2 : les paramètres de simulation

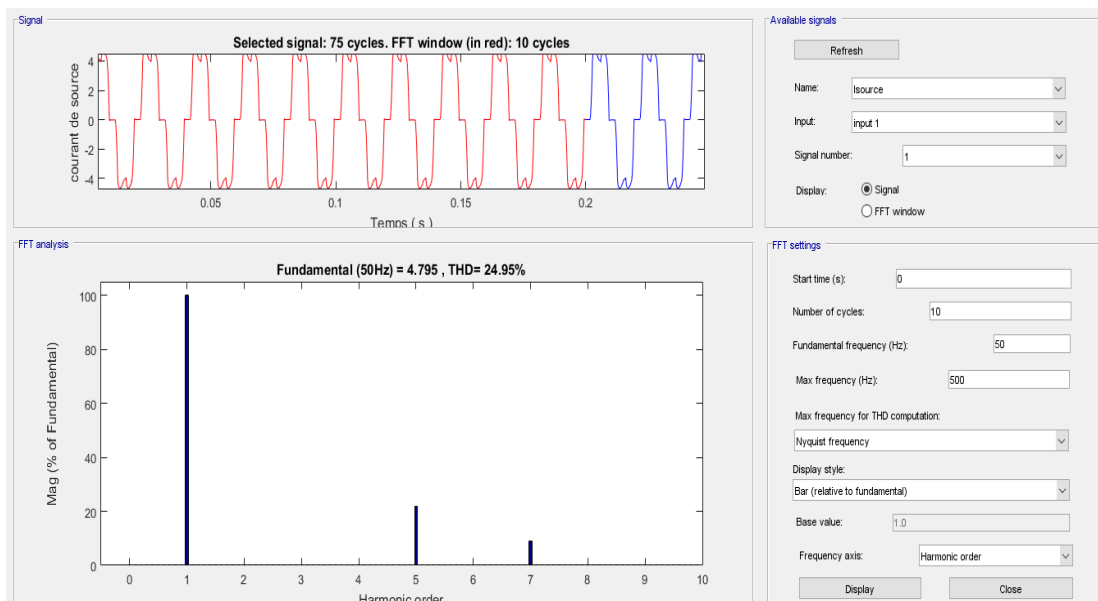
### III.4.1 Simulation de l'ensemble du système sans filtre

Nous avons effectué la simulation de l'ensemble du système sans filtre dans le but d'évaluer la qualité d'énergie (courant).

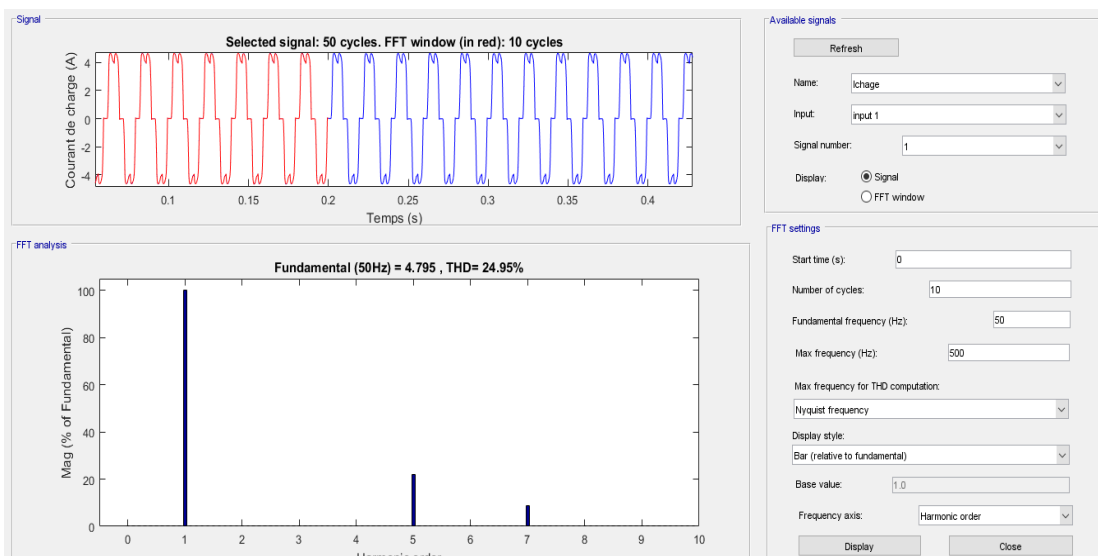
Suite aux résultats obtenus illustrés dans la figure III-7, nous avons constaté ce qui suit :

- Les courants de charge et de source ont la même amplitude avec un THD = 24.95 > 5 %. Voir la figure (a) et (b).
- La tension et le courant de source sont en déphasage comme le montre la figure (c).

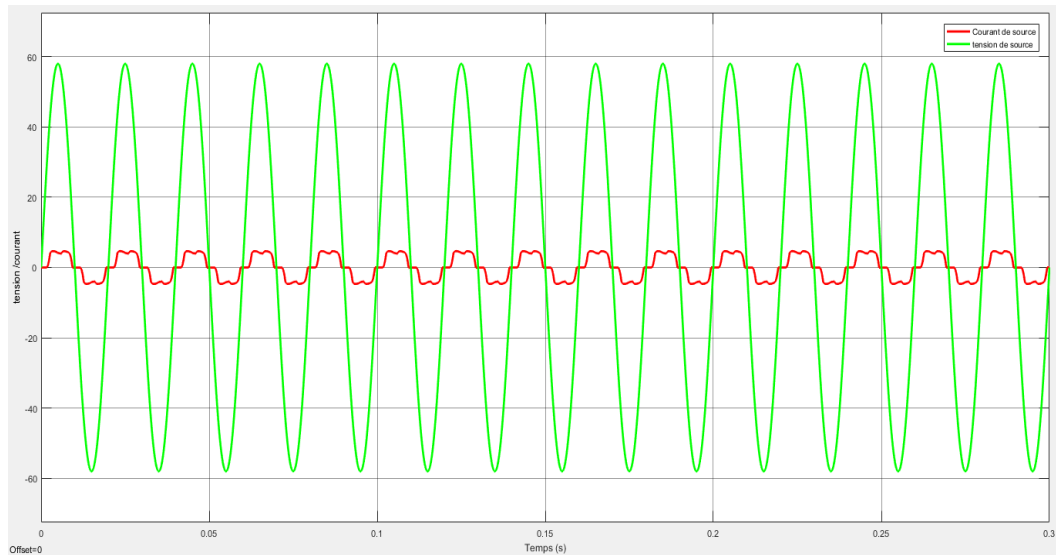
Donc, on peut conclure qu'on a une mauvaise qualité de l'énergie électrique et que notre système électrique est pollué et il est recommandé de le dépolluer .



(a) Formes d'ondes et spectre d'harmonique du courant de source



(b) Formes d'ondes et spectre d'harmoniques du courant de charge



(c) Formes d'ondes de la tension et courant de source

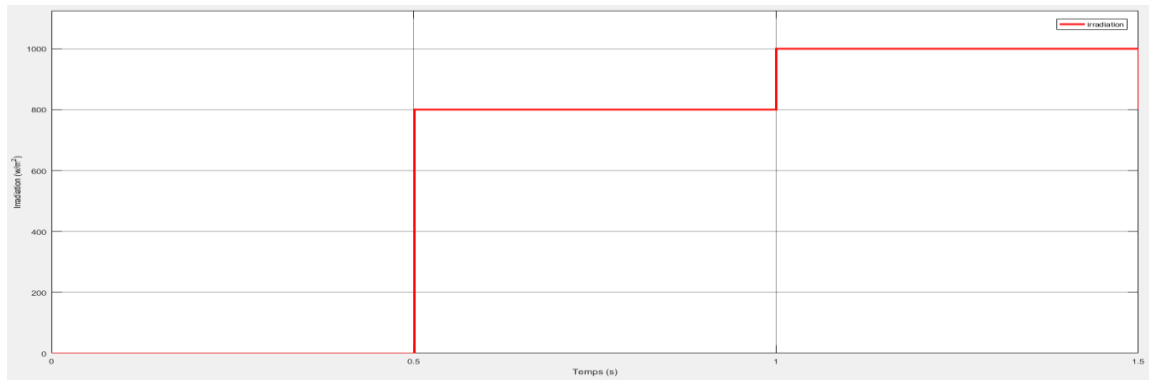
**Figure III.7 :** (a),(b),(c) : Résultats de simulation avant la mise en service de FAP

### III.4.2 Simulation de l'ensemble du système avec l'irradiation solaire variable

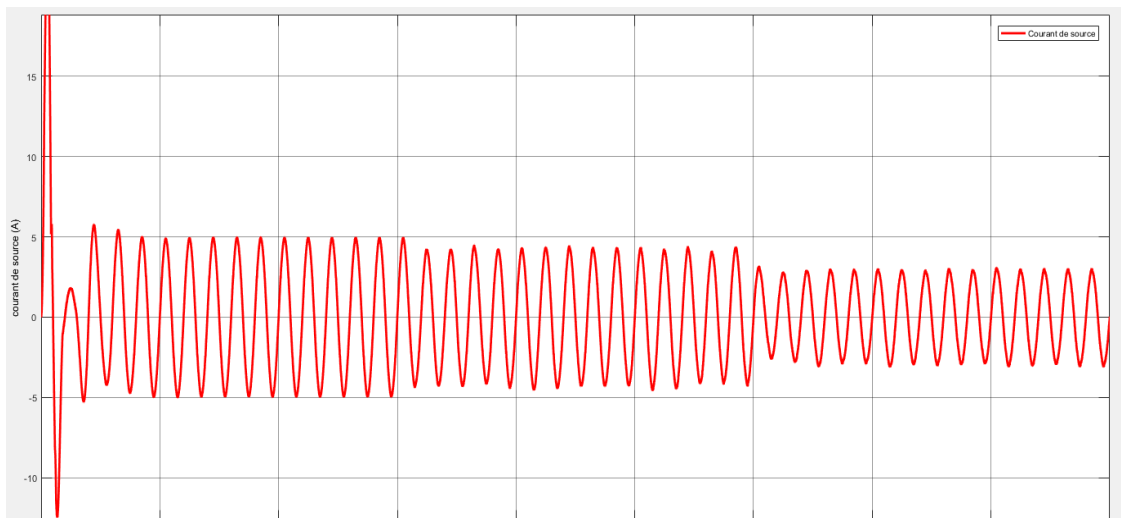
Pour étudier le comportement dynamique et la robustesse de la commande de l'ensemble de notre système lors d'une variation de l'ensoleillement nous avons effectué une variation de profil d'irradiation répartie sur trois intervalles de temps de 0.3 s, par l'application respectivement des valeurs de l'irradiation de 0, 800 et 1000 W/m<sup>2</sup> figure III-8 (a) avec une température constante de 25 °C.

Suite aux résultats illustrés dans la figure III-9 nous avons constaté ce qui suit :

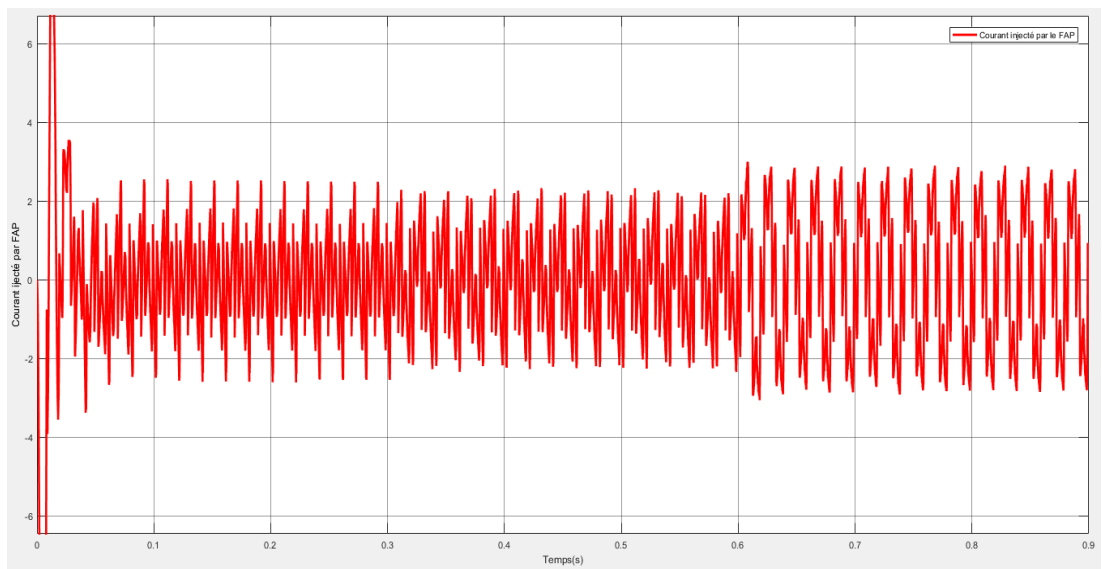
- Aucune modification enregistré sur le courant de charge durant toute la variation de profil d'irradiation, comme le montre la figure (d) .
- le courant de source augmente lorsque l'irradiation solaire est diminuée contrairement au courant injecté par le filtre actif, voir la figure (b) et (c).
- Le courant de source reste sinusoïdal et équilibré durant toutes les variations de profil d'irradiation solaire, ceci est prouvé par la bonne qualité de l'énergie, pour une irradiation maximal 1000 W/m<sup>2</sup> avec un THD =2.67 >5% , voir la figure (e)
- Une diminution de la puissance active du réseau et cette dernière suit parfaitement la puissance de référence et la puissance réactive de réseau reste toujours au voisinage de sa référence (zéro) avec un FP varie entre 1 et 0.97 .comme le montre les figures (g) et (h).
- La tension continue Vdc de bus continu est maintenue constante et elle suit parfaitement sa valeur de référence durant toutes les variations de l'irradiation, voir la figure (f).



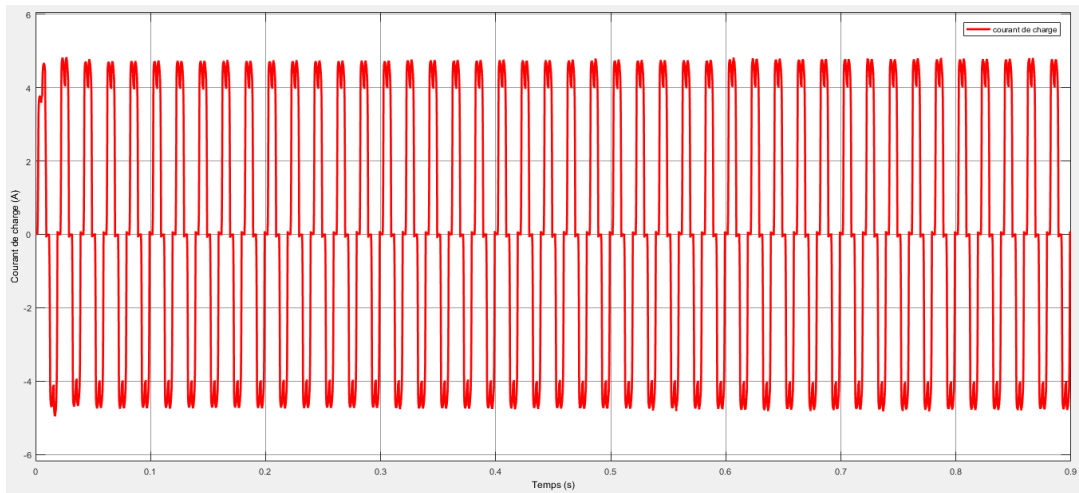
(a) Variation d'irradiation



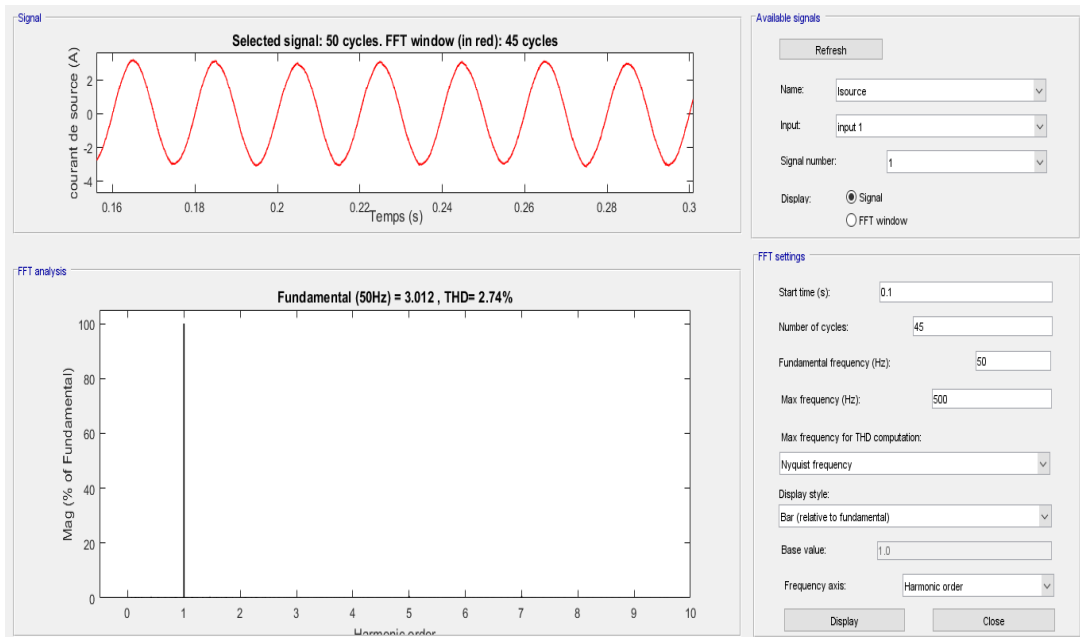
(b) Courant de source



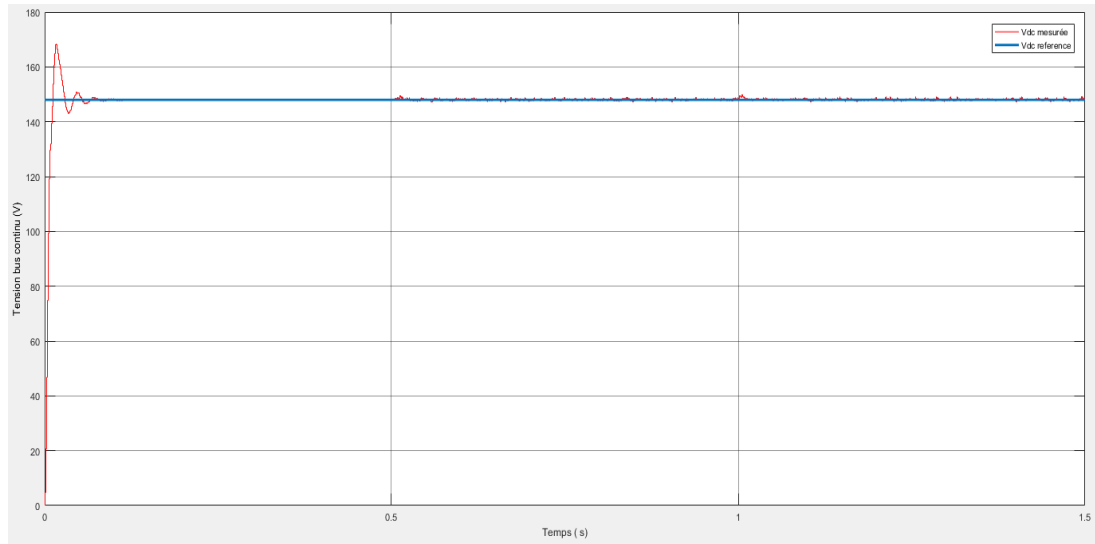
(c) Courant injecté par le FAP



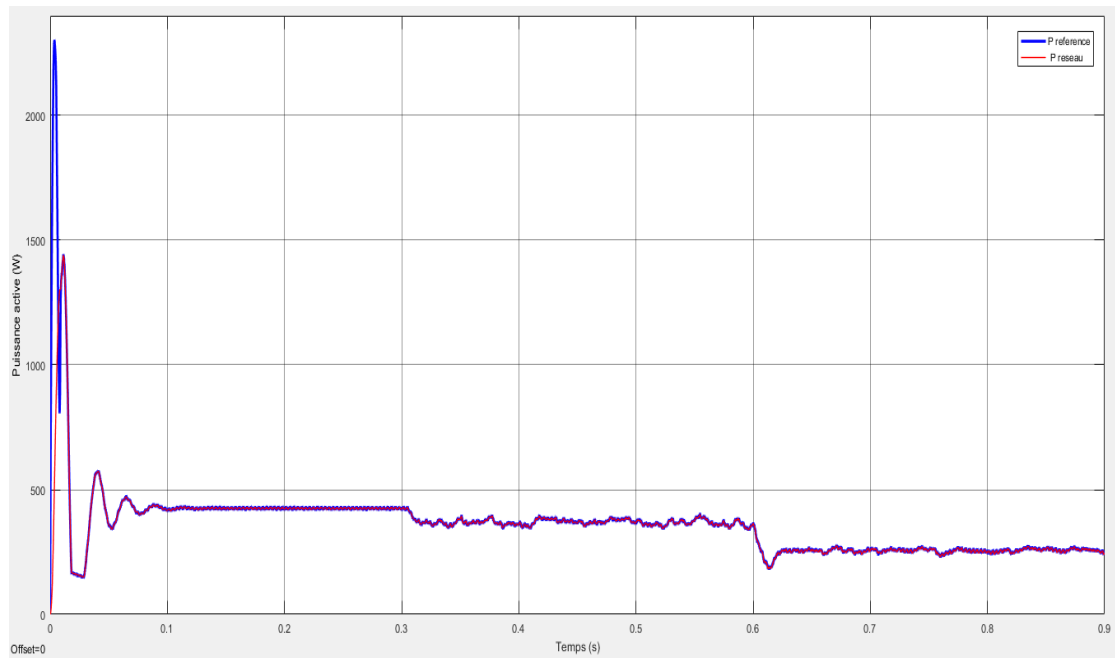
(d) Courant de charge



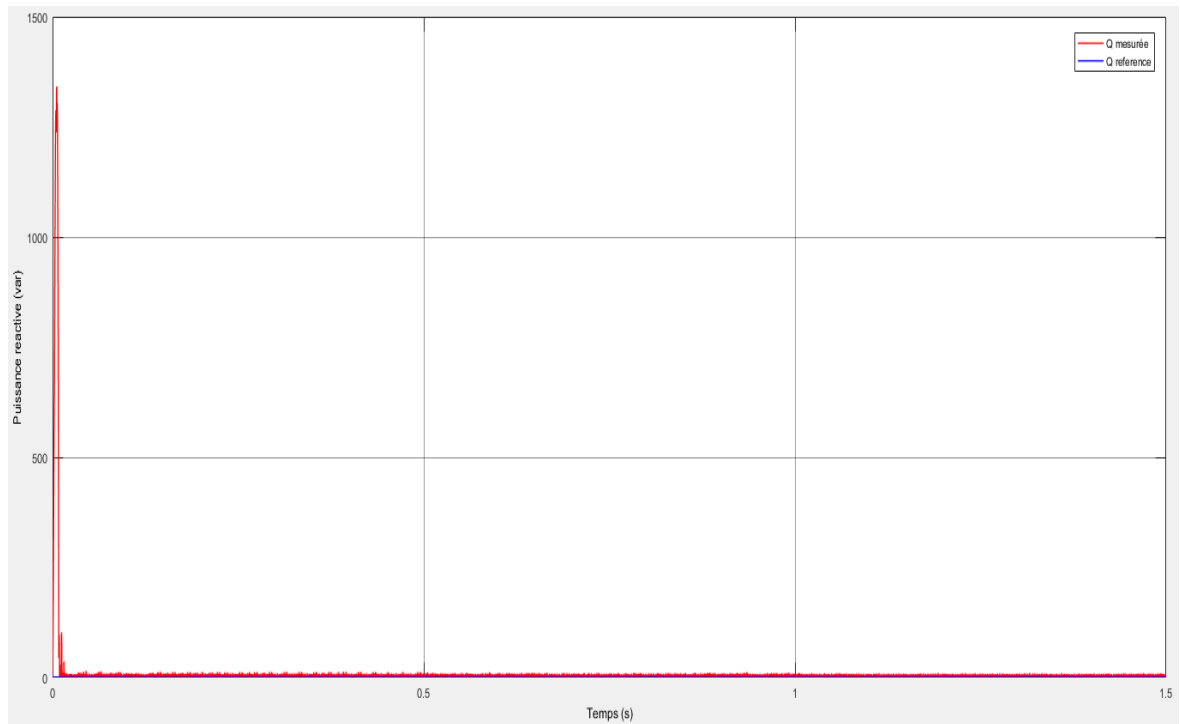
(e) Courant de source, Irradiation, 1000 W/m<sup>2</sup>



(f) Tension bus continu & référence



(g) Puissance active



(h) Puissance réactive

**Figure III.8 :** (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) et (h) : Résultats de simulation de l'ensemble du système dans le cas de variation de profil d'irradiation.

### III-5 Conclusion :

Ce chapitre a consacré une grande partie à la commande directe de puissance DPC à base d'une table de commutation bien définie pour la commande de filtre actif parallèle. En premier lieu, on a commencé par un état de l'art de la commande DPC appliquées spécialement aux convertisseurs ainsi aux filtres actifs parallèles. Par la suite on a exposé le principe de la commande DPC.

Des simulations de la structure proposée ont été réalisées et les résultats obtenus ont été analysés et commentés. A partir de ces résultats nous avons conclu que la méthode de contrôle du filtre actif parallèle associé à un générateur photovoltaïque PV a prouvé son efficacité et sa robustesse, comme preuves : la compensation des courants des harmoniques et la puissance réactive tel que :  $PF > 0.97$ ; ainsi l'injection de la puissance active dans le réseau.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Nous avons présenté dans notre travail l'étude d'un système de compensation d'harmoniques composé d'un filtre actif parallèle associé à un générateur Photovoltaïque GPV . Cette configuration est basé sur la combinaison entre la source d'énergie renouvelable et particulièrement l'énergie photovoltaïque avec le réseau électrique de distribution par l'interface d'un filtre actif parallèle commandé par la commande directe de puissance(DPC),le tous afin de bénéficier des avantages des deux systèmes et par conséquent assurer en simultanément l'injection de la puissance active générée par GPV dans le réseau et améliorer la qualité de l'énergie au point de raccordement.

Dans Le premier chapitre nous avons exposé d'une manière sommaire la problématique des perturbations dans les réseaux électriques qui affectent la qualité de l'énergie électrique QEE et en particulier les perturbations harmoniques générées par les charges non linéaires, Leurs origines, effets et les différentes solutions adoptées pour pallier aux problèmes liés à ces perturbations.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la topologie du filtre actif parallèle, le générateur photovoltaïque GPV et ces caractéristiques et convertisseur d'adaptation DC-DC. Une grande partie de ce chapitre a été consacré à la commande comme la méthode « pq classique » d'extraction du courant harmoniques, la commande de l'onduleur et la méthode MPPT( P&O) pour le suivi de la puissance maximale de GPV.

Dans le troisième chapitre nous avons décrire la commande DPC proposée dans notre travail ensuite nous avons simuler notre système , on a commencé par la simulation de notre système sans filtre actif afin d'évaluer la qualité de l'énergie électrique, qui a été pollué avec un THD de 25 % par la suite pour remédier à ce problème nous avons insérer le filtre dans le système dans des condition météorologiques (variation irradiation ) , les résultats obtenus sont satisfaisante par rapport aux conditions appliquées.

Enfin, le filtrage actif de l'énergie électrique provenant d'une source photovoltaïque est l'une des meilleures solutions pour la compensation des harmoniques de courant des réseaux électriques.

## Références Bibliographiques

- [1] OMEIRI AMAR 'Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant' diplôme de DOCTORAT D'ETAT ; UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA ANNEE 2007.
- [2] Mohamad Alaa Eddine Alali" Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension " thèse de doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 12 Septembre 2002
- [3] Thèse de Doctorat LMD en : Génie Electrique Spécialité (Option) : Commande des Systèmes Energétiques Intitulé Contribution à la Commande Directe de Puissance Dédiée au Filtrage Actif, Associé à une Source Photovoltaïque Présentée par : Sabir OUCHEN Université Mohamed Khider – Biskra Faculté des Sciences et de la technologie Département : Génie électrique.
- [4] Mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique par Mohamed Ghebbache" stratégies de commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique dans le but d'optimiser la qualité de l'énergie. juillet 2019 université du Québec à Montréal.
- [5] Thèse sur filtrage d'harmoniques dans un réseau mixte photovoltaïque-électrique par estimation adaptative coupe-bande rapport de projet présenté comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique par ait Oufkir Badr-Eddine décembre 2017 université du Québec à Montréal.
- [6] Cours Energie Solaire Photovoltaïque, département de Génie Electrique Dr. BELAID LALOUNI Sofia Maître de Conférences Classe B Université A.MIRA de BEJAIA Faculté de Technologie .Année universitaire 2014/2015 .
- [7] Mémoire en vue de l'obtention du titre de Magister en génie électrique sur le Thème : Etude d'un système de compensation d'harmoniques en utilisant un générateur photovoltaïque GPV. Université M'Hamed Bougara, Boumerdes 2008.Présenté par Mr:Tadjer SID AHMED.
- [8] Mémoire de Master No. Réf. : MAS/09/2015 Présenté au Département de d'électrotechnique Domaine : SCIENCES et Technologie Filière : Automatique Spécialité : Sûreté de Fonctionnement des Processus Industriels Réalisé par : M. AYAT Yahia Thème Système photovoltaïque alimentant un filtre actif de puissance connecté au réseau .
- [9] Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2006 présenté par: Laid Zellouma « filtrage actif parallèle des harmoniques du courant génères par un pont redresseur triphasé non commande » .
- [10] Rapport de projet présenté comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique par ait Oufkir Badr-Eddine décembre 2017 université du Québec à Montréal filtrage d'harmoniques dans un réseau mixte photovoltaïque-électrique par estimation adaptative coupe-bande.

- [11] <http://www.cours-facchetti.online.fr/bouclepll.htm>, le 27/05/2021 à 17:30 .
- [12] Thèse Pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT DE 3eme CYCLE EN ELECTROTECHNIQUE OPTION : Gestion et Transformation de l'Energie Electrique Présentée par : MEDOUCE Houssam Eddine Thème Analyse des performances des convertisseurs statiques commandés par le contrôle direct de puissance (DPC) : cas d'une centrale éolienne connectée au réseau électrique Soutenue le : 03/07/ 2018 A L' UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1.
- [13] SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2016) : EF-EPF-MGE 2016, 7-9 JUIN 2016, GRENOBLE, FRANCE. Générateur photovoltaïque avec une commande directe de puissance connecté et avec adjonction de services au réseau de distribution.
- [14] Symposium de Génie Électrique, Cachan, 2014. B. Boukezata, A. Chaoui, J.P. Gaubert, et M.Hachemi : "Système solaire photovoltaïque connecté au réseau électrique et associé à un filtre actif parallèle".
- [15] Djaffar Ould Abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension," Thèse Doctorat, Université haut alsace, 2005.
- [16] Steeve Beaulieu, "Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmonique en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique," Mémoire de Fin d'Etudes, Université Québec à Chicoutimi, Mai 2007.
- [17] CHAOUI ABDELMADJID « Filtrage Actif Triphasé Pour Charge Non Linéaires » Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Université De Ferhat ABBAS De Sétif, Algérie, Octobre 2010.
- [18] H. Akagi, A. Nabae, S. Athoh, "Control Strategy of active power filters using multiple Voltage- source PWM converters ", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA-22, no. 3, pp. 460-465, May/Jun. 1986.
- [19] Sahli Abdeslem ." Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau", mémoire de MAGISTER 2012 , Université de Sétif. M.
- [20] Sarra, "Contribution à l'étude des filtres actifs hybrides," Thèse de doctorat, Université de Ferhat Abbas, Sétif 1, 2012.
- [21] T. Ohnishi, "Three phase PWM converter/inverter by means of instantaneous active and reactive power control ", Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Kobe, Japan, Nov.1991, vol. 1, pp. 819-8241.
- [22] MD.Epanya."Application du filtrage Actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique ";Mémoire comme exigences partielle de la maîtrise en génie -électrique" Thèse de Doctorat ; Université de Québec-2010.
- [23] NEKKAR DJAMEL "Contribution à l'étude des stratégies de commandes des filtres actifs triphasés ";mémoire de Magister, université Mohamed Chérif Messaadia . Souk Ahras.2014.

- [24] A. Bouafia : "Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI", Thèse de doctorat de l'Université de Sétif, Algérie, (2010).
- [25] F. Bouchtouche cherfa "Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT ". Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique El-Harrach, 2004.
- [26] D. Lalili, "MLI vectorielle et commande non linéaire du bus continu des onduleurs multiniveaux : application à la conduite de la machine asynchrone", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique ENSP Alger, Avril 2009.
- [27] François Defaÿ " commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif". L'institut national polytechnique de Toulouse, décembre 2008.
- [28] H. Buhler, "Convertisseurs statiques", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne ,1991. [DJE07] H. Djeghloud, "Filtrage actif de puissance", Thèse de Doctorat
- [29] UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER EN GENIE ELECTRIQUE OPTION : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES(CSE) THEME Commande et diagnostic d'un filtre actif parallèle
- [30] H. Kouara, "Contribution au contrôle d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils dans un milieu perturbé," Thèse de Doctorat en Électrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2015. "
- [31] G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue, « Statistical analysis of voltage dips », Notes EDF, 96NR00 102, 1995.
- [32] FRANÇOIS DEFAÿ " Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour Une application de filtrage actif " Thèse de doctorat 2008 université de Toulouse.
- [33] IEEE Recommended Practice and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power systems. IEEE Std. 519-1996.
- [34] B. Singh, V. Verma, A. Chandra et K. Al-Haddad, « Hybrid filters for power quality improvement », Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, vol. 152, no 3, pp. 365– 378, 6 May 2005.
- [35] Ghadbane Ismail ." Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs ", mémoire de MAGISTER 2011, Université de Mohamed Kheider Biskra.