

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : M...../GE/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour obtenir le diplôme de MASTER ACADEMIQUE

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique

Présenté par :

Mr. MAGHMOUL ANIS

M^{elle}. SEFIANE ASSIL

THEME :

**L'UTILISATION DE FILTRE ACTIF PARALLELE POUR L'INTERCONNEXION
DES PILES A COMBUSTIBLE AU RESEAU ELECTRIQUE**

Soutenu le 06 / 07 / 2022 devant le jury composé de :

Président :	Mr. BOUKORTT Abdelkader	Pr	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr. BENYAMINA Mansour	MCA	Université de Mostaganem
Encadreur :	Mr. BEKKOUCHE Benaissa	Pr	Université de Mostaganem
Co-encadreur :	Mr. DEHINI Rachid	Pr	Université de Béchar

Année Universitaire 2021/2022

REMERCIEMENTS

Nous remercions avant tout ALLAH tout puissant de nous avoir donné et la volonté d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement Monsieur : Pr. B. BEKKOUCHE, parce qu'il nous a accompagnés tout au long de la période de réalisation de ce travail et qui a coopéré avec nous et ne nous a pas épargné ses conseils et ses connaissances dont nous avons grandement bénéficié.

Nous remercions également Monsieur : Pr. R. DEHINI pour son soutien et ses conseils pendant la période d'achèvement.

Nous offrons une salutation de remerciements tous les membres du jury qui ont accepté de juger nos travaux.

Nous sommes très reconnaissant les professeurs d'université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Surtout les professeurs de la faculté des Sciences et de la Technologie pour leur bnfefice à nous.

Enfin, Nous exprimons toute nos gratitude à nos familles et amis et tous ceux qui ont contribué avec nous à mener à bien ce travail de près ou de loin.

RESUME DE MEMOIRE

La croissance continue de la demande d'énergie électrique a guidée les chercheurs de développer et améliorer les nouvelles sources des énergies renouvelables. Telles que les piles à combustible, en raison de leur densité énergétique élevée et de leur respect à l'environnement, elles sont été considérées comme une source pure d'énergie électrique.

Dans ce mémoire, l'objectif principal est d'alimenter des charges non-linéaires variables avec de l'énergie provenant d'une source hybride (piles à combustible + fossile) ainsi que de compenser les courants harmoniques à l'aide d'un filtre de puissance actif parallèle (FAP).

Afin d'obtenir des fonctions multiples telles que l'atténuation des harmoniques, le contrôle de la puissance réactive et active des piles à combustible, ce travail utilise la théorie des puissances instantanées p-q comme système de contrôle (commande). Le système est constitué des piles à combustible, connectées au réseau électrique à travers d'un (FAP), ce système est simulé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Les résultats de la simulation doivent prouver l'efficacité de cette méthode pour l'injection d'énergie des piles à combustible ainsi que l'amélioration de la qualité d'énergie électrique.

ملخص المذكرة

أدى النمو المستمر في الطلب على الطاقة الكهربائية إلى إرشاد الباحثين لتطوير وتحسين مصادر جديدة للطاقة المتجددة. مثل خلايا الوقود، نظرًا لكثافة طاقتها العالية وملاءمتها للبيئة، فقد تم اعتبارها مصدرًا نقيًا للطاقة الكهربائية.

الهدف الرئيسي في هذه المذكرة هو تزويد الأحمال غير الخطية المتغيرة بالطاقة من مصدر هجين (خلايا الوقود + الأحفوري) وكذلك للتعويض عن التيارات التوافقية باستخدام مرشح طاقة نشط متوازي (FAP).

من أجل تحقيق وظائف متعددة مثل التخفيف التوافقي والتحكم التفاعلي والفعال في خلايا الوقود، يستخدم هذا العمل نظرية القدرة اللحظية p-q كنظام التحكم (الأمر). يتكون النظام من خلايا وقود متصلة بالشبكة الكهربائية من خلال (FAP)، ويتم محاكاة هذا النظام في بيئة MATLAB / SIMULINK.

يجب أن تثبت نتائج المحاكاة فعالية هذه الطريقة في حقن الطاقة من خلايا الوقود وكذلك تحسين جودة الطاقة الكهربائية.

ABSTRACT

The continuous growth in the demand for electrical energy has guided researchers to develop and improve new sources of renewable energy. Like fuel cells, due to their high energy density and environmental friendliness, they have been considered a pure source of electrical energy.

In this note, the main objective is to supply variable non-linear loads with energy from a hybrid source (fuel cells + fossil) as well as to compensate for harmonic currents using a parallel active power filter (FAP).

In order to achieve multiple functions such as harmonic mitigation, reactive and active power control of fuel cells, this work uses p-q instantaneous power theory as the control (command) system. The system consists of fuel cells, connected to the electrical network through a (FAP), this system is simulated in the MATLAB / SIMULINK environment.

The results of the simulation must prove the effectiveness of this method for the injection of energy from fuel cells as well as the improvement of the quality of electrical energy.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la pile à combustible	
I.1 Introduction	4
I.2 Principes de fonctionnement.....	4
I.3 Types de piles à combustible.....	5
I.3.1 Pile à combustible de type PEMFC (Pile à combustible à membrane échangeuse de protons).....	6
I.3.2 Principe de fonctionnement de la pile PEMFC	7
I.4 Construction de pile à combustible de type PEMFC	8
I.4.1 Assemblage membrane-électrodes	8
I.4.1.1 Electrodes	9
I.4.1.2 Electrolyte	9
I.4.1.3 Plaque bipolaire.....	10
I.4.2 Humidificateur	10
I.5 Système pile à combustible	10
I.5.1 Configuration système.....	11
I.5.2 Reformeur	11
I.5.3 Gestion de l'air.....	11
I.5.4 Gestion de l'eau.....	12
I.5.5 Gestion thermique	12
I.6 Les avantages et les inconvénients des PEMFC	12
I.7 Activité commerciale	13
I.8 Conclusion.....	14
Chapitre II : Perturbations des réseaux électriques et leurs compensations	
II.1 Introduction	16
II.2 Qualité de l'énergie.....	16
II.3 Perturbations harmoniques des réseaux	16
II.3.1 Définition	16
II.3.2 Sources des harmoniques	17
II.3.3 Théorie de base	17
II.3.4 Caractérisation des perturbations harmoniques	18
II.3.4.1 Taux de distorsion harmonique (THD)	18
II.3.4.2 Le facteur de puissance (FP)	19
II.3.5 Les effets de la pollution harmonique.....	20
II.3.5.1 Conséquences techniques	20
II.3.5.1.1 Effets instantanés	20
II.3.5.1.2 Effets à long terme	21
II.3.5.2 Conséquences économiques.....	21

II.4 Les normes internationales	21
II.4.1 CEI 61000	21
II.4.2 IEEE sdt 519-1992	23
II.5 Fluctuations de la fréquence	24
II.6 Fluctuations de la valeur efficace	25
II.7 Variations de l'amplitude de la tension	25
II.7.1 Creux et coupures de tension	25
II.7.1.1 Origines des creux de tension	26
II.7.1.2 Effets et conséquences des creux de tension	26
II.7.2 Les surtensions	26
II.7.2.1 Classification des surtensions	27
II.7.2.2 Conséquences et effets de la surtension	27
II.7.3 Déséquilibre du courant et de tension	27
II.8 Solutions de dépollution des réseaux électriques	28
II.8.1 Les solutions traditionnelles de dépollution	28
II.8.1.1 Dépollution des courants perturbateurs	28
II.8.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices	30
II.8.2 Les Solutions modernes de dépollution	30
II.8.2.1 Dépollution des courants perturbateurs	30
II.8.2.2 Dépollution des tensions perturbatrices	31
II.8.2.3 Les filtres de puissances	31
II.8.2.3.1 Filtre actif parallèle (FAP)	31
II.8.2.3.2 Filtre actif série (FAS)	32
II.8.2.3.3 Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle (FAPH)	32
II.8.2.3.4 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	32
II.9 Conclusion	33
Chapitre III : Filtre Actif Parallèle (FAP)	
III.1 Introduction	35
III.2 Principe de fonctionnement du FAP	35
III.2.1 Mode de fonctionnement	35
III.2.1.1 Filtre dédié	35
III.2.1.2 Filtre adaptatif	36
III.3 Structure générale du filtre actif parallèle	36
III.4 Etude de la partie puissance	37
III.4.1 Onduleur de tension	37
III.4.2 Elément de stockage d'énergie	37
III.4.3 Filtre de sortie	38
III.4.3.1 Filtre du Premier ordre	39
III.4.3.2 Filtre du troisième ordre	39
III.5 Etude de la partie contrôle-commande	40
III.5.1 Les méthodes d'identification des courants perturbés	40

III.5.1.1 Généralités sur les méthodes d'identification	40
III.5.1.2 La Méthode des puissances instantanées p-q	41
III.5.1.2.1 Généralités sur les puissances instantanées	41
III.5.1.2.2 Séparation des puissances perturbatrices	43
III.5.1.2.3 Calcul des courants perturbateurs	43
III.5.2 Régulation de la tension continue	44
III.5.3 La commande de l'onduleur	46
III.5.3.1 Commande par hystérésis	46
III.5.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion	47
III.5.4 La régulation du courant du filtre actif parallèle	47
III.6 Points d'insertion du filtre actif parallèle	49
III.7 Conclusion	49
Chapitre IV : Simulation et discussions des résultats	
IV.1 Introduction	51
IV.2 Génération de courants de référence	51
IV.3 Résultats de la simulation et discussion	53
IV.4 Conclusion	62
Conclusion générale	64
Liste de bibliographie	65

LISTE DES FIGURES

- Fig.1.1** : William Robert Grove
Fig.1.2 : Première pile à combustible à hydrogène
Fig.1.3 : Fonctionnement de principe d'une pile à combustible
Fig.1.4 : Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou alcalin (en bas)
Fig.1.5 : Pile à combustible du type PEMFC
Fig.1.6 : Principe de fonctionnement d'une pile PEMFC
Fig.1.7 : Assemblage membrane-électrodes de sept couches de la compagnie 3M
Fig.1.8 : Membrane DuPont.
Fig.1.9 : Plaques bipolaire de pile PEM.
Fig.1.10 : Différents constituants d'un système pile à combustible
Fig.1.11 : Diagramme de Ragone
Fig.1.12 : Pile à combustible 75 kW UTC pour des voitures et des autobus.
Fig.1.13 : Système de pile à combustible du type PEMFC 10 kW par ZSW
Fig.II.1 : Représentation de deux signaux fondamentaux et d'ordre 3
Fig.II.2 : (a) Onde distordue. (b) : Composantes continues et harmoniques
Fig.II.3 : Diagramme de Fresnel des puissances
Fig.II.4 : Fluctuation de la valeur efficace
Fig.II.5 : Creux de tension
Fig.II.6 : Coupure de tension
Fig.II.7 : Déséquilibre du système triphasé de tension
Fig.II.8 : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage
Fig.II.9 : Filtre passif résonnant
Fig.II.10 : Filtre passif amorti
Fig.II.11 : Pont redresseur à 12 branches
Fig.II.12 : Pont dodécaphasé
Fig.II.13 : ASI fonctionnant en double conversion
Fig.II.14 : Filtre actif parallèle
Fig.II.15 : Filtre actif série
Fig.II.16 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle
Fig.II.17 : Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC)
Fig.III.1 : Filtre actif parallèle avec une charge non-linéaire
Fig.III.2 : Structure générale du filtre actif parallèle
Fig.III.3 : Onduleur de tension triphasé
Fig.III.4 : Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre en T
Fig.III.5 : Deux types de filtrage de p et q
Fig.III.6 : Algorithme p-q d'identification des courants de référence
Fig.III.7 : Echange de puissance entre le réseau, la charge et le filtre
Fig.III.8 : Boucle de régulation de la tension continue
Fig.III.9 : Principe de contrôle du courant par hystérésis
Fig.III.10 : Principe de commande des courants par MLI
Fig.III.11 : Schéma de la régulation des courants du FAP
Fig.III.12 : Schéma simplifié de régulation des courants du FAP
Fig.IV.1 : Schéma fonctionnel des puissances active et réactive instantanées
Fig.IV.2 : Structure générale du filtre active parallèle avec PEMFC
Fig.IV.3 : (a) Tension de la pile par rapport au courant, (b) Puissance de la pile par rapport au courant
Fig.IV.4 : Courant de la charge non linéaire phase (a)

Fig.IV.5 : Spectres harmoniques de courant de charge phase (a), Signal sélectionné : 110 cycles. Fenêtre FFT : 10 cycles

Fig.IV.6 : Tension de la source phase (a) sans Filtre active

Fig.IV.7 : Spectres harmoniques de tension de source phase (a) sans Filtre active, Signal sélectionné : 110 cycles. Fenêtre FFT : 10 cycles

Fig.IV.8 : Courant injecté par le filtre active phase (a)

Fig.IV.9 : Spectres harmoniques de courant injecté phase (a), Signal sélectionné : 110 cycles. Fenêtre FFT : 10 cycles, magnitude (% par rapport au courant de charge fondamental).

Fig.IV.10 : Courant de la source phase (a)

Fig.IV.11 : Spectres harmoniques de courant de source phase (a), Signal sélectionné : 110 cycles. Fenêtre FFT : 10 cycles

Fig.IV.12 : Tension de la source phase (a) avec Filtre active

Fig.IV.13 : Spectres harmoniques de tension de source phase (a) avec Filtre active, Signal sélectionné : 110 cycles. Fenêtre FFT : 10 cycles

Fig.IV.14 : Flux de puissance active mutuelle entre les composants du système

Fig.IV.15 : Flux de puissance réactive mutuelle entre les composants du système

Fig.IV.16 : La variation du facteur de puissance

Fig.IV.17 : Tension du circuit intermédiaire

LISTE DES TABLEAUX

Tab.I.1 : Différents types de pile à combustible

Tab.II.1 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension (CEI 61000-2-2)

Tab.II.2 : Limites des composantes harmoniques du courant (CEI 61000 3-2)

Tab.II.3 : Limites d'émission des courants harmoniques Pour l'étape I (CEI 61000-3-4)

Tab.II.4 : La norme IEEE sdt 519-1992 pour les tensions de 120V à 69kV

Tab.II.5 : Les limites de la distorsion harmonique de la tension (IEEE sdt 519-1992)

Tab.II.6 : Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles

Tab.II.7 : Les quatre types de surtensions présentes sur les réseaux électriques

Tab.IV.1 : Paramètres du système

Tab.IV.2 : Les valeurs des puissances mutuelles entre les composants du système

LISTE DES ABREVIATIONS

AFC : Les piles à électrolyte alcalin.

CEI : Commission Electrotechnique Internationale.

E/S : Entrée/Sortie.

FAP : Filtre Actif Parallèle.

FAS : Filtre Actif Série.

Fdép : Facteur de Déplacement.

FP : Facteur de puissance.

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IGBT : Insulated-gate bipolar transistor.

ISO : International Standard Organisation.

MCFC : Les piles à carbonate fondu.

MOSFETs : Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

NASA : the National Aeronautics and Space Administration.

PAC : Pile à combustible.

PAFC : Les piles à acide phosphorique.

PAPF : Partial Active Power Filtre.

PEMFC : Pile à Membrane Echangeuse de Protons.

PID : Régulateur : Proportionnelle Intégral, Dérivation.

P Q r : puissances instantanées dans le référentiel.

SOFC : Les piles à oxyde solide.

THD : Taux de Distorsion Harmonique.

TDD : Total Demand Distortion.

UPQC : Unified Power Quality Conditioner.

VSI : Voltage Source Inverter.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le développement des nouvelles énergies est un enjeu majeur du XXI^e siècle pour faire face au réchauffement climatique d'une part, et d'autre part, pour obtenir des alternatives aux énergies fossiles.

L'augmentation rapide de la population mondiale et l'évolution du mode de vie des sociétés humaines, ainsi que les grands développements industriels et économiques que connaît la planète, nécessitent de doubler les besoins énergétiques actuels au niveau mondial, ce qui augmentera la pollution de l'environnement. Par conséquent, pour ces principales raisons, nous devons trouver une alternative aux énergies fossiles, ce qui a poussé les scientifiques à rechercher de nouvelles sources de production d'énergie électrique, appelées aujourd'hui énergies renouvelables. Parmi ces différentes sources, l'hydrogène représente une énergie idéale pour remplacer durablement les énergies fossiles.

Grâce à la recherche scientifique, une ressource renouvelable est apparue comme une technologie prometteuse, la pile à combustible. Il est efficace en termes de performances et produit de l'énergie sans pollution ni bruit. Il existe plusieurs types de piles à combustible, dans nos travaux actuels nous nous intéressons à l'étude de la cellule à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Cette technologie est actuellement la plus utilisée du fait de ses bonnes performances et aussi grâce aux améliorations que l'on peut espérer [1].

D'un autre côté, la qualité de l'énergie est devenue un aspect très important qui ne doit pas être négligée dans cette transaction énergétique. L'évaluation de la distorsion des formes d'onde du courant et de la tension électrique présente un intérêt particulier car les systèmes de distribution ont été conçus pour fonctionner avec des formes d'onde sinusoïdales. Les écarts par rapport à la forme sinusoïdale s'accompagnent de dommages infligés aux utilisateurs et de la réduction des performances globales des opérateurs de distribution. Donc, la qualité de l'énergie représente un ensemble d'indicateurs qui définissent la nature des sources d'approvisionnement dans des conditions normales de fonctionnement de tension et de fréquence en termes d'alimentation continue.

Les distorsions d'harmoniques sont des perturbations avec plusieurs entiers de fréquence provoqués par n'importe quel dispositif ou charge non linéaire. Les dispositifs passifs non linéaires génèrent des harmoniques impaires et les dispositifs actifs génèrent les harmoniques paires. Dans le réseau, nous pourrions avoir des composants non harmoniques : sous harmoniques ou inter harmoniques générés par les convertisseurs de fréquence ou les moteurs asynchrones qui utilisent un phénomène de glissement. La connexion des charges non linéaires dans le réseau de distribution entraînera des effets indésirables sur l'alimentation.

Suite aux développements industriels, de plus en plus de charges non linéaires sont incluses dans le système d'alimentation, en particulier certains équipements d'électronique de puissance, tels que les convertisseurs. Tous ces dispositifs augmenteront le niveau de contamination des formes d'onde de tension et de courant. Mais en contre partie de plus en plus les clients exigent l'amélioration de la qualité du système d'alimentation. Entre les différentes options techniques disponibles pour améliorer la qualité de l'énergie, ils existent les filtres actifs de puissance se sont avérés être une alternative importante pour compenser les perturbations de courant et de tension dans les réseaux de distribution d'énergie. Cependant, le filtre actif parallèle de puissance (FAP) compense les harmoniques de courant en injectant un courant de compensation harmonique égal mais en opposition de phase avec celui

consommé par la charge non-linéaire. Généralement, l'efficacité d'un (FAP) dépend de trois critères de conception [2] :

- La conception de l'onduleur de puissance.
- Les méthodes utilisées pour obtenir le courant de référence.
- Les types de contrôleurs de courant ou de la tension utilisés.

L'objectif principal dans ce mémoire est d'alimenter les charges non linéaires avec l'énergie des piles à combustible, de compenser le courant harmonique, ainsi de compenser l'énergie réactive dans le réseau de distribution à l'aide du filtre active parallèle (FAP). Afin d'obtenir ces fonctions multiples, ce travail utilise la théorie p-q instantanée comme système de commande [3]. De manière à atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire sera composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré aux piles à combustible et principalement à pile à combustible à membrane échangeuse de protons, son principe de fonctionnement et l'architecture des systèmes.

Dans le second chapitre nous présenterons la description des perturbations en courant et en tension pouvant intervenir dans un réseau électrique, les origines et les conséquences de ces perturbations seront analysées. Ainsi que les solutions traditionnelles et modernes de dépollution.

Dans le troisième chapitre nous discuterons en détail le filtre actif parallèle, son configuration et comportement de base qui représente actuellement la solution active la plus efficace.

Enfin, les études théoriques effectuées dans les trois chapitres seront appuyées dans le quatrième chapitre, sous des conditions que nous croyons proche de la situation réelle des réseaux électriques, telle que la variation brutale de la charge et nous discutons les résultats obtenus à l'aide de MATLAB/SIMULINK.

Ce travail sera clôturé par une conclusion générale qui est l'ensemble des compétences acquises.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LA PILE A COMBUSTIBLE

I.1 Introduction

Depuis 150 ans, le professeur de philosophie expérimentale à l'Institut Royal de Londres Sir William Robert Grove a inventé la première pile à combustible en 1839, il est « le Père de la pile à combustible ». Il fait des expériences sur l'électrolyse - l'utilisation de l'électricité pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène - ont mené à la première mention d'un dispositif qui s'appellera après la pile à combustible. Il cherchait de renverser le procédé d'électrolyse et de produire de l'électricité en faisant réagir de l'oxygène avec de l'hydrogène. En affirmant cette théorie ; il a enfermé deux bandes de platines dans des bouteilles séparées, l'une contenant de l'hydrogène l'autre de l'oxygène. Au temps que ces récipients ont été immergés de l'acide sulfurique dilué un courant a commencé à s'établir entre les deux électrodes et de l'eau s'est formée dans les bouteilles de gaz., Ensuite, il a placé plusieurs de ces dispositifs en série et a produit ce qu'il a appelé une « batterie à gaz », le précurseur de la pile à combustible moderne dans le but d'augmenter la tension produite [4].

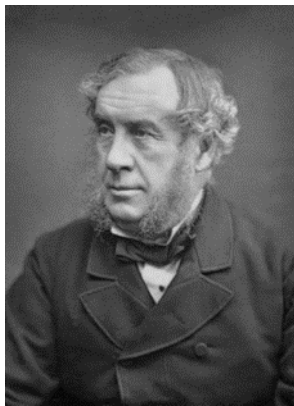


Fig.I.1 : William Robert Grove.

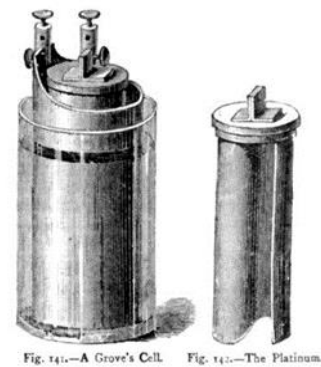


Fig.I.2 : Première pile à combustible à hydrogène.

Aux années 60, la pile à combustible a connu une renaissance quand un nouvel organisme gouvernemental des USA - the National Aeronautics and Space Administration (NASA) - recherche comment produire de l'énergie pour les vols spatiaux. La NASA avait déjà éliminé les batteries parce qu'elles étaient trop lourdes, d'une part l'énergie solaire est très chère et d'autre part l'énergie nucléaire est très risquée, pour ces raisons elle cherchait une source alternative. La pile à combustible est apparue comme une solution possible au moment où la NASA a attribué quelques contrats de recherche pour développer cette solution [5].

I.2 Principes de fonctionnement

On peut définir une pile à combustible comme un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique. La production d'énergie fait quand l'hydrogène réagit chimiquement avec l'oxygène de l'air. Lorsque la réaction se produit, dans un moteur à combustion interne, l'énergie est relâchée sous forme de chaleur, où une partie peut effectuer un travail utile en poussant un piston [4]. Même dans une pile à combustible, la réaction sera électrochimique et produira de l'énergie électrique et de la chaleur. On peut employer l'énergie électrique pour effectuer le travail utile directement et la chaleur gaspillée sera employée.

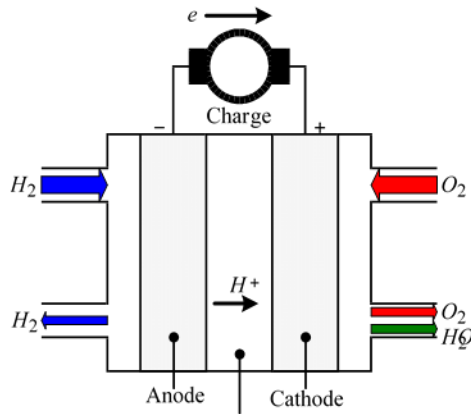


Fig.I.3 : Fonctionnement de principe d'une pile à combustible [6].

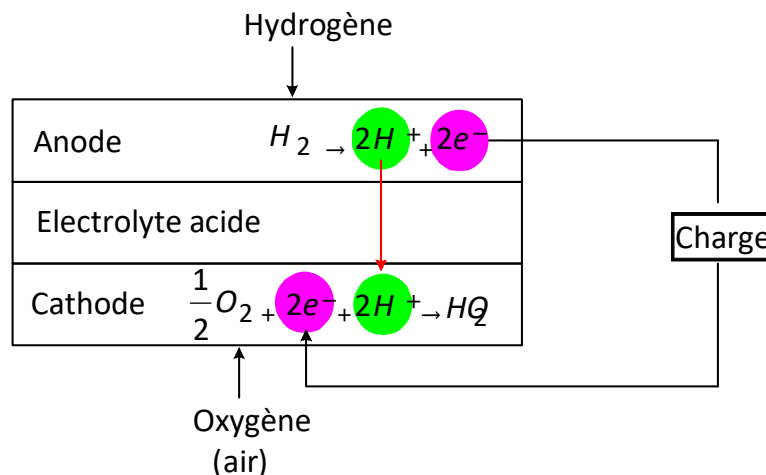
Les piles à combustible se caractérisent par la charge électrique qui détermine le taux de consommation d'hydrogène et d'oxygène. Ainsi, les gaz sont fournis, à l'anode pour l'hydrogène et à la cathode pour l'oxygène. Alors, la structure d'une pile à combustible comporte des arrivées de gaz des deux côtés de l'électrolyte.

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température, d'autres à basse température.

Généralement, une pile à combustible peut fonctionner à l'utilisation d'une variété de carburants et d'oxydants. Aussi, l'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, notamment les hydrocarbures ou les alcools. De plus, l'oxygène est l'excellent oxydant grâce à sa haute réactivité et son abondance dans l'air.

I.3 Types de piles à combustible

L'électrolyte utilisé fait la différence entre plusieurs types de piles à combustible (figure 1.4). C'est-à-dire l'électrolyte qui est traversé par les ions détermine la température de fonctionnement qui varie fortement selon le type de pile à combustible (tableau I.1).



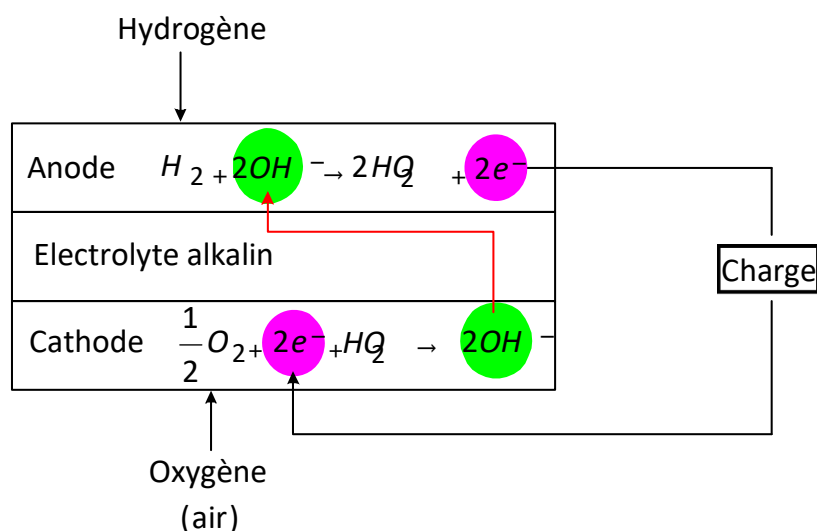


Fig.I.4 : Principe des piles à combustible à électrolyte acide (en haut) ou alcalin (en bas) [7].

Tab.I.1 : Différents types de pile à combustible (ion traversant l'électrolyte, température de fonctionnement et applications typiques) [8].

Types de pile à combustible	Ion	T° (°C)	Applications typiques
Pile à combustible alcaline	OH^-	50 -200	Apollo, navette spatiale
Pile à combustible à membrane	H^+	30 -100	Véhicule, stationnaire
Piles à combustible au méthanol direct	H^+	20 -90	Portable
Pile à combustible à acide phosphorique	H^+	220	Stationnaire
Pile à combustible à carbonate fondu	CO_3^{2-}	650	Stationnaire
Pile à combustible à oxyde solide	O_2^-	500 - 1000	Stationnaire, système auxiliaire de puissance

D'après ce tableau nous pouvons classer les piles à combustible, selon la température de fonctionnement, en deux catégories : les piles à combustible haute température (200 - 1000 °C) et les piles à combustible basse température ($\approx 100^\circ C$). Les piles à combustible haute température sont essentiellement les piles à oxyde solide (SOFC), les piles à carbonate fondu (MCFC), et les piles à acide phosphorique (PAFC). Les piles à électrolyte alcalin(AFC), les piles à membrane polymère échangeuse de protons, (PEMFC) et les piles à méthanol direct(DMFC) se distinguent par leur faible température de fonctionnement.

Dans le cadre de ce mémoire, nous allons nous intéresser aux piles à combustible du type PEMFC.

I.3.1 Pile à combustible de type PEMFC (Pile à combustible à membrane échangeuse de protons)

Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), également connue sous le nom de pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM), est un type de pile à combustible développé pour les applications de transport et de cellules mobiles. L'une des caractéristiques les plus importantes de ces cellules est qu'elles fonctionnent à des températures relativement basses (50 à 100 degrés Celsius) et contiennent une membrane électrolytique en plastique spéciale. Cette cellule est

utilisée dans de nombreuses applications, notamment dans les voitures et les téléphones portables en raison de sa petite taille [9].

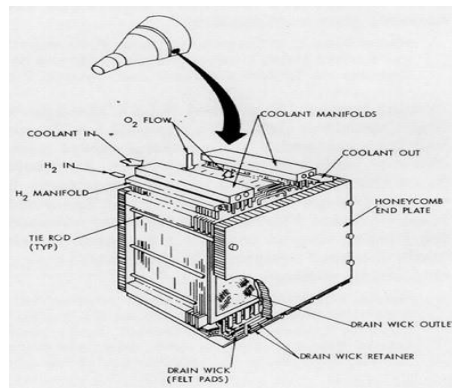


Fig.I.5 : Pile à combustible du type PEMFC [9].

I.3.2 Principe de fonctionnement de la pile PEMFC

La pile à combustible de type PEMFC est constituée d'un empilement de cellules électrochimiques en série (stack). Chaque cellule est le siège d'une réaction d'oxydoréduction dans laquelle l'hydrogène et l'oxygène réagissent pour produire de l'eau, de la chaleur, et de l'énergie électrique :

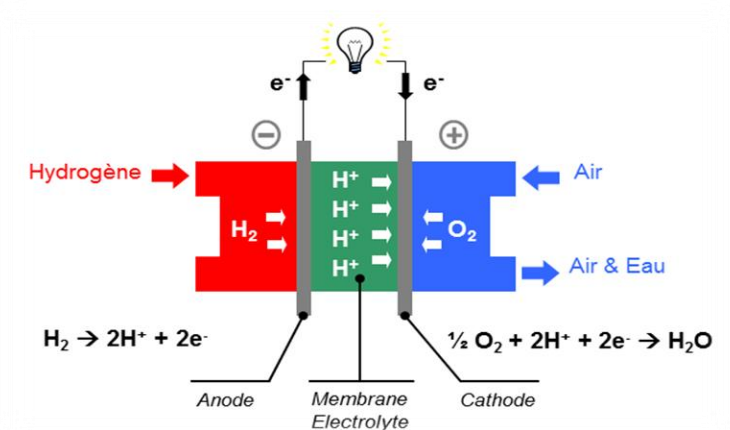
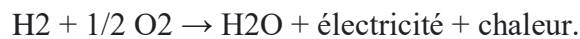
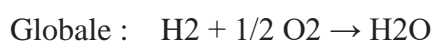
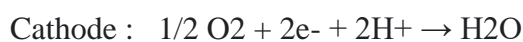
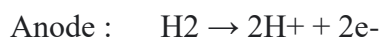


Fig.I.6 : Principe de fonctionnement d'une pile PEMFC.

Les principales réactions dans la PEMFC :



La membrane (20-200 micromètres) sépare les réactions d'oxydation de l'hydrogène et de réduction de l'oxygène et elle conduit les protons de l'anode à la cathode et qui est imperméable aux électrons. L'écoulement de protons entraîne des molécules d'eau cependant le gradient de l'humidité mène à une diffusion de l'eau selon l'humidité locale de la membrane.

Donc, les molécules d'eau peuvent donc aller dans les deux directions à l'intérieur de la membrane selon le côté où les gaz sont humidifiés et selon la densité de courant qui est liée aux protons qui traversent la membrane et à l'eau produite du côté de la cathode. Ainsi les électrons, qui apparaissent du côté de l'anode, ne traversent pas la membrane et sont employés dans le circuit électrique externe avant leur retour à la cathode.

I.4 Construction de pile à combustible de type PEMFC

Le stack est formé par plusieurs cellules qui sont reliées électriquement en série. De plus la cellule se compose d'un assemblage membrane-électrodes qui constitue l'anode, la cathode et l'électrolyte serré entre deux plaques en graphite. Ainsi les plaques dirigent le carburant et l'air des deux côtés opposés de l'assemblage.

On utilise un système de refroidissement pour régler la température de fonctionnement de la pile à combustible : des circuits de refroidissement (par cellule ou par groupe de cellules) permettent d'absorber ou de fournir (au démarrage) la chaleur. Le rôle des joints entre les plaques en graphite est d'assurer que l'oxydant, le carburant et le liquide de refroidissement ne se mélangent pas dans la pile à combustible. Les connexions électriques sont trouvées aux extrémités du stack, les bornes d'alimentation des gaz et de départ des gaz non utilisés et les bornes d'arrivée et de départ du fluide de refroidissement. Il y a au total huit bornes où circulent constamment des fluides.

Une pile à combustible sert à utiliser au mieux la surface de la membrane et joue sur le compromis surface de la membrane-nombre de cellule pour produire la puissance désirée. En revanche les points critiques sont les joints, les tolérances des circuits de distribution des fluides et l'alignement des cellules. Dans le coté commercial, les produits doivent être fiables, simples à fabriquer et avoir une durée de vie acceptable.

I.4.1 Assemblage membrane-électrodes

Le cœur de la pile à combustible est l'assemblage membrane-électrodes qui se compose d'une membrane d'électrolyte de polymère solide serrée entre deux électrodes de carbone poreuses. Il y a un catalyseur à base de platine est placé entre la membrane et les électrodes.

Ainsi, les électrodes incluent des joints pour améliorer le contact avec les composants adjacents et évitant les fuites. Notamment, la figure.I.7 présente l'assemblage membrane-électrodes de sept couches de la compagnie 3M [10].

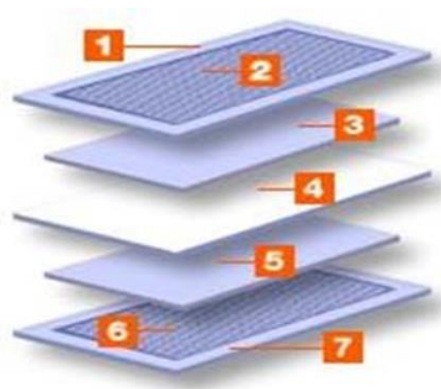


Fig.I.7 : Assemblage membrane-électrodes de sept couches de la compagnie 3M [10].

1. Surface d'étanchéité intégrée.
2. Couche de diffusion et collecteur de courant.
3. Couche anodique de catalyseur.
4. Membrane.
5. Couche cathodique de catalyseur.
6. Couche de diffusion et collecteur de courant.
7. Système élastomère de joint.

I.4.1.1 Electrodes

Les électrodes fournissent l'interface entre les gaz réactifs et l'électrolyte qui font le passage du gaz humide, fournir une surface de réaction où les gaz entrent en contact avec l'électrolyte, être conductrices aux électrons libres et assurer le passage des ions vers la membrane. On utilise du papier en fibre de carbone car il est poreux, hydrophobe (non-mouillable), conducteur et non-corrosif. Pour faciliter le transport des gaz et de l'eau, le matériau d'électrode est très mince.

On ajoute le catalyseur à la surface de chaque électrode où il est en contact de l'électrolyte afin d'augmenter l'efficacité de la réaction chimique. Il améliore la réaction chimique en fournissant les sites de réaction mais n'est pas consommé dans le procédé. On utilise le platine grâce à sa haute activité, sa stabilité et sa conductivité électrique. Même sa quantité utilisée est un facteur significatif dans le coût d'une pile à combustible que ses concepteurs essaient de diminuer la quantité de platine utilisée tout pour le bon fonctionnement des cellules.

I.4.1.2 Electrolyte

Une pile à combustible de type PEM se caractérise par l'électrolyte en polymère solide. L'électrolyte est une membrane mince d'une épaisseur de 50 à 175 μm . Ainsi, tous les électrolytes acides en polymère solide exigent la présence de molécules d'eau pour conduire les ions d'hydrogène qui se déplacent alors que des molécules d'eau pendant la réaction d'échange ionique. On constate que la proportion d'eau par rapport aux ions d'hydrogène pour obtenir une conductivité efficace est typiquement dans un rapport de 3 pour 1. Donc, les gaz qui contactent la membrane doivent être saturés en eau pour assurer un fonctionnement efficace.

Egalement, les membranes doivent être conductrices pour les protons, isolantes pour les électrons et imperméables aux gaz. Elles doivent avoir une bonne tenue mécanique et être stables. Dans un assemblage membrane-électrodes l'intégration apporte une structure qui facilite leur intégration dans les cellules. Quelques membranes commerciales sont disponibles comme le Nafion, produit par Dupont (figure.I.8). De plus, certains fabricants de piles à combustible comme Ballard ont développé leurs propres membranes [11].



Fig.I.8 : Membrane DuPont.

I.4.1.3 Plaque bipolaire

Le fonctionnement des plaques bipolaires est de se diriger le carburant et l'oxydant des deux côtés opposés des assemblages membrane-électrodes et chacune des plaques contient des canaux de conception sinueuse qui maximise la répartition des gaz (figure.I.9). Ainsi, La forme des canaux de gaz est un paramètre important pour la production uniforme d'électricité, c'est un fonctionnement stable des cellules et la gestion de l'eau.

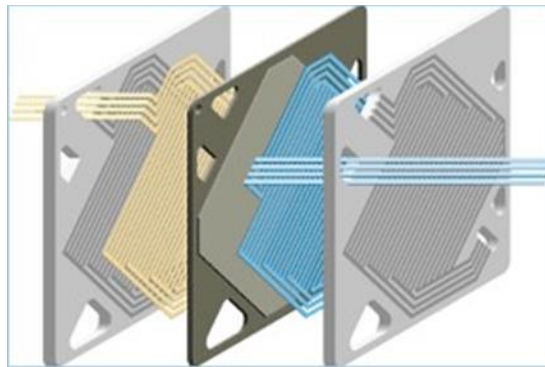


Fig.I.9 : Plaques bipolaire de pile PEMFC.

Chaque plaque doit être électriquement conductrice afin que le courant issu de la réaction électrochimique pour passer d'une cellule à l'autre, enfin aux bornes électriques. Ces plaques sont typiquement faites de graphite qui est le matériau préféré grâce à sa conductivité excellente, sa neutralité et son coût relativement bas.

I.4.2 Humidificateur

Parmi les aspects importants du fonctionnement des piles PEMFC c'est l'humidification des gaz réactifs. La conduction des ions ne peut pas se produire et des dommages de la pile à combustible peuvent résulter sans une bonne humidification de la membrane, La quantité d'eau absorbée par le gaz dépend fortement de la température d'humidification, en particulier à basse pression. Ainsi sur des stack, des humidificateurs sont intégrés au stack lui-même et d'autres, les humidificateurs sont des composants externes.

I.5 Système pile à combustible

Un système pile à combustible nécessite de l'oxydant, du carburant et du liquide réfrigérant afin de fonctionner. Alors les pressions et les débits du carburant et de l'oxydant doivent être réglés. De plus, les gaz doivent être humidifiés et la température du système doit être contrôlée. Et pour atteindre, un

stack de pile à combustible doit être entouré d'un système de fourniture du carburant, un système d'alimentation en air, un système de refroidissement du stack et un système d'humidification.

L'énergie produite doit être adaptée pour être utilisée par une charge, en fonctionnement. Des alarmes doivent arrêter le processus en cas de condition de fonctionnement dangereuse. On a besoin d'un système de mesure de la tension des cellules pour surveiller le fonctionnement du stack, il faut aussi assurer les fonctions par un système de contrôle.

I.5.1 Configuration système

La figure.I.10 représente les différents constituants d'un système pile à combustible. Elle l'indique qui se compose de six sous-systèmes fondamentaux (le stack présenté précédemment, la production du carburant, la gestion de l'air, la gestion de l'eau, la gestion thermique et le système de conditionnement de l'énergie électrique produite). On dit que la conception de chaque sous-système est une partie de la conception du système complet et est un élément principal de la réalisation de systèmes pile à combustible performants [12].

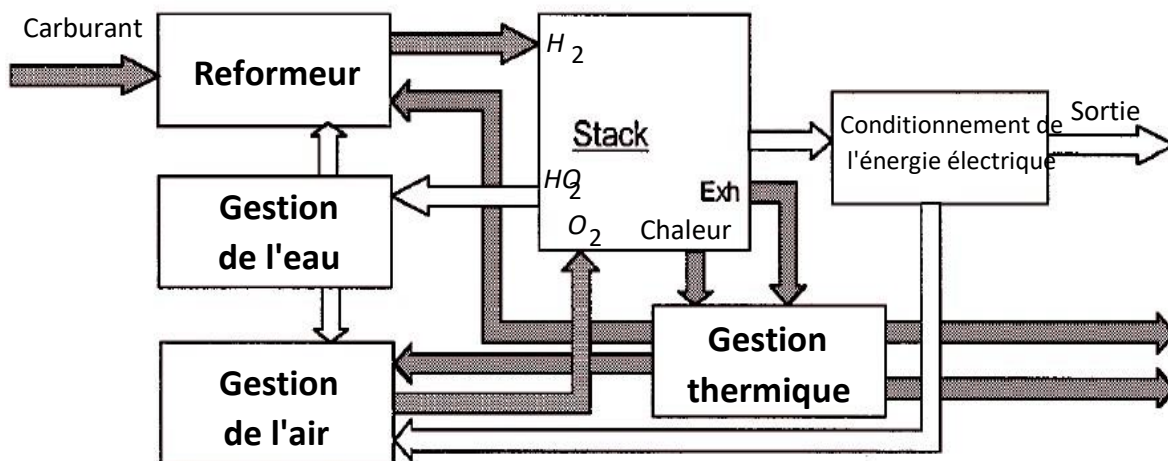


Fig.I.10 : Différents constituants d'un système pile à combustible.

I.5.2 Reformeur

La plupart des piles à combustible utilisent de l'hydrogène comme carburant ainsi que les sources d'énergie primaires sont des hydrocarbures, un dispositif de production de carburant est parfois nécessaire pour convertir le carburant initial en hydrogène. La complexité du procédé de reformage dépend de la composition du carburant d'origine et du type de système pile à combustible. Pour les systèmes fonctionnement à basse température comme les piles PEMFC, ce procédé est relativement complexe et comporte généralement un système de filtrage de gaz pour enlever le monoxyde de carbone du gaz d'anode, un désulfuriseur, un vaporeformeur ou un réacteur d'oxydation partielle.

I.5.3 Gestion de l'air

En dehors du carburant, la pile à combustible nécessite un oxydant, qui est généralement de l'air. L'air est fourni à la cathode de la pile à combustible à basse pression par un ventilateur ou à haute pression par un compresseur d'air. Le choix entre basse pression et haute pression n'est pas évident. D'une part,

l'augmentation de la pression de l'air améliore la cinétique des réactions électrochimiques et mène à une plus grande densité de puissance et à une meilleure utilisation du stack. Par contre, la puissance requise pour comprimer l'air diminue la puissance disponible. Il est possible de récupérer une partie de cette énergie en installant une turbine à la sortie d'air côté cathode.

I.5.4 Gestion de l'eau

L'eau est nécessaire dans beaucoup de lieux dans un processus de réforme. Dans les systèmes de pile PEMFC, il faut humecter les gaz réactifs pour éviter la dessiccation de la membrane. Si l'eau est fournie au niveau réactionnel, elle n'est pas toujours suffisante et il faut humidifier l'air (et parfois l'hydrogène). Dans des systèmes autonomes, on peut le récupérer dans les gaz d'échappement.

I.5.5 Gestion thermique

Les piles à combustible PEMFC produisent presque autant de chaleur que d'énergie électrique. Cette énergie thermique peut être utilisée de différentes manières. Il peut être utilisé pour préchauffer le gaz dans le système de reformage, détourné vers l'extérieur pour répondre aux besoins thermiques d'une application spécifique, ou rejeté dans l'environnement.

Pour les systèmes à faible puissance (< 200 W), l'excédent d'air passant par la cathode est suffisant pour refroidir le système. Pour les systèmes plus grands, il est nécessaire de faire circuler l'air, l'eau ou le liquide de refroidissement dans des canaux spécifiques [13].

I.6 Les avantages et les inconvénients des PEMFC

En tant que convertisseur d'énergie, les principaux avantages des piles à combustible de type PEMFC sont les suivants :

- Une grande densité massique énergétique face aux systèmes alternatifs aux moteurs à combustion interne comme le montre le diagramme de Ragone.

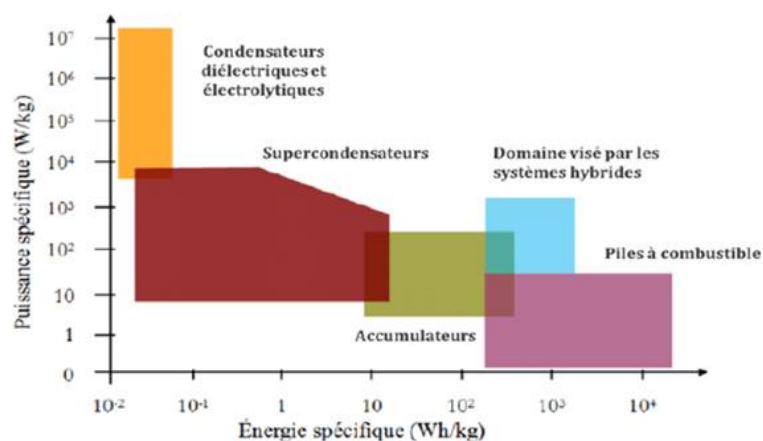


Fig.I.11 : Diagramme de Ragone.

- Un rendement élevé (nettement supérieur au rendement de Carnot d'un moteur thermique) le rendement nominal d'une pile de type PEMFC est compris entre 50 et 60%.
- Une souplesse d'utilisation (arrêt et démarrage quasi-instantanés).
- Un fonctionnement impactant faiblement l'environnement (dégagement d'eau et de chaleur).

- Un fonctionnement relativement silencieux (peu d'organes sont en mouvement).

Les principaux inconvénients freinant le développement des PEMFC sont :

- L'utilisation de métaux précieux en tant que catalyseurs de réaction.
- La difficulté de stockage de l'hydrogène (stockage sous pression ou dans des métaux comme le magnésium).

I.7 Activité commerciale

Aujourd'hui, de nombreux développements de piles à combustible ont eu lieu. Différents secteurs d'activité (transports, production d'énergie, télécommunications, services d'urgence dans les hôpitaux, des banques) s'intéressent de plus en plus aux piles à combustible. Les produits vendus par les entreprises suivantes ont également augmenté ces dernières années :

- United Technologies Corporation (UTC, USA) est leader mondial dans les systèmes de pile à combustible pour les applications de la défense et l'espace [14].



Fig.I.12 : Pile à combustible 75 kW UTC pour des voitures et des autobus.

- General Motors (GM, USA) est impliqué dans le développement des piles à combustible du type PEMFC pour le stationnaire et les marchés des véhicules à moteur.
- Centre for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg (ZSW, Allemagne) développe des stacks et des bancs de test d'une puissance de 1 à 5 kW.

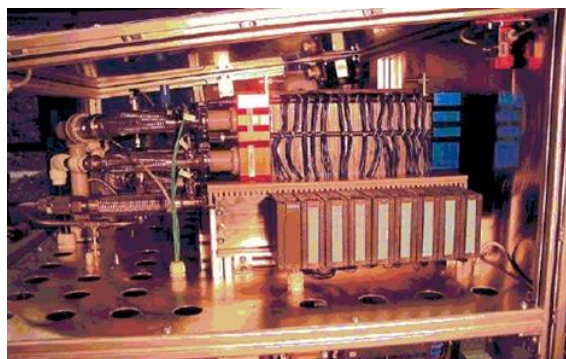


Fig.I.13 : Système de pile à combustible du type PEMFC 10 kW par ZSW [15].

- Axane (France) a été créé en 2001 comme filiale d'Air Liquide et travaille sur la technologie des piles PEMFC. L'entreprise vise trois marchés potentiellement intéressants à court terme :
 - Générateurs portables multi-application (500 W à 10 kW).

- Applications stationnaires (plus que 10 kW).
- Applications mobiles pour petits véhicules hybrides (5 kW à 20 kW).

I.8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'apprendre beaucoup de compétences sur les piles à combustible et principalement les piles PEMFC. Les différents points abordés ont concerné quelques rappels historiques du développement des piles à combustible depuis 1839, leur principe de fonctionnement, l'architecture des systèmes ainsi qu'une description détaillée de chaque élément constituant une cellule. Enfin, nous avons présenté les avantages et les inconvénients de la pile PEMFC et les principaux fabricants actuels en Europe et en Amérique du Nord.

CHAPITRE II

PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES ET LEURS COMPENSATIONS

II.1 Introduction

La qualité de l'énergie électrique est un problème de très grande actualité, dont l'importance est imposée par le rôle déterminant que l'énergie électrique joue dans la vie de la société contemporaine. La nécessité d'étudier la qualité de celle-là dérive de la présence des perturbations, qui affectent défavorablement l'alimentation des consommateurs à tous les investissements du système (production, transport, distribution). De ce fait, une connaissance de ces perturbations et leurs origines est nécessaire pour trouver les solutions convenables pour les éliminer [16].

L'objectif principal du fournisseur d'énergie est de fournir un système de tensions et courants sinusoïdaux triphasés équilibrés au consommateur. Ainsi, nous entamons ce chapitre par la notion d'harmoniques, leurs origines, leurs types et leurs conséquences. Nous allons ensuite exposer les différentes solutions de compensation traditionnelles et modernes pour y remédier.

II.2 Qualité de l'énergie

Le développement industriel a conduit à l'utilisation accrue d'ordinateurs, de microprocesseurs et de systèmes électroniques de puissance tels que les variateurs de vitesse. L'Intégration des nouvelles technologies de production telles que les piles à combustible, éoliennes et photovoltaïque nécessite des interfaces à la basse électronique de puissance pour les connecter avec les réseaux électriques. Ces systèmes électroniques posent eux-mêmes des problèmes de qualité de l'énergie (génération d'harmoniques) [17]. Essentiellement, nous pourrions regrouper tous ces défauts en quatre possibilités distinctes de perturbations :

- Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz : par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport, elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles.
- Les variations de l'amplitude : ce sont des diminutions rapides et brusques de plus de 10% de la valeur nominale, sur une ou plusieurs phases, pendant un temps compris entre 10 ms et quelques secondes.
- Le déséquilibre du système triphasé : dans cette situation les trois tensions du système triphasé ne sont pas égales en amplitude ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres, aussi que l'on appelle dissymétrie.
- La modification de la forme d'onde de la tension : c'est lorsque l'onde est périodique, mais pas sinusoïdale qu'elle peut être représentée par un ensemble de tensions sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale du réseau (50 Hz).

II.3 Perturbations harmoniques des réseaux

II.3.1 Définition

Le signal harmonique est une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz ainsi que d'ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental. La Figure II.1 montre la superposition de l'harmonique de rang 3 sur une fondamentale à fréquence 50 Hz. La principale source de la présence de courants harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements à base d'électronique de puissance.

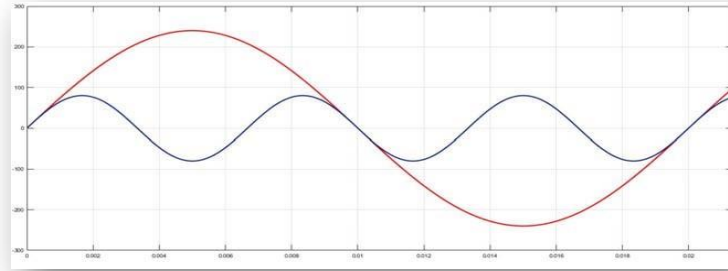


Fig.II.1 : Représentation de deux signaux fondamental et d'ordre 3.

II.3.2 Sources des harmoniques

La cause principale des courants harmoniques est l'injection des courants non-sinusoïdaux par des charges non-linéaires. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau peuvent créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements branchés au point commun de raccordement, lorsqu'ils sont importants en amplitude [18].

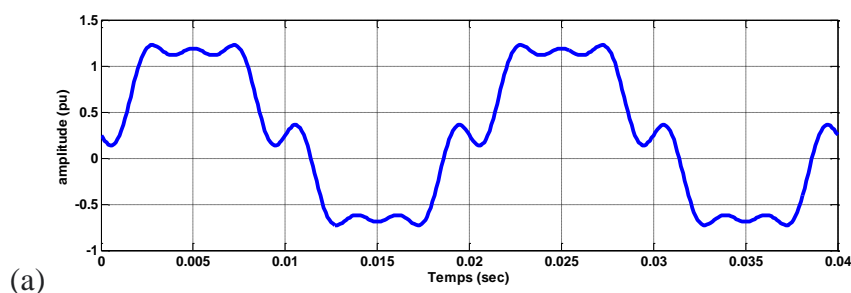
Chaque système contient des composants électroniques quelle que soit sa puissance, produit des courants riches en harmoniques dont le spectre dépend beaucoup de la nature de la charge. Néanmoins, L'impédance de la source aux différentes fréquences harmoniques à un impact important sur la sévérité de la distorsion harmonique en tension.

On peut considérer qu'il existe deux sortes d'harmoniques dans les systèmes d'exploitation d'énergie électrique : les harmoniques caractéristiques et les harmoniques aléatoires.

- Les harmoniques caractéristiques sont généralement produits par les convertisseurs d'électronique de puissance qui laissent passer un courant qui n'est pas sinusoïdal même si la tension demeure sinusoïdale.
- Les harmoniques aléatoires sont générés par des phénomènes non linéaires comme la variation de la résistance d'un four à arc alimenté par une tension sinusoïdale.

II.3.3 Théorie de base

Tout signal alternatif n'est pas exactement sinusoïdal, il contient des harmoniques, comme l'illustre la Figure.II.2 : ce signal peut être représenté par une somme ou une série des signaux sinusoïdes de fréquence égale à celle du signal (le fondamental), soit le 50 Hz, et des multiples de celle du signal fondamental (les harmoniques). La composante zéro de la série si elle existé et appelée la composante continue [19].



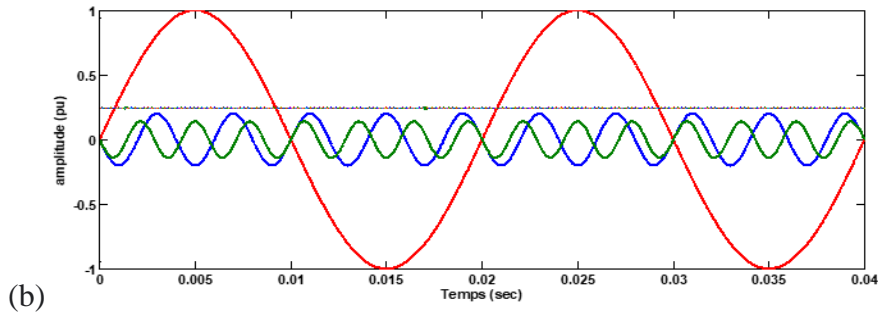


Fig.II.2 : (a) Onde distordue. (b) : Composantes continues et harmoniques.

II.3.4 Caractérisation des perturbations harmoniques

Généralement les perturbations harmoniques sont caractérisées par le taux de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance (FP).

II.3.4.1 Taux de distorsion harmonique (THD)

Le taux de distorsion harmonique « THD » permet de quantifier le contenu harmonique d'un signal périodique de tension ou de courant donné.

- **Taux harmonique individuels** : L'impact de chaque harmonique relativement au fondamental est donné par l'indice Taux harmoniques individuels G_h .

$$G_h = \frac{C_h}{C_1} * 100 \% \quad (2.1)$$

Où : C_h : représente la valeur efficace de la composante harmonique de rang h .

C_1 : représente la valeur efficace de la composante fondamentale.

- **Taux global de distorsion harmonique** : Ce taux est estimé selon la relation suivante :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^N \frac{C_h^2}{C_1^2}} * 100 \% \quad (2.2)$$

On prend N égal 50.

Deux taux globaux de distorsion harmonique sont distingués :

- Le taux de distorsion harmonique en courant, noté THD_I .
- Le taux de distorsion harmonique en tension, noté THD_V .

Le THD_I s'exprime pratiquement sous la forme [19] :

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} * 100 \quad (2.3)$$

Le THD_V s'exprime pratiquement sous la forme :

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (2.4)$$

Le THD_I ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le THD_V est fonction des courants harmoniques caractérisant la charge et l'impédance de court-circuit, imposée par le réseau.

$$\text{THD}_V = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left[\frac{V_h}{V_1} \right]^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left[\frac{|Z_{hcc}| I_h}{V_1} \right]^2} \quad (2.5)$$

Selon cette relation on constate que tant que l'impédance Z_{hcc} ($h > 1$) est plus faibles, plus la THD_V est faible.

II.3.4.2 Le facteur de puissance (FP)

Tous les dispositifs électriques sont dimensionnés selon la tension et le courant nominal. Le facteur de puissance caractérise le rendement de ces dispositifs, et une faible valeur de ce facteur indique que l'appareil ne fonctionne pas bien.

En ce qui concerne le signal sinusoïdal ce facteur est présenté par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S :

$$Fp = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{eff} I_{eff}} \quad (2.6)$$

Dans le cas d'une distorsion périodique du signal, une puissance complémentaire se présente, il s'agit de la puissance déformante (D) (Var), La figure suivante illustre vectoriellement ces puissances :

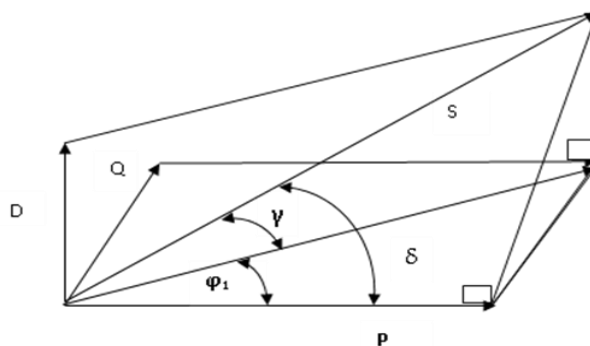


Fig.II.3 : Diagramme de Fresnel des puissances.

Le facteur de puissance s'en trouve modifié par la présence de la puissance de distorsion :

$$F.p. = \frac{P}{S} = \frac{V_{eff} I_{1,eff} \cos \varphi_1}{V_{eff} I_{eff}} = \frac{I_{1,eff}}{I_{eff}} \cos \varphi_1 = \cos \varphi_1 \cdot \cos \gamma \quad (2.7)$$

Donc on peut distinguer trois facteurs de puissance :

- **Facteur de déplacement** : c'est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente de l'onde fondamentale.

$$F_{dép} = \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{V_{1eff} I_{1eff}} \quad (2.8)$$

- **Facteur de distorsion** : c'est le rapport entre le courant fondamental et le courant total.

$$F_{dis} = \cos \gamma = \frac{I_{1,eff}}{I_{eff}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2}} \quad (2.9)$$

- **Facteur de puissance (total)** : est le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

$$Fp_{tot} = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{eff} I_{eff}} \quad (2.10)$$

Le facteur de puissance devient le produit du facteur de déplacement et du facteur de distorsion dans le régime déformé. Les définitions précédentes s'appliquent en régime monophasé et en régime triphasé équilibré.

$$Fp_{tot} = F_{dép} * F_{dis} \quad (2.11)$$

II.3.5 Les effets de la pollution harmonique

II.3.5.1 Conséquences techniques

Les équipements électriques sont sensibles aux perturbations harmoniques peuvent avoir un mauvais fonctionnement voir même s'arrêter à défaut d'une bonne qualité de l'énergie électrique, on spécifie deux types d'effet des harmoniques sur les équipements électriques les effets instantanés et les effets à long terme.

II.3.5.1.1 Effets instantanés

- Phénomène de résonance qui peut apparaître sur les réseaux d'éléments capacitifs et inductifs. Ce phénomène engendre des valeurs importantes d'impédance Z_n , de tension V_n et de courant harmonique I_n aux bornes des différents éléments de réseau. Lorsque ces valeurs de tension et de courant harmoniques sont trop élevées, ils peuvent endommager ou même détruire les équipements qui y sont soumis [20].

- Vibrations et bruits : les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques.

- Destruction par surcharge thermique de condensateurs.

- Perte de précision des appareils de mesure.

- Mauvais fonctionnement de dispositifs exigeant la tension sinusoïdale comme une référence : Une tension distordue peut modifier le bon fonctionnement de quelque appareil électronique qui utilise les

passages à zéro de la tension d'alimentation pour fonctionner correctement, tel que les convertisseurs de courant, les automates programmables et certains appareils électroniques domestiques.

II.3.5.1.2 Effets à long terme

- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements.
- Echauffement des récepteurs : des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques.
- Les condensateurs sont très sensibles à la circulation de courants harmoniques de par leur impédance qui décroît en fonction de l'augmentation de la fréquence. Ces courants harmoniques circulent plus aisément dans le condensateur de faible impédance ce qui crée des échauffements qui risquent de le détruire.
- La fatigue mécanique.

II.3.5.2 Conséquences économiques

La qualité de puissance électrique est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion de sites industriels, et les constructeurs d'équipements. Essentiellement pour la nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises et la généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension.

Les coûts liés à la perte de continuité de service et à la non-qualité de l'énergie électrique fournie est élevé. Quelques exemples pour chiffrer ces pertes concernent une verrerie en France qui perd 600000€ avec 3 jours d'arrêt de production pour cause de défaillances consécutives de 2 transformateurs à la suite d'un échauffement excessif, une banque perd 1M€ à cause d'un feu résultant d'une surcharge du fil neutre. On estime, au niveau européen, que la facture liée à une faible qualité de puissance s'élève environ à 500Mrds€/an dont à peu près 100 Mrds€/an sont dus aux harmoniques.

II.4 Les normes internationales

Pour assurer une qualité de l'énergie satisfaisante, des normes ont été mises en place, dans le but de limiter les effets des perturbations harmoniques sur les réseaux électriques.

Les deux principaux organismes qui ont établi ces normes sont la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) et l'IEEE. Les normes qu'ils ont établies sont la série CEI 61000 et l'IEEE Standard 519, généralement ces normes identifient les principales sources de pollution harmonique, décrivent les effets de ces harmoniques sur les réseaux.

II.4.1 CEI 61000

Parmi les sections qui nous intéressent de la norme CEI 61000 (une norme européenne) est le CEI 61000 2-2, CEI 61000 3-2 et le CEI 61000 3-4.

CHAPITRE II : Perturbations des réseaux électriques et leurs compensations

- **Le CEI 61000 2-2** : définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension (Tab.II.1). Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformée.

Tab.II.1 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension (CEI 61000-2-2).

Harmoniques impairs Non multiple de 3		Harmoniques impairs multiple de 3		Harmonique pairs	
Rang harmonique n	Tension harmonique %	Rang harmonique n	Tension harmonique %	Rang harmonique n	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5	–	–	12	0.2
23	1.5	–	–	>12	0.2
25	1.5	–	–	–	–
>25	$0.2+(0.5*25)/n$	–	–	–	–

- **Le CEI 61000 3-2** : définit des limites d'émission de courant harmonique par des appareils (équipements) consommant un courant inférieur ou égal à 16 A par phase. Cette norme fait une classification des dispositifs en quatre groupes ou classes, ces équipements doivent avoir une puissance de 75 W jusqu'à 600 W.
 - Classe A : tous les équipements triphasés équilibrés non inclus dans les classes (B, C et D).
 - Classe B : Outils portatifs.
 - Classe C : Équipements d'éclairage, y compris les dispositifs de régulation.
 - Classe D : micro-ordinateurs et télévisions.

Tab.II.2 : Limites des composantes harmoniques du courant (CEI 61000 3-2).

Harmoniques (h)	Classe A (A)	Classe B (A)	Classe C I _h /I ₁ %	Classe D (mA/W)
Harmoniques impairs				
3	2.30	3.45	30 x F _p	3.4
5	1.14	1.71	10	1.9
7	0.77	1.155	7	1.0

CHAPITRE II : Perturbations des réseaux électriques et leurs compensations

9	0.40	0.60	5	0.5
11	0.33	0.495	3	0.35
13	0.21	0.315	3	0.296
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \times 15/h$	$0.225 \times 15/h$	3	$3.85/h$
Harmoniques pairs				
2	1.08	1.62	2	-
4	0.43	0.645	-	-
6	0.30	0.45	-	-
$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \times 8/h$	$0.345 \times 8/h$	-	-
F_p : est le facteur de puissance				

L'équipement avec une petite puissance peut accomplir la norme avec un indice de distorsion harmonique (THDI) très élevé.

- **Le CEI 61000 3-4** : définit des limites d'émission de courant harmonique pour tout équipement raccordé au réseau qui absorbe plus de 16 A et moins de 75 A par phase.

Tab.II.3 : Limites d'émission des courants harmoniques pour l'étape I (CEI 61000-3-4).

h Impairs	I_h/I_1 %	h Pairs	I_h/I_1 %
3	21.6	2	4
5	10.7	4	2
7	7.2	6	1.33
9	3.8	8	1
11	3.1	10	0.8
13	2	12	0.66
15	0.7	≥ 14	0.6
17	1.2	-	-
19	1.1	-	-
21	0.6	-	-
23	0.9	-	-
25	0.8	-	-
27	0.6	-	-
29	0.7	-	-
31	0.7	-	-
≥ 33	≤ 0.6	-	-

II.4.2 IEEE sdt 519-1992

Cette norme utilisée principalement aux Etats-Unis, détermine les procédures pour contrôler les harmoniques présentes sur le réseau électrique, elle identifie les sources principales des harmoniques dans le réseau électrique. Les sources harmoniques incluent les convertisseurs de puissance, les fours à arc, les compensateurs statiques des Vars, les onduleurs, les cyclo convertisseurs, les alimentations à découpage et la commande MLI [21].

Les limites admissibles des harmoniques du courant sont regroupées en trois groupes distincts selon la tension du raccordement comme suit :

CHAPITRE II : Perturbations des réseaux électriques et leurs compensations

- Systèmes de distribution, avec des tensions de 120V à 69kV.
- Systèmes de sub transmission, avec des tensions de 69kV à 161kV.
- Systèmes de transmission, avec des tensions du raccordement de plus de 161kV.

Le premier groupe est celui de notre intérêt, il décrit plusieurs catégories dépendantes du rapport entre la puissance du court-circuit de la source de puissance au point de raccordement (PCC) et la puissance nominale de la charge (SCC/SN ou ICC/IN).

Les limites des harmoniques de rang pair sont égales à 25% de celles des harmoniques impaires. Le TDD (total demande distorsion TDD = THDI si on prend $I_N = I_1$) est défini comme le rapport entre les courants harmoniques et le courant nominal de la charge.

Tab.II.4 : La norme IEEE sdt 519-1992 pour les tensions de 120V à 69kV.

Limites des courants harmoniques (I_h) en % du courant nominal (I_N)											
Rang harmonique individuel											
I_{CC}/I_N	< 11		$11 \leq h < 17$		$17 \leq h < 23$		$23 \leq h < 35$		$35 \leq h$		TDD
	Impair	Pair	Impair	Pair	Impair	Pair	Impair	Pair	Impair	Pair	
< 20	4.0	1.0	2.0	0.5	1.5	0.375	0.6	0.15	0.3	0.075	5.0
20 < 50	7.0	1.75	3.5	0.875	2.5	0.625	1.0	0.25	0.5	0.125	8.0
50 < 100	10.0	2.5	4.5	1.125	4.0	1.0	1.5	0.375	0.7	0.175	12.0
100 < 1000	12.0	3.0	5.5	1.375	5.0	1.25	2.0	0.5	1.0	0.25	15.0
> 1000	15.0	3.75	7.0	1.75	6.0	1.5	2.5	0.625	1.4	0.35	20.0

Tab.II.5 : Les limites de la distorsion harmonique de la tension (IEEE sdt 519-1992).

Tension au point de raccordement (PCC)	Distorsion Harmonique Individuelle (%)	THD _V (%)
$V_N \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V_N \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$V_N > 161 \text{ kV}$	1.0	1.5

II.5 Fluctuations de la 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 au niveau des réseaux de distribution ou de transport, Les fluctuations de la fréquence sont définies par des variations sensibles à la valeur nominale de la fréquence (50/60Hz).

Cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [21].

II.6 Fluctuations de la valeur efficace

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes. 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 des machines à souder. Ce phénomène est appelé aussi effet flicker [23].

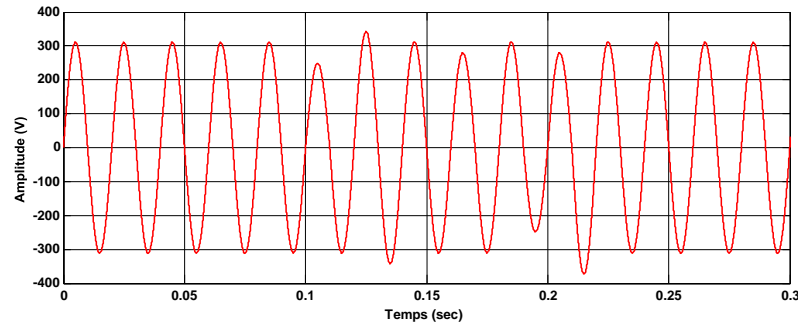


Fig.II.4 : Fluctuation de la valeur efficace.

II.7 Variations de l'amplitude de la tension

II.7.1 Creux et coupures de tension

Creux de tension est toute diminution brusque de la Tension de Fourniture (U_f) à une valeur située entre 90% et 1% de la tension d'alimentation déclarée (U_c), suivie d'un rétablissement de cette tension après un court laps de temps compris entre 10 ms à 3 minutes [24].

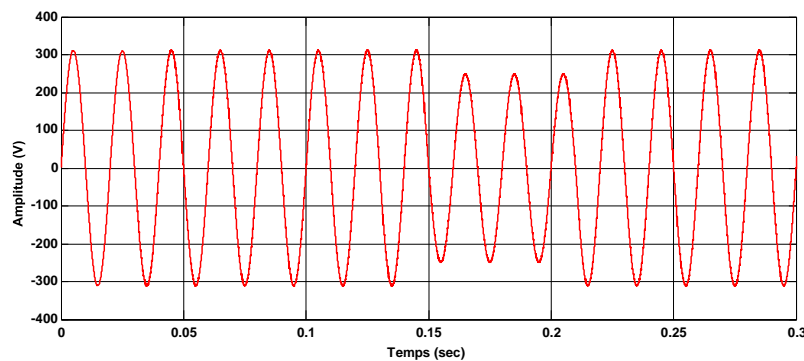


Fig.II.5 : Creux de tension.

Si les creux de tension ont une profondeur supérieure à 90%, on les nomme les coupures de tension. Les coupures brèves sont de durée inférieure à une minute, les coupures longues sont de durée supérieure [25].

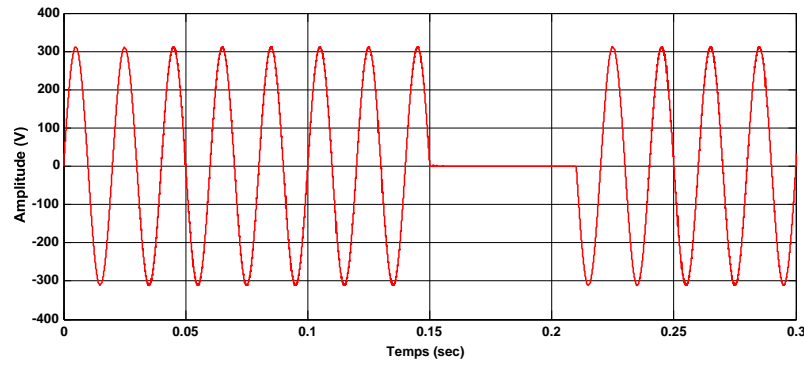


Fig.II.6 : Coupure de tension.

II.7.1.1 Origines des creux de tension

Les creux de tension peuvent se manifester par le fait de deux phénomènes :

- Phénomène dépend du système à charge fluctuante ou les équipements qui exigent un courant important au démarrage (moteurs, transformateurs, etc.).
- Phénomène lié aux évènements aléatoires, telle que la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients.

II.7.1.2 Effets et conséquences des creux de tension

Le tableau suivant résume les conséquences néfastes causées par les creux et les coupures de tension sur quelques matériels industriels.

Tab.II.6 : Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles.

Type d'équipements	Conséquences néfastes
Systèmes d'éclairage	Moins de luminosité.
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt ou mauvais fonctionnement des équipements.
Dispositifs de protection	Déclenchement et ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension.
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur.
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> - En mode onduleur : destruction des protections - En mode redresseur : ralentissement de la machine.

II.7.2 Les surtensions

Les surtensions sont généralement le résultat de commutation de charge, par exemple, la déconnection d'une charge importante ou énergisant une batterie de condensateurs. C'est une augmentation de la valeur efficace de la tension alternative supérieur à 110% à celle qui est définie par une norme pour une durée supérieure à 1 min [26].

Tab.II.7 : Les quatre types de surtensions présentes sur les réseaux électriques.

Surtension	Durée	Raideur du front de montée, ou fréquence	Amortissement en fonction de la distance
Atmosphérique	Très courte (μS)	Très élevée (1000kV/ μS)	Fort
Décharge électrostatique	Très courte (nS)	Elevée ($\approx 10 \text{ Mhz}$)	Très fort
Manœuvre	Courte (mS)	Moyenne (1 à 200 kHz)	Moyen
Temporaire	Long (S), très longues (h)	Fréquence du réseau	Nul

II.7.2.1 Classification des surtensions

La classification des surtensions est donnée par la norme CEI 71-1 selon la forme et la durée.

- Surtension temporaire : de quelques périodes à quelques secondes.
- Surtension transitoire : sa durée ne dépasse pas quelques millisecondes, oscillatoire ou non, généralement fortement amortie.

II.7.2.2 Conséquences et effets de la surtension

Les conséquences peuvent être diverses suivant la nature des surtensions, leur amplitude et leur durée. Elles sont résumées dans ce qui suit :

- Détérioration des matériels électriques par vieillissement, provoqué par des surtensions répétées.
- Perturbation des circuits de contrôle - commande et de communication à courants faibles par conduction ou rayonnement électromagnétique.
- Contraintes électrodynamiques (destruction ou déformation de matériel).
- Contraintes thermiques (fusion d'éléments, incendie, explosion) provoquées surtout par les coups de foudre.

II.7.3 Déséquilibre du courant et de tension

Les réseaux électriques triphasés alimentent beaucoup de charges monophasées et aussi des charges triphasées. Une charge triphasée qui n'est pas équilibrée et alimentée par un réseau triphasé conduit à des déséquilibres de tension dus aux courants non équilibrés qui s'écoulent dans les impédances du réseau [19]. Le degré de déséquilibre est défini par la méthode des composantes de Fortescue.

$$\Delta U_i = \frac{|\overline{U}_{1i}|}{|U_{1d}|} \quad (2.12)$$

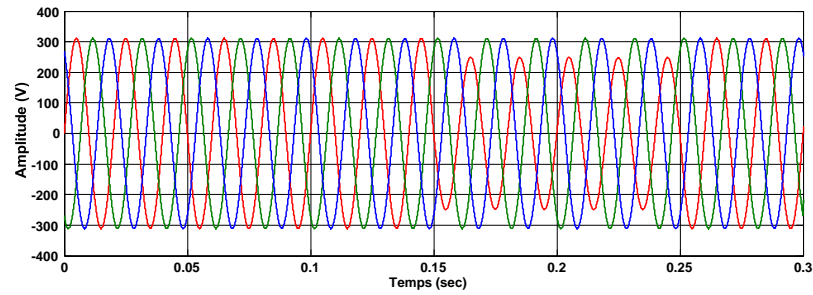


Fig.II.7 : Déséquilibre du système triphasé de tension.

II.8 Solutions de dépollution des réseaux électriques

Plusieurs procédures sont mises en pratique pour réduire la pollution harmonique des réseaux électriques, mais, par suite de la progression des charges (charges plus polluantes, plus sensibles, etc.), elle peut être plus fréquente dans l'avenir. A cet effet, il est indispensable de faire face à toutes les perturbations.

II.8.1 Les solutions traditionnelles de dépollution

Sont des techniques qui apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations, parmi les principales solutions existantes :

II.8.1.1 Dépollution des courants perturbateurs

- **Rééquilibrage des courants par la répartition égale des charges** : la répartition irrégulière des charges dans un réseau électrique à basse tension donne lieu à des courants déséquilibrés. [27]. Les solutions majeures consistent à :
 - Repartir les charges sur les trois phases d'une manière égale.
 - Améliorer l'architecture du réseau et compenser la puissance réactive.

Pour réaliser l'équilibrage sans dissiper d'énergie, on utilise un système sans neutre (pour que la composante homopolaire soit nulle). Le montage qui vérifie ces conditions est appelé montage de Steinmetz.

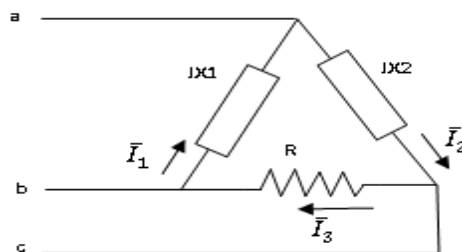


Fig.II.8 : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage.

- **Compensation de la puissance réactive** : tout système électrique utilisant le courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive [27]. Différentes méthodes sont utilisées pour compenser la puissance réactive et la plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. La compensation peut être réalisée avec deux familles de produits : les condensateurs de

valeurs fixes ou batterie fixe et les batteries de condensateurs en gradins avec régulateur (ou batteries automatiques).

- **Compensation des courants harmoniques** : tous les récepteurs non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de la sinusoïde de tension d'alimentation. Plusieurs solutions existent pour limiter l'effet de ces harmoniques dans les réseaux électriques et parmi celles-ci nous allons citer les filtres passifs shunts L-C accordés à des fréquences fixes pour éliminer les harmoniques prépondérants connus (on peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges) [29] [30]. Le filtre passif piège les courants harmoniques dans des circuits LC, syntonisés sur les rangs d'harmoniques à filtrer. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti.



Fig.II.9 : Filtre passif résonnant.

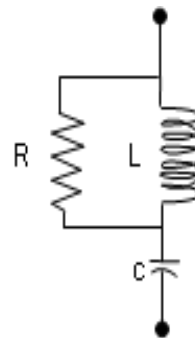


Fig.II.10 : Filtre passif amorti.

- **Ponts redresseurs à douze branches** : pour limiter les courants harmoniques injectés dans le réseau de distribution on peut se servir d'un pont d'entrée à douze branches qui consiste à alimenter le circuit intermédiaire en utilisant deux ponts de diodes standards triphasés, montés soit en parallèle soit en série, chacun des ponts est alimenté par un transformateur à double bobinages, les uns couplés en étoile, les autres en triangle [25]. Les ponts qui sont installés en parallèle étant très sensibles aux déséquilibres de tension. Cette solution peut attendre un THD égale 10,5%.

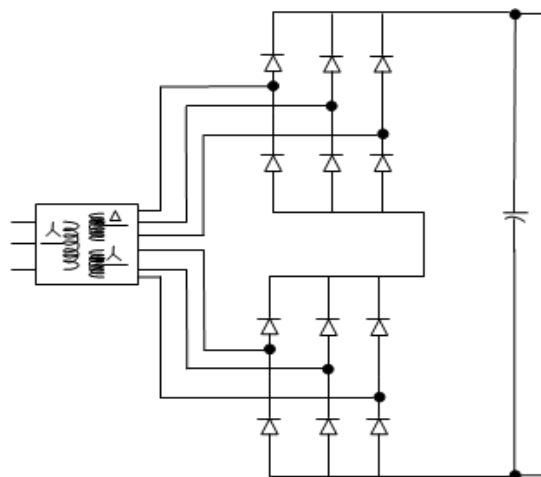


Fig.II.11 : Pont redresseur à 12 branches.

II.8.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices

La longue durée des creux de tension a des conséquences néfastes sur quelques matériels industriels, à cet effet il est nécessaire d'agir de la manière suivante :

- **Au niveau du réseau :**
 - Augmentation des possibilités de bouclage (nouveaux postes source, installation des interrupteurs de bouclage).
 - Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau.
 - Amélioration du niveau de performance des protections électrique (organes télécommandés en réseau, remplacement des éclateurs par des parafoudres...).
- **Au niveau des équipements :** on utilise des compensateurs automatiques en temps réel et des démarreurs progressifs au moment de la mise sous tension des consommateurs de fortes puissances, pour diminuer la puissance absorbée par ces consommateurs ; c'est-à-dire limiter l'appel élevé de courant (ainsi que les sollicitations mécaniques).

II.8.2 Les Solutions modernes de dépollution

Il est devenu difficile, même parfois impossible, d'utiliser les solutions traditionnelles pour dépolluer les réseaux électriques, donc des solutions modernes sont proposées pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même lors de perturbations.

II.8.2.1 Dépollution des courants perturbateurs

- **Pont dodécaphasé :** des tensions décalées de 30° entre eux sont délivrés par deux transformateurs, chaque enroulement secondaire alimente un redresseur en pont de Graëtz [26] [31]. Pour atteindre des courants alternatifs qui possèdent des valeurs identiques au secondaire des transformateurs, il faut que les redresseurs puissent offrir des courants continus identiques. Mais cette méthode est très coûteuse du fait de l'utilisation d'un grand nombre de semi-conducteurs et de deux transformateurs ou un transformateur à deux enroulements secondaires.

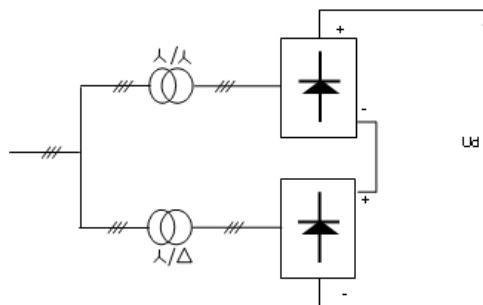


Fig.II.12 : Pont dodécaphasé.

- **Redresseur à MLI :** La fonction de la modulation est de déterminer les instants de commutation des interrupteurs afin d'obtenir une séquence de commutation qui présente le même spectre basse fréquence que le signal d'origine. La modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) consiste à adopter une fréquence de commutation suffisamment élevée par rapport à la fréquence maximale du signal de sortie souhaité [31].

II.8.2.2 Dépollution des tensions perturbatrices

Afin de compenser les creux de tension des solutions sont utilisées basées sur l'application des dispositifs de compensation à réserve d'énergie, comme c'est le cas des Alimentations Sans Interruptions (ASI), ce sont basées sur l'électronique de puissance, placées en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une alimentation électrique stable et dépourvue de coupure brève ou de microcoupure [25]. Ce type d'Alimentation peut fonctionner en trois modes différents :

- Mode normal : comme un onduleur alimenté par le réseau via le chargeur-redresseur.
- Mode autonome : comme un onduleur alimenté par la batterie.
- Mode by-pass, directement depuis le réseau via le by-pass.

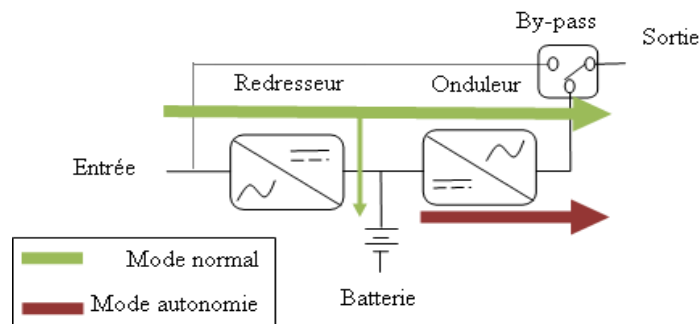


Fig.II.13 : ASI fonctionnant en double conversion.

II.8.2.3 Les filtres de puissances

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même lors de perturbations, les filtres de puissances sont proposés comme des solutions avancées moderne de dépollution des réseaux électriques. En effet, les filtres de puissances peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

II.8.2.3.1 Filtre actif parallèle (FAP)

Il est appelé aussi compensateur shunt, connecté en parallèle sur le réseau de distribution. Il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques i_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de sorte que le courant fourni par le réseau i_s soit sinusoïdal. Ainsi, il empêche les courants harmoniques de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant [22] [26]. Dans le chapitre III ce filtre sera traité en détail.

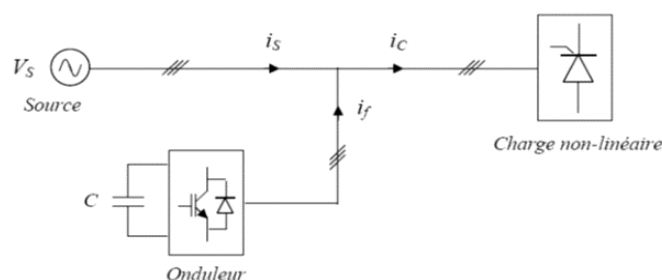


Fig.II.14 : Filtre actif parallèle.

II.8.2.3.2 Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau, se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices venant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau (donc la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale). Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) [22] [26].

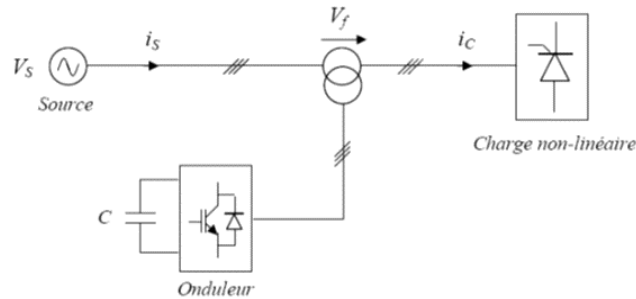


Fig.II.15 : Filtre actif série.

II.8.2.3.3 Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle (FAPH)

Afin de réduire le dimensionnement d'un filtre actif et son coût, on lui associe un filtre passif. Le rôle de filtre passif est d'éliminer les fréquences spécifiques permettant la réduction du dimensionnement du filtre actif qui compensera le reste des perturbations [30].

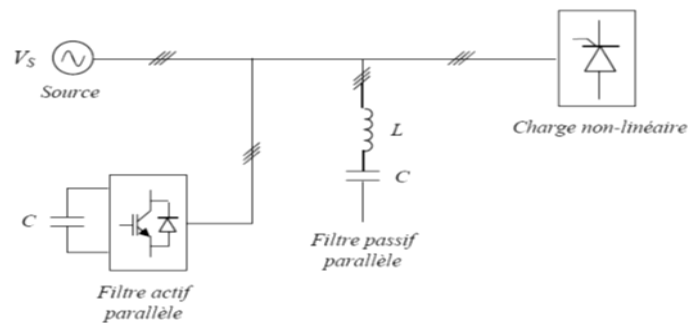


Fig.II.16 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

II.8.2.3.4 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

La combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée (Unified Power Quality Conditioner) est principalement la combinaison de deux filtres actifs série et parallèle qui partagent la même capacité sur le bus continu [22] [26]. L'objet de ce filtre est l'isolation harmonique entre la charge et la source d'une part et la régulation de la tension réseau d'autre part. Il est considéré comme le plus puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement de puissance. Cependant, son prix important et la complexité des commandes des nombreux interrupteurs limitent son utilisation à des applications critiques comme l'équipement médical.

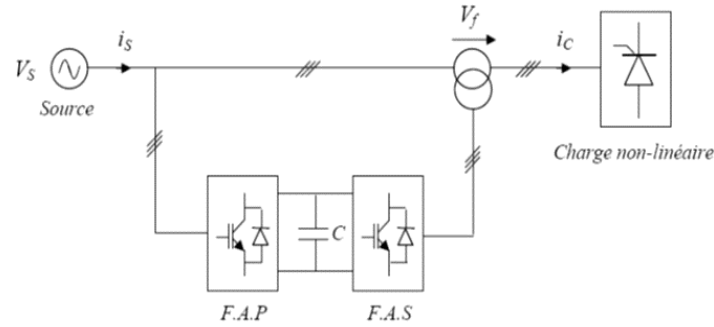


Fig.II.17 : Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC).

II.9 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'établir un ensemble d'informations sur les défauts les plus fréquents dans les réseaux électriques. En premier lieu nous avons illustré, le phénomène des harmoniques, leurs sources, leurs caractéristiques et leurs conséquences nuisibles au bon fonctionnement des appareils électriques. De plus, on a présenté les normes fixées par les instances internationales, ensuite nous avons vu les solutions appliquées pour la dépollution des réseaux électriques (les solutions classiques et les solutions modernes). Par conséquent, dans la suite de notre mémoire nous avons s'intéressé aux solutions modernes tel que le filtre actif parallèle qui sera l'objet de ce mémoire.

CHAPITRE III

FILTRE ACTIF PARALLELE (FAP)

III.1 Introduction

Comme nous avons vu au chapitre précédant les inconvénients des dépollutions traditionnelles qui ne répondent plus à l'évolution des réseaux électriques, ont conduit les chercheurs et les producteurs de l'énergie électrique à proposer une nouvelle structure d'une solution moderne et efficace appelée filtre actif parallèle. Le but de ces filtres est d'injecter soit des courants soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension soient rendus sinusoïdaux. Le filtrage actif parallèle de puissance est une solution moderne et adéquate permettant de remédier aux perturbations en courant.

Dans ce chapitre nous sommes intéressés à l'étude du filtre actif parallèle (FAP), son structure générale, son principe de fonctionnement ainsi que l'étude de son partie puissance et partie contrôle-commande.

III.2 Principe de fonctionnement du FAP

Le filtre actif parallèle est connecté en parallèle sur le réseau de distribution (Fig.III.1). Il est une solution moderne et efficace pour restituer la forme sinusoïdale du courant provenant du réseau électrique lorsque celui-ci est déformé par une charge non linéaire [32] [33]. Il se comporte comme un générateur de courants harmoniques, contrôlé de façon à injecter des courants harmoniques égaux à ceux engendrés par la charge, mais de phase opposée. Le courant coté source sera ainsi sinusoïdal, par contre la tension au point de connexion ne le sera que si la source de tension du réseau est exempte d'harmoniques.

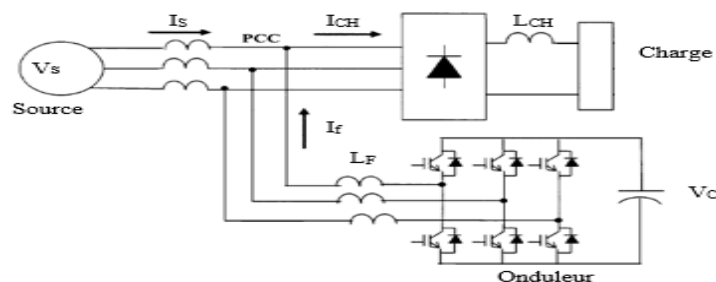


Fig.III.1 : Filtre actif parallèle avec une charge non-linéaire.

III.2.1 Mode de fonctionnement

Le filtre actif parallèle peut être utilisé suivant deux modes de fonctionnement :

III.2.1.1 Filtre dédié

Si la charge non linéaire est connue. L'exemple type est la suppression des premiers harmoniques des courants absorbés par un redresseur alimentant une charge fortement inductive. Dans ce cas, les harmoniques peuvent être approximativement estimés à partir de l'amplitude et de la phase du courant fondamentale. En effet, si la charge non linéaire est connue, les courants harmoniques sont calculables à priori. Par conséquent, le courant du filtre est connu. La commande du filtre actif est également stationnaire et elle est déterminée à priori pour engendrer ce courant du filtre. La commande peut donc être dédiée à la charge. En revanche, l'adaptation du filtre actif vis-à-vis des variations de la charge est impossible.

III.2.1.2 Filtre adaptatif

Ce filtre est capable d'identifier par lui-même les harmoniques et de s'adapter automatiquement à leurs éventuelles évolutions. Sa commande, lui permet de générer en temps réel des courants harmoniques en opposition de phase.

III.3 Structure générale du filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle est constitué de deux parties distinctes : une partie puissance et une partie contrôle commande. La figure III.2 représente la structure générale du FAP.

La partie puissance est constituée :

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance.
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- D'un filtre de sortie.

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- De la méthode d'identification des courants perturbés.
- La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- De la commande de l'onduleur de tension.
- La régulation des courants injectés sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.

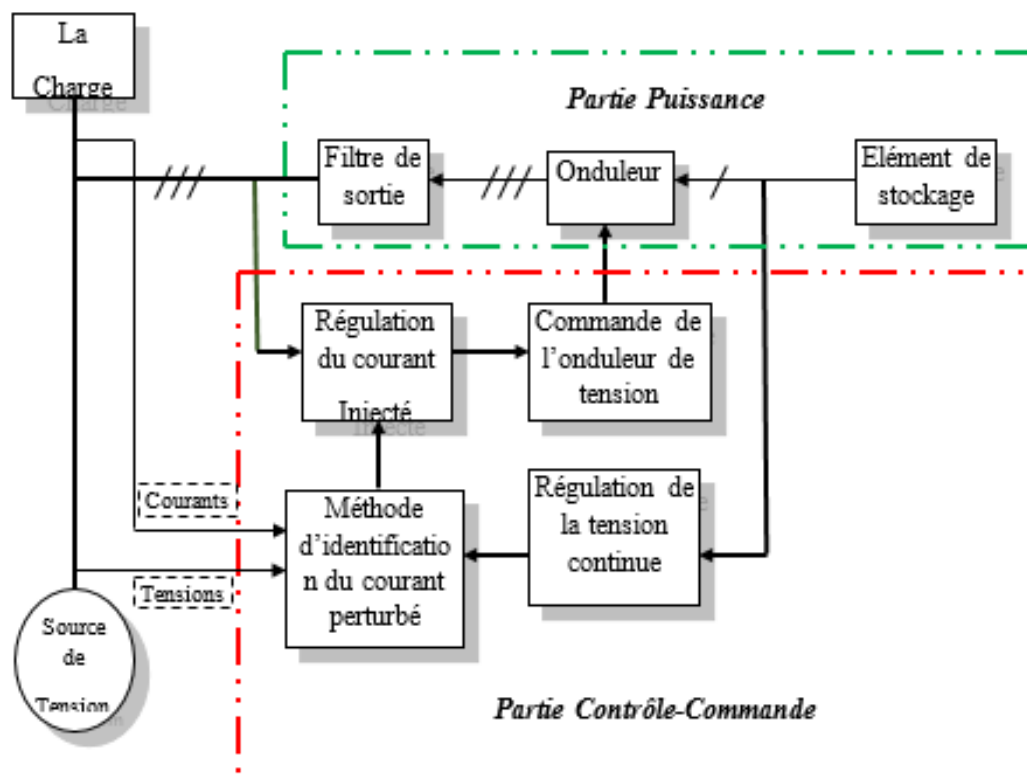


Fig.III.2 : Structure générale du filtre actif parallèle.

III.4 Etude de la partie puissance

III.4.1 Onduleur de tension

La figure III.3 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur CDC de tension V_C . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (LF, RF) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

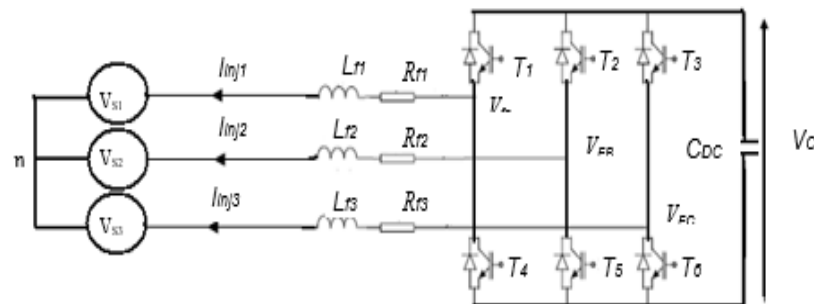


Fig.III.3 : Onduleur de tension triphasé.

Cette structure du filtre actif parallèle ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.

III.4.2 Élément de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un élément de stockage capacitif représenté par un condensateur CDC qui joue le rôle d'une source de tension continue V_C , comme le montre la figure III.3. Le choix des paramètres du système de stockage (V_C et CDC) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_C élevée améliore la dynamique du filtre actif [34]. De plus, les ondulations de la tension continue V_C , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de CDC, peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous

pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées :

- La première méthode se base sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz). En choisissant un taux d'ondulation acceptable (ε), généralement de l'ordre de 5% de V_C , nous pouvons calculer la capacité CDC à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_S \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \varepsilon V_C^2} \quad (3.1)$$

Avec V_S la tension simple du réseau, I_H le courant harmonique du rang h et α l'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz.

Puisque l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore le fonctionnement du filtre actif et sachant que le choix de cette tension se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue V_C doit être choisie comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs.

- La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_H du rang le plus faible [34]. La capacité C_{DC} se calcule de la façon suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon V_C \omega_h} \quad (3.2)$$

Avec ω_H : la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

III.4.3 Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, ce filtre doit permettre au filtre actif parallèle de se comporter en source de courant vis à vis la source d'alimentation triphasée. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} I_{ch_h} = \frac{d}{dt} I_f \quad (3.3)$$

Avec I_{CH_H} le courant harmonique de la charge et I_F le courant du filtre actif.

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

Deux types du filtre de sortie peuvent être employés : un filtre de sortie du premier ordre ou un filtre de sortie du troisième ordre.

III.4.3.1 Filtre du Premier ordre

Ce type de filtre est le plus utilisé. Il est composé d'une inductance L_F de résistance interne R_F , comme le montre la figure.III.3. Un filtre de ce type ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie. En effet, seule une valeur relativement faible de L_F peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant l'égalité (3.3). Malheureusement, une valeur faible de L_F permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver côté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_F va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation [35].

Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du filtre actif parallèle. Ce compromis est très difficile à fixer sans l'emploi d'un filtre passif auxiliaire installé à la sortie de l'onduleur ou en amont du côté réseau. Cependant, ce filtre auxiliaire peut causer des effets secondaires non désirés comme la résonance avec d'autres éléments passifs installés sur le réseau électrique. Il occasionne également une consommation de puissance active par sa résistance d'amortissement. De plus, la qualité de filtrage de ces filtres auxiliaires se dégrade avec le temps à cause du vieillissement de leurs éléments passifs [36].

Dans le cas d'une modulation triangulaire, l'inductance doit aussi empêcher la pente des courants injectés par le filtre actif de dépasser la pente du signal triangulaire. La valeur de l'inductance, dans ce cas peut être estimée par :

$$L_f = \frac{V_{dc} + \sqrt{3} \hat{V}}{4f_s \Delta i} \quad (3.4)$$

Où (\hat{V}), F_s , et Δi sont respectivement la valeur crête de la tension simple, la fréquence du signal triangulaire et l'ondulation maximale admise du courant durant une période de commutation.

L'avantage majeur du filtre du premier ordre est son simplicité d'implantation et son faible cout, ce qui a fait son utilisation très fréquente dans les FAP réales. Donc nous avons choisi ce filtre pour notre modèle étudié.

III.4.3.2 Filtre du troisième ordre

Afin d'échapper aux problèmes évoqués dans le cas du filtre de sortie du premier ordre, un filtre de sortie du troisième ordre est proposé. Ce filtre de sortie, souvent appelé filtre en T, se compose de deux inductances (L_{f1} , L_{f2}) de résistances internes respectives (R_{f1} , R_{f2}) et d'une capacité C_f . Une petite résistance d'amortissement R_F a été ajoutée en série avec la capacité C_F comme le montre la figure.III.4. Ce type de filtre et grâce au degré de liberté supplémentaire, fourni par la capacité C_F , peut assurer les deux critères du dimensionnement du filtre de sortie que nous avons évoqués précédemment [37].

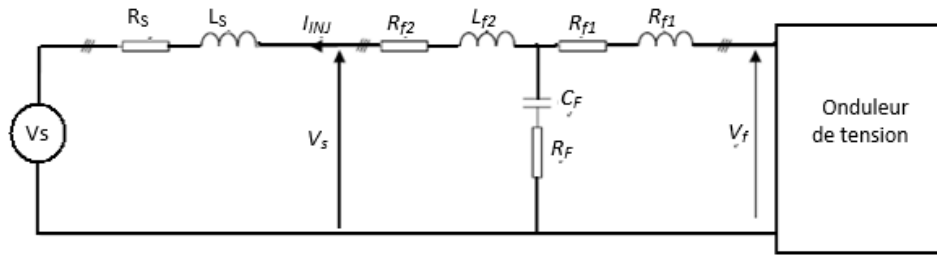


Fig.III.4 : Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre en T.

III.5 Etude de la partie contrôle-commande

La stratégie de commande se base sur la méthode de détection des courants perturbateurs. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées :

- Identification des harmoniques à partir de la détection des courants de la charge : Cette méthode détecte les courants de la charge I_{CH} , qui circule en aval du point de raccordement, et donc extrait les courants harmoniques I_{CH_H} de I_{CH} .
- Identification des harmoniques à partir de la détection des courants de la source : Cette méthode détecte les courants de la source I_S , qui circule en amont du point de raccordement, et donc extrait les courants harmoniques I_{SH} de I_S .
- Identification des harmoniques à partir de la détection des tensions de la source : Cette méthode détecte les tensions de la source au point de raccordement V_S , et donc extrait les tensions harmoniques V_H de V_S [38].

Les courants de compensation (if) dans le domaine temporel sont représentés par :

- Identification depuis les courants de charge : $I_F = I_{CH_H}$.
- Identification depuis les courants de source : $I_F = K_S I_{SH}$.
- Identification depuis des tensions de source : $I_F = K_V V_H$.

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes [39]. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail.

III.5.1 Les méthodes d'identification des courants perturbés

III.5.1.1 Généralités sur les méthodes d'identification

Le courant absorbé par une charge polluante est constitué d'une composante fondamentale et des harmoniques. L'objectif du filtre actif est de générer des courants harmoniques de même amplitude mais de phase opposée à ceux-ci. Par conséquent, le courant du côté réseau sera sinusoïdal. Pour cela, on a donc besoin d'identifier les courants harmoniques de la charge [40]. Plusieurs méthodes d'identification des courants harmoniques peuvent être utilisées, dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel :

- Les méthodes utilisées dans le domaine fréquentiel : sont basées sur l'analyse de Fourier du signal de la tension ou du courant pollué pour extraire les signaux de compensation]. En utilisant la transformation de Fourier, les composantes harmoniques de compensation sont séparées des signaux pollués et combinés pour générer les commandes de compensation. Seulement, l'application de la transformée de Fourier nécessite des calculs longs et laborieux.
- Les méthodes utilisées dans le domaine temporel : sont basées sur la dérivation instantanée des signaux de compensation à partir des formes d'onde de la tension et courant pollués. Il y a plusieurs stratégies de commande utilisées dans le domaine temporel, les plus connues sont :
 - La théorie des puissances instantanées p-q.
 - La méthode du système de référence synchrone d-q.
 - La méthode de détection synchrone.
 - La méthode basée sur la notion du flux.
 - La méthode directe basée sur l'équilibre des puissances.
 - La méthode basée sur le principe de la corrélation croisée.

Celle utilisant les notions de puissances réelles et imaginaires instantanées réalisent de meilleurs compromis entre les performances statiques et dynamiques, elle est utilisée actuellement dans la plupart des filtres actifs en service dans le monde. Son objectif est de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les harmoniques en composants alternatives. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, cette méthode peut compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement [41].

III.5.1.2 La Méthode des puissances instantanées p-q

III.5.1.2.1 Généralités sur les puissances instantanées

Cette méthode exploite la transformation α - β pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_S) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_{CH}). La transformation de Clarke notée transformation α - β -0 permet d'écrire les relations suivantes dans un système triphasé équilibré :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ch1} \\ I_{ch2} \\ I_{ch3} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension.

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

$$\begin{cases} P(t) = V_{S1}I_{ch1} + V_{S2}I_{ch2} + V_{S3}I_{ch3} = p(t) + p_0(t) \\ p(t) = V_{\alpha}I_{\alpha} + V_{\beta}I_{\beta} \\ p_0(t) = V_0I_0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Avec $p(t)$ la puissance réelle instantanée, $p_0(t)$ la puissance homopolaire instantanée. L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} q(t) &= -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{S1} - V_{S2})I_{ch3} + (V_{S2} - V_{S3})I_{ch1} + (V_{S3} - V_{S1})I_{ch2}] \\ &= V_{\alpha}I_{\beta} - V_{\beta}I_{\alpha} \end{aligned} \quad (3.8)$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le voltampère imaginaire (VAI). A partir des relations (3.7) et (3.8), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

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

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (3.10)$$

Avec :

- \bar{p} : une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- \bar{q} : une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- \tilde{p} et \tilde{q} des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

III.5.1.2.2 Séparation des puissances perturbatrices

Les grandeurs \tilde{p} et \tilde{q} , correspondent aux puissances perturbatrices aux pulsations multiples de six fois celle du réseau. Afin de ne garder que la partie relative aux harmoniques, la composante continue des puissances doit être filtrée. Pour cela, on a le choix entre un filtre passe-haut ou un filtre passe-bas.

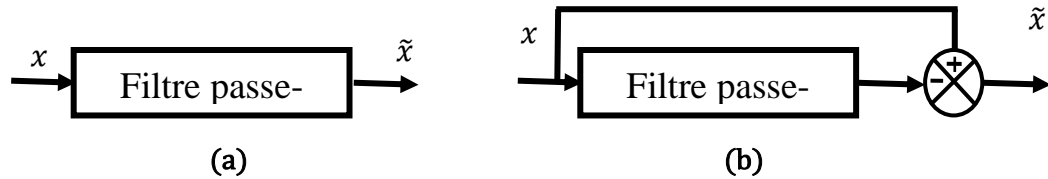


Fig.III.5 : Deux types de filtrage de p et q.

Ces deux filtres réalisent une élimination de la composante continue, mais leurs caractéristiques pour le résidu harmonique sont différentes. Le filtre (b) est plus performant que celui de (a). Le filtre (b) est donc choisi.

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Des filtres de puissance du quatrième ou cinquième ordre ont été proposés. Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du deuxième ordre qui peut être pratiquement réalisé. En effet, un ordre plus élevé entraînerait des temps de calcul plus longs [42]. La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre :

$$\frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \quad (3.11)$$

La fréquence de coupure, $f_0 = \omega_0/2\pi$, est choisie pour que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées (\tilde{x}). Elle doit aussi permettre le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale (\bar{x}).

III.5.1.2.3 Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (3.9), nous pouvons recalculer les courants dans le repère α - β comme le montre l'équation (3.12) :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

En considérant les équations (3.10) et (3.12), nous pouvons séparer le courant dans le repère α - β en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courants harmoniques}} \quad (3.13)$$

Avec $\Delta = V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2$, supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique. Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère $(\alpha-\beta)$ revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation $\alpha-\beta$ inverse. Les équations (3.14) et (3.15) montrent les calculs pour l'obtention de ces références.

$$\begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Algorithme d'identification

Finalement, l'algorithme d'identification que nous avons défini peut-être représenté par le synopsis de la figure.III.6.

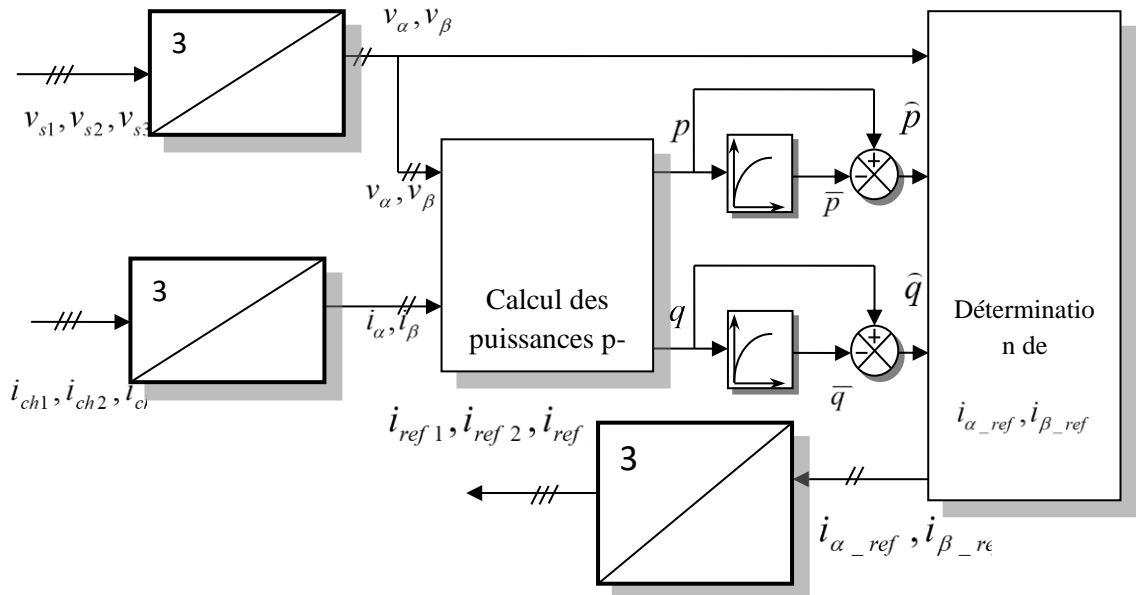


Fig.III.6 : Algorithme p-q d'identification des courants de référence.

III.5.2 Régulation de la tension continue

La tension moyenne aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. Les causes de sa variation sont essentiellement les pertes dans les interrupteurs (en conduction et en commutation), dans les inductances de découplage L_F et l'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires.

En régime permanent, la source doit fournir une puissance active égale à la puissance demandée par la charge. Lorsqu'un déséquilibre de puissance active se produit dans le système, la capacité de

stockage d'énergie doit fournir la différence de puissance entre le réseau et la charge [43]. Il en découle alors une variation de la tension continue aux bornes du condensateur alimentant le filtre actif, d'où une régulation est nécessaire afin de stabiliser la tension aux bornes du condensateur. La puissance active P_f nécessaire pour rétablir la tension du condensateur à une valeur constante est donnée par l'expression :

$$P_F = P_{CH} - P_S \quad (3.16)$$

Avec :

- P_F : puissance instantanée injectée par le filtre actif.
- P_{CH} : puissance active consommée par la charge.
- P_S : puissance active délivrée par la source.

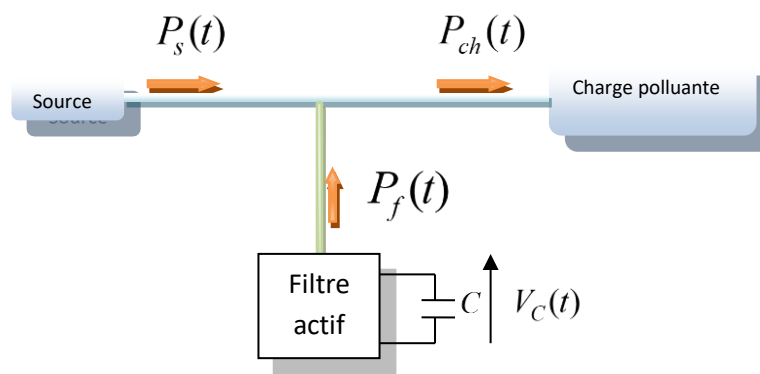


Fig.III.7 : Echange de puissance entre le réseau, la charge et le filtre.

En négligeant les pertes dans les interrupteurs et les inductances de découplage, la relation entre la puissance active absorbée par le condensateur et la tension aux bornes de celle-ci est donnée par :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_c^2 \right) \quad (3.17)$$

Notons que la relation (3.17) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension V_C autour de sa référence V_{c-ref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$P_c = C_{dc} V_{c-ref} \frac{d}{dt} (V_c) \quad (3.18)$$

En appliquons la transformée de Laplace :

$$V_c(s) = \left(\frac{1}{V_{c-ref} C_{dc} S} \right) P_c(s) \quad (3.19)$$

A partir de la relation (3.19), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_C), la boucle de régulation de la tension continue peut-être représentée par le schéma de la figure.III.8. Le choix du paramètre K_C aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif [44].

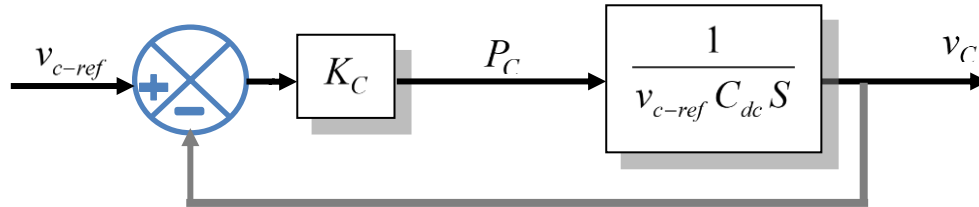


Fig.III.8 : Boucle de régulation de la tension continue.

III.5.3 La commande de l'onduleur

L'objectif de la commande de l'onduleur est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui le composent de façon à obtenir une tension de sortie, côté alternatif, qui suit le plus fidèlement possible la consigne ou tension de référence (pas forcément sinusoïdale) en minimisant ses harmoniques non désirées (harmoniques de commutation) et ce, en optimisant l'amplitude pour une tension du bus continue donnée [45]. Le choix du type de commande dépend essentiellement de deux paramètres : d'une part des caractéristiques souhaitées de la tension de sortie (distorsion admissible, spectre basse fréquence souhaité, etc.) et d'autre part de la fréquence de découpage des semi-conducteurs utilisables à la puissance de l'application. Toutefois, deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

- La commande par hystérésis.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

III.5.3.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la figure.III.8, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations.

Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis. De plus, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis [46].

Finalement, la rapidité du contrôle par hystérésis donne des performances dynamiques et statiques meilleures.

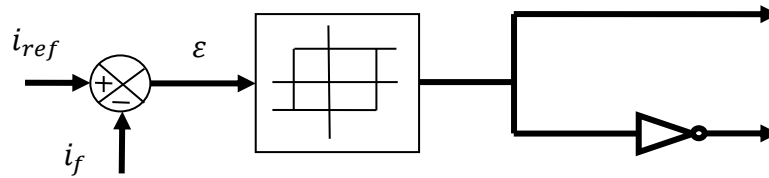


Fig.III.9 : Principe de contrôle du courant par hystérésis.

III.5.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi ce type de commande pour la simulation du filtre actif parallèle. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure.III.10.

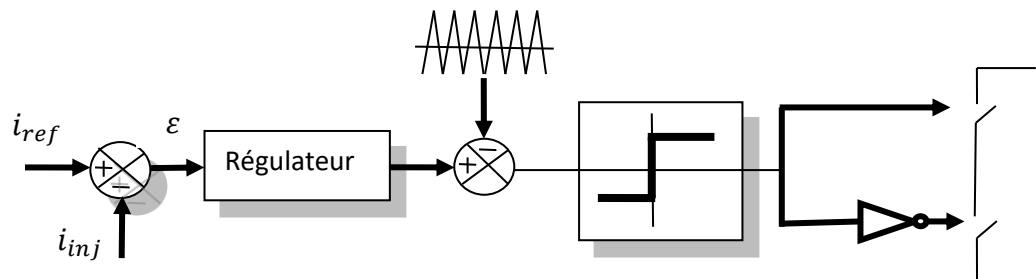


Fig.III.10 : Principe de commande des courants par MLI.

D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- La MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse.
- La MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse.

Il y a autre techniques de commande, comme la commande à modulation vectorielle. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquées à chacun des interrupteurs.

III.5.4 La régulation du courant du filtre actif parallèle

De la figure.III.3, en négligeant les effets des résistances du filtre de sortie sur le courant injecté par le filtre i_{inj} , nous pouvons écrire la relation suivante :

$$L_f \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad (3.20)$$

Notons par ΔI_f la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I_f = I_{réf} - I_{inj} \quad (3.21)$$

Des équations (3.20) et (3.21), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta I_f = \left(V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{réf} \right) - V_f \quad (3.22)$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (3.22) peut être défini comme tension de référence (V_f -ref), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{f-ref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{réf} \quad (3.23)$$

L'écart entre V_f -ref et V_f produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (3.23), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance L_f , lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de la référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la figure.III.11.

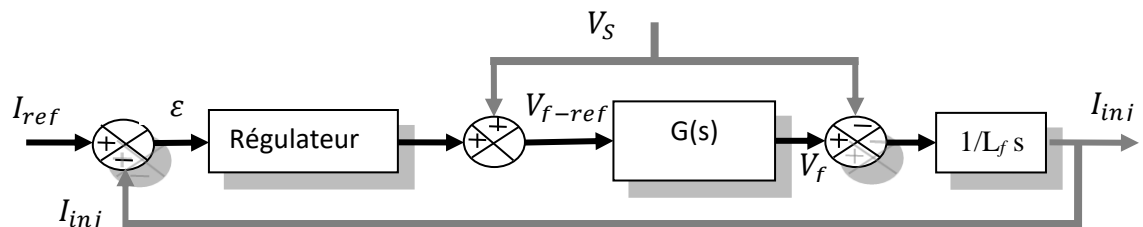


Fig.III.11 : Schéma de la régulation des courants du FAP.

Dans ce schéma, $G(s)$ représente l'onduleur (à commande MLI) qui peut être modélisé par la relation suivante [11] :

$$G(s) = \frac{V_c}{2U_p} \quad (3.24)$$

Avec :

- V_c : tension continue du condensateur de stockage d'énergie.
- U_p : amplitude de la porteuse.

(Si $V_c = 2U_p$, $G(s) = 1$) donc, la tension de sortie de l'onduleur V_f est égale à V_f -réf. Dans ce cas le schéma de la régulation simplifié est représenté par la figure.III.12 :

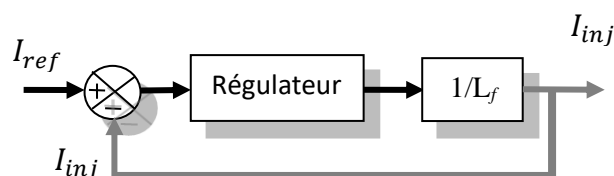


Fig.III.12 : Schéma simplifié de régulation des courants du FAP.

Le régulateur peut être un régulateur PI, floue, RST ou autre selon les objectifs généraux de la régulation ainsi qu'aux contraintes liées au rejet des perturbations [47].

III.6 Points d'insertion du filtre actif parallèle

On peut connecter le filtre actif parallèle à différents points du réseau de distribution électrique :

- Près des charges générant un niveau élevé d'harmoniques, afin d'assurer une correction locale des courants harmoniques.
- De façon centralisée, au niveau du PCC, pour une compensation globale des courants harmoniques.

Dans l'idéal, la correction des harmoniques doit être effectuée à leur point d'origine. Un certain nombre de critères financiers et techniques sont pris en compte pour assurer le choix optimal.

Principaux avantages d'une compensation locale :

- Évite la circulation des courants harmoniques dans l'installation électrique.
- Diminue l'effet des pertes par effet de Joule dans les câbles, et réduit la charge apparente sur le transformateur principal.
- Réduit la section des câbles nécessaires dans les nouvelles installations.
- Permet à l'installation d'être conforme aux normes en vigueur concernant les Harmoniques.

III.7 Conclusion

Dans ce troisième chapitre on s'est intéressé à expliquer le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle et on a donné les différentes topologies de ce dernier et sa structure générale de plus on a expliqué les différentes stratégies de commande des filtres actifs. Dans notre étude on a choisi d'identifier les courants harmoniques par la méthode des puissances instantanées p-q par la modulation de largeur d'impulsion MLI. Les résultats de simulation seront présentés et discutés au chapitre suivant.

CHAPITRE IV

SIMULATION ET DISCUSSIONS DES RESULTATS

IV.1 Introduction

L'étude théorique effectuée dans les chapitres précédents est étayée dans ce chapitre, sous des conditions que nous croyons proche de la situation réelle des réseaux électriques, à travers plusieurs simulations, avec le logiciel Matlab-Simulink, des compensateurs actifs (filtre active parallèle de distribution) compensant toutes les perturbations de tension et en courant ainsi qu'ils font face à la demande des clients à l'énergie réactive. Ceci dans le but d'étudier le bon fonctionnement de ce filtre et, de valider leur efficacité, la rapidité ainsi que les bonnes performances que notre contribution apporte à ce compensateur.

IV.2 Génération de courants de référence

Afin d'estimer la composante harmonique du courant de charge, la génération de courant injecté de référence est nécessaire. Ainsi, le courant de filtre de référence peut être obtenu lorsqu'il est soustrait du courant de charge total. À cet effet, l'analyse des puissances active et réactive dans un référentiel $\alpha\beta$ stationnaire (théorie p-q) a été utilisée [26]. Les courants de charge et les tensions de source exprimés en trame α - β sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Où i_a, i_b, i_c sont les courants de charge et e_a, e_b, e_c sont les tensions du réseau triphasé. Les puissances active et réactive instantanées dans les coordonnées $\alpha - \beta$ sont calculées avec les expressions suivantes:

$$p_c(t) = e_\alpha(t)i_\alpha(t) + e_\beta(t)i_\beta(t) \quad (4.3)$$

$$q_c(t) = e_\beta(t)i_\alpha(t) - e_\alpha(t)i_\beta(t) \quad (4.4)$$

Les puissances active et réactive instantanées peuvent être exprimées en haut. En termes de composants continus plus les composants alternatifs, c'est-à-dire :

$$p_c = \overline{p_c} + \tilde{p}_c \quad (4.5)$$

$$q_c = \overline{q_c} + \tilde{q}_c \quad (4.6)$$

Où $\overline{p_c}$ et $\overline{q_c}$ sont des composants continus dus aux courants fondamentaux tandis que \tilde{p}_c et \tilde{q}_c sont des composants alternatifs dus aux courants harmoniques.

Pour estimer les courants de référence, il faut calculer les puissances instantanées fournies par la source et le FAP à la charge. Si p_g et q_g sont les puissances instantanées réelles et imaginaires fournies par le réseau, par contre pour compenser la puissance réactive et le courant harmoniques, le FAP fournit les

puissances instantanées réelles et imaginaires p_f et q_f , la source doit fournir $p_g = \overline{p_c}$ et $q_g=0$, tandis que la composante harmonique est fournie par FAP, ainsi que q_c .

La partie oscillatoire de p_e est alimentée à la charge non linéaire par le FAP, de sorte que le courant de la source conserve sa forme d'onde sinusoïdale, tandis que la charge reçoit la même quantité de courant harmonique et fondamental [25]. Ainsi, dans le fonctionnement normal du condensateur du côté DC de l'onduleur, nous avons :

$$\begin{aligned} p_g &= \overline{p_c} \\ q_g &= 0 \\ p_f &= p_c - p_g = p_c - \overline{p_c} = \tilde{p}_c \\ q_f &= q_c - q_g = q_c \end{aligned} \quad (4.7)$$

Dans ces conditions, le FAP ne fournit que la puissance réactive. Par conséquent, le niveau de tension du condensateur est constant pendant l'état stable.

Lorsque la charge absorbe une quantité exacte de puissance $\overline{p_c}$ et si $p_g < \overline{p_c}$, le FAP fournit la partie restante pour réguler le niveau de tension continue, il est donc nécessaire de contrôler l'équilibre de puissance active entre le réseau, la charge et le FAP et nous avons :

$$\overline{p_g} + \overline{p_f} = \overline{p_c}$$

Par conséquent, les équations précédentes doivent être modifiées afin de contrôler la quantité appropriée de puissance active fournie par le PAPF, il est nécessaire d'introduire un facteur de gain k .

$$k = \frac{\overline{p_g}}{p_c}$$

Pour recharger la valeur de condensateur demandée en tension continue V_{dc} , le réseau doit fournir une quantité supplémentaire de puissance active au FAP, cas où le facteur de gain est supérieur à l'unité.

Lorsque la tension du condensateur est trop élevée, donc la puissance de réseau est inférieure à $\overline{p_c}$, donc la partie restante de $\overline{p_c}$ est fournie par le FAP à la charge [27], le cas du facteur de gain est inférieur à l'unité, Ainsi les puissances instantanées de référence pour le FAP sont :

$$\begin{aligned} p_f^* &= \tilde{p}_c + (1-k)\overline{p_c} \\ q_f^* &= q_c \end{aligned} \quad (4.8)$$

Dans ce cas, les courants de référence requis par le FAP sont calculés avec l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_f^* \\ q_f^* \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Le VSI est contrôlé de telle manière qu'il peut être utilisé pour injecter un courant sinusoïdal dans le réseau pour extraire l'énergie des cellules PEMFC dans des conditions de charge linéaires ou non

linéaires. Dans des conditions de charge non linéaires, VSI peut également être utilisé comme FAP pour la compensation harmonique et réactive. Pour contrôler les performances et l'efficacité des cellules PEMFC, le VSI est exploité sur la base du concept de la théorie p-q (figure.IV.1).

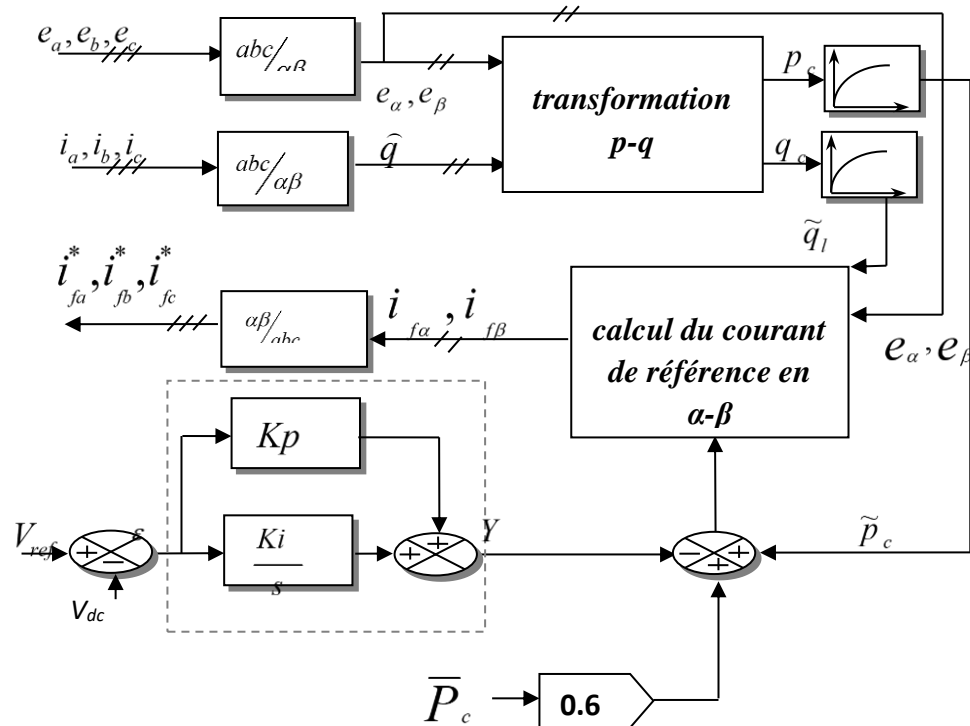


Fig. IV.1 : Schéma fonctionnel des puissances active et réactive instantanées.

IV.3 Résultats de la simulation et discussion

Afin de démontrer la validité des concepts discutés précédemment, une simulation à l'aide de l'environnement MATLAB/SIMULINK est effectuée. Le système à étudier contient une source de tension sinusoïdale triphasée avec une tension efficace de 220 volts et une fréquence de 50 Hz. Cette source fournit une charge non linéaire variable produit des harmoniques, cette charge contient un redresseur à diode triphasé avec une charge RL variable a été utilisé comme charge produisant des harmoniques (figure.IV.2). Les paramètres du système sont indiqués dans le tableau.IV.1.

Tab.IV.1 : Paramètres du système.

L'inductance de filtre Lf	0.7 mH
Dc condensateur Cdc	0.768474 mF
L'inductance de lissage Lsmooth	70 μ H
La puissance nominale de la charge variable S_N .	71.793 Kva [0s , 0.4s] 93.05 Kva [0.4s , 0.8s] 71.793 Kva [0.8s , 1.2s] 197.41 Kva [1.2s , 1.8s] 71.793 Kva [1.8s , 2.2s]

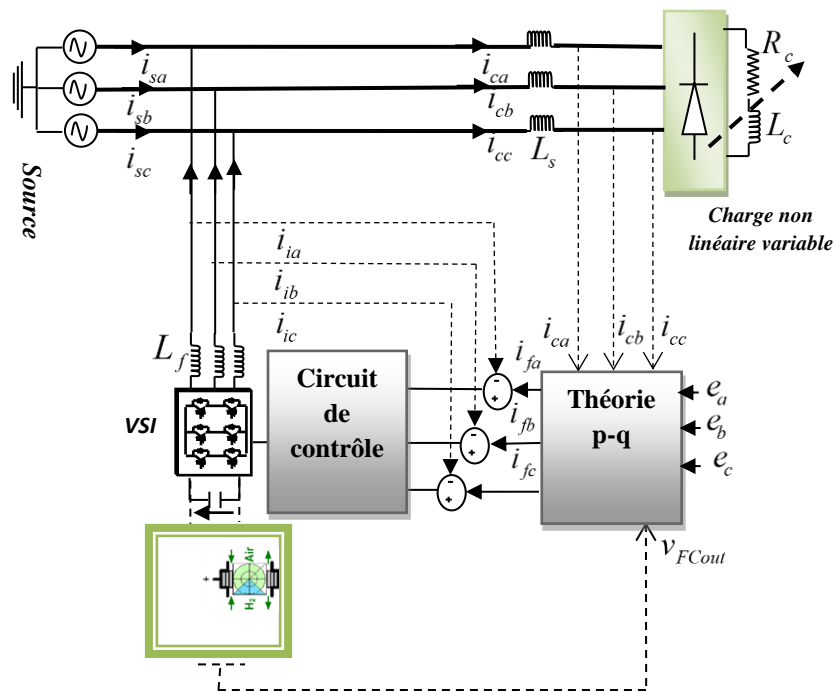


Fig.IV.2 : Structure générale du filtre active parallèle avec PEMFC.

Ce système utilise un filtre actif (FAP) en parallèle entre la source et la charge pour corriger les perturbations qui affectent le courant de la source. Le FAP est alimenté par deux piles à combustible. Chaque pile à combustible est conçue à une tension nominale de 625 V_{dc} et une puissance nominale de 50 KW. La figure.IV.3 montre la variation de puissance et de tension en fonction du courant pour chaque cellule, les deux cellules connectées en parallèle avec l'onduleur de PAPF DC/AC de 900 V_{dc}, les deux cellules consomment de l'hydrogène et de l'oxygène à des valeurs nominales constantes ($U_{f-H_2} = 99,25\%$) et oxygène ($U_{f-O_2} = 56,67\%$). Chaque pile a 900 cellule ; la tension (nerst) d'une seule cellule est d'environ 1,138 V. Pour prouver l'efficacité de ce système, nous avons mis en place une charge variable, et espérons que notre système (filtre + piles à combustible) alimente 60% de la charge et que les 40% restants soient alimentés par la source principale.

Nous avons mis en place entre l'ensemble (VSI+PAC) et le réseau un filtre de premier ordre ($L_f + R_f$), afin d'éviter l'écoulement des composants harmoniques engendrés par l'ensemble (VSI+PAC) de connexion vers le réseau.

On ajoutant que les harmoniques causés par les piles sont négligeables par rapport à celles provoqué par l'onduleur de connexion. Ces harmoniques à hautes fréquences sont générés par l'effet de commutation des interrupteurs de semi-conducteurs IGBT de l'onduleur (commande MLI).

CHAPITRE IV : Simulation et discussions des résultats

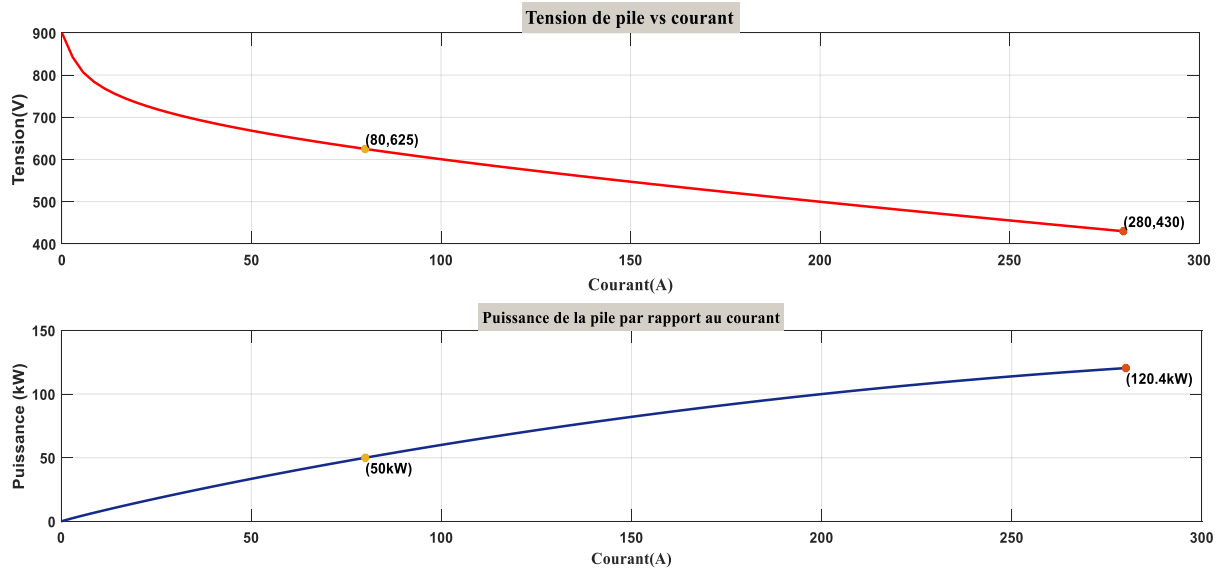


Fig.IV.3 : (a) Tension de la pile par rapport au courant, (b) Puissance de la pile par rapport au courant.

La variation représentée par une augmentation de la charge (30%, 72Kva vers 93Kva) de 0,4 seconde à 0,8 seconde, puis une diminution (23%, 93Kva vers 72Kva) de 0,8 seconde à 1,2 seconde, une augmentation de la charge (170%, 72Kva vers 200Kva) de 1,2 seconde à 1,8 seconde. Finalement, une diminution (64%, 200Kva vers 72Kva) de 1,8 seconde à 2,2 secondes. La figure.IV.4 montre les états du courant de charge. Ensuite on prend la valeur de THD pour chaque cas.

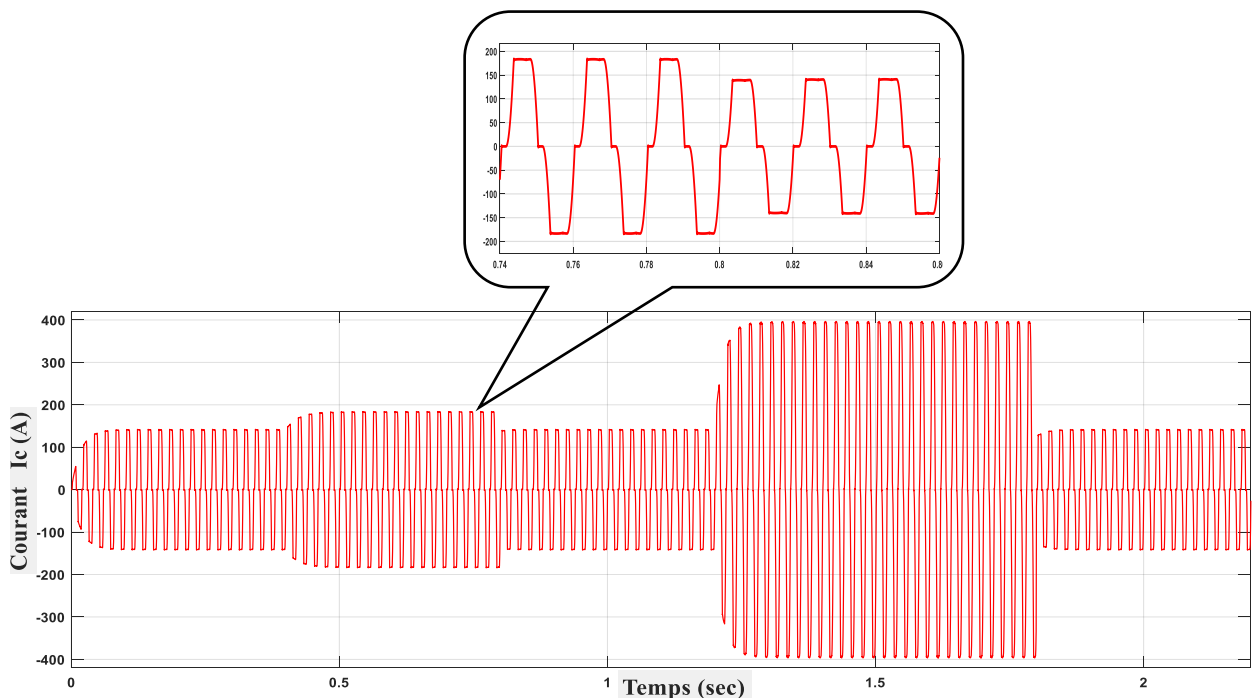


Fig.IV.4 : Courant de la charge non linéaire phase (a).

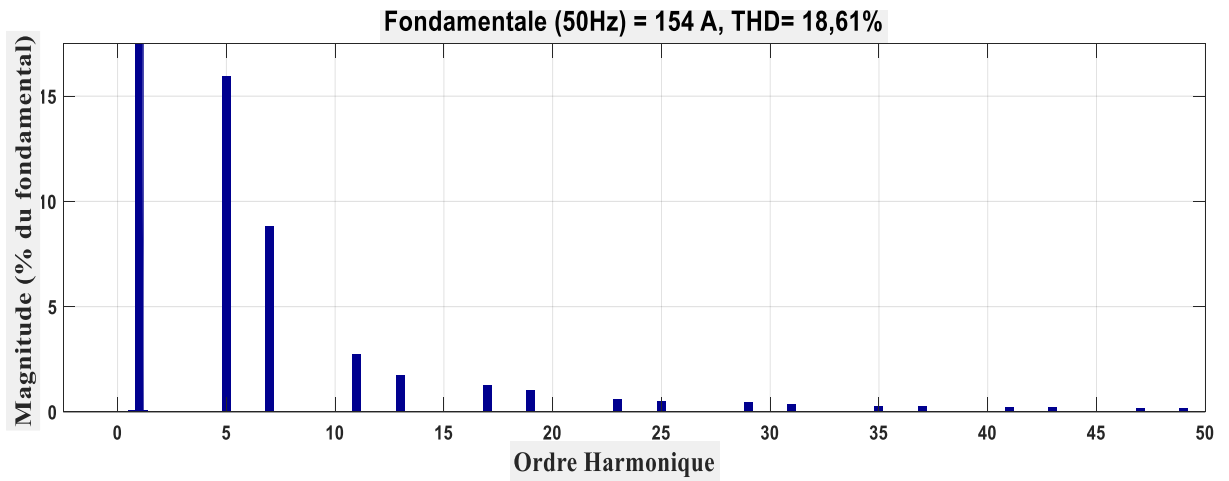


Fig.IV.5 : Spectres harmoniques de courant de charge phase (a), Signal sélectionné : 110 cycles. Fenêtre FFT : 10 cycles.

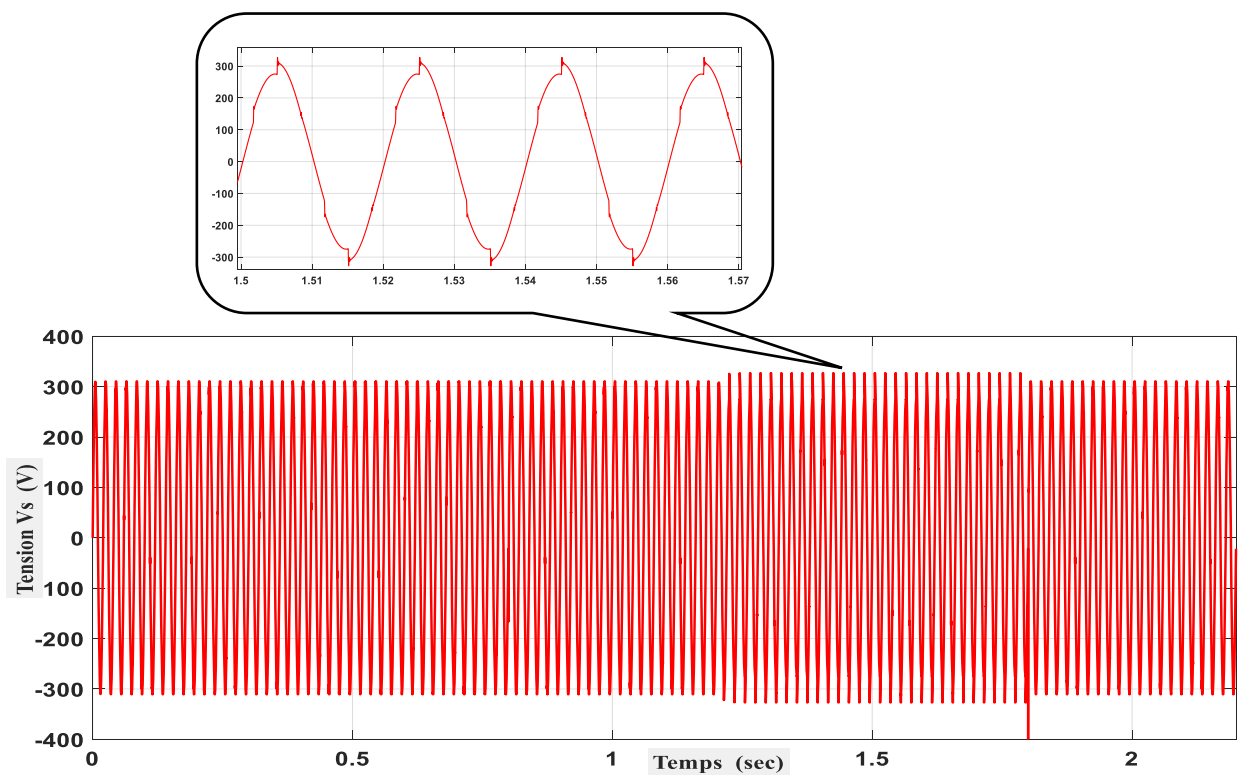


Fig.IV.6 : Tension de la source phase (a) sans Filtre active.

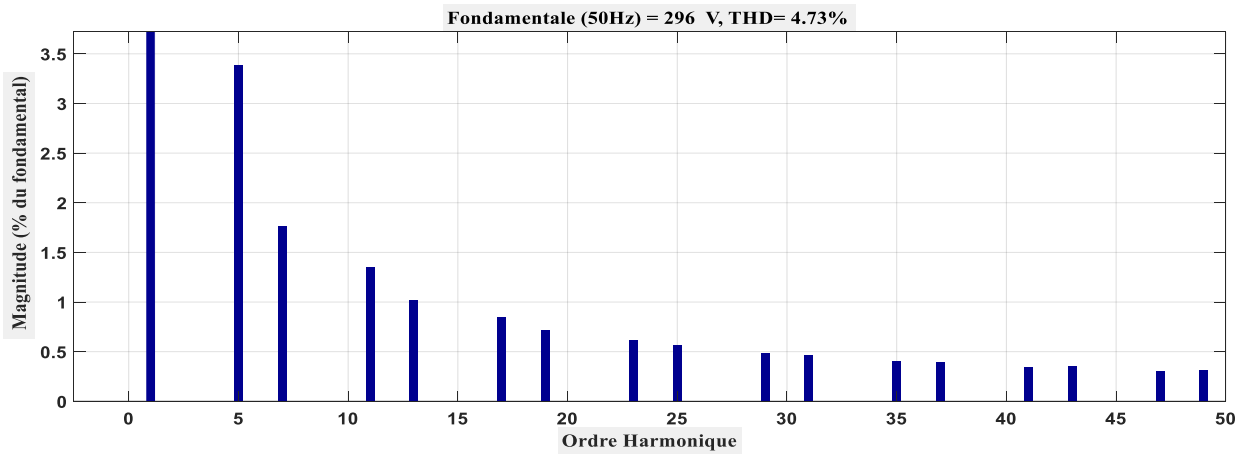


Fig.IV.7 : Spectres harmoniques de tension de source phase (a) sans Filtre active, Signal sélectionné : 110 cycles. Fenêtre FFT : 10 cycles.

On peut remarquer que la charge non linéaire perturbe le courant du réseau (figure.IV.4) de sorte que les courants harmoniques constituent $THDi = 18.6\%$ par rapport au composante fondamentale du courant, (figure.IV.5). L'écoulement de ces courants à travers l'impédance du réseau évoque des perturbations harmoniques de la tension (figure.IV.7).

Dans ce qui suit, nous considérons que nous avons connectés en parallèle le (FAP+FC) entre la charge perturbatrice et le réseau de distribution, pour protéger ce dernier contre les harmoniques de courant.

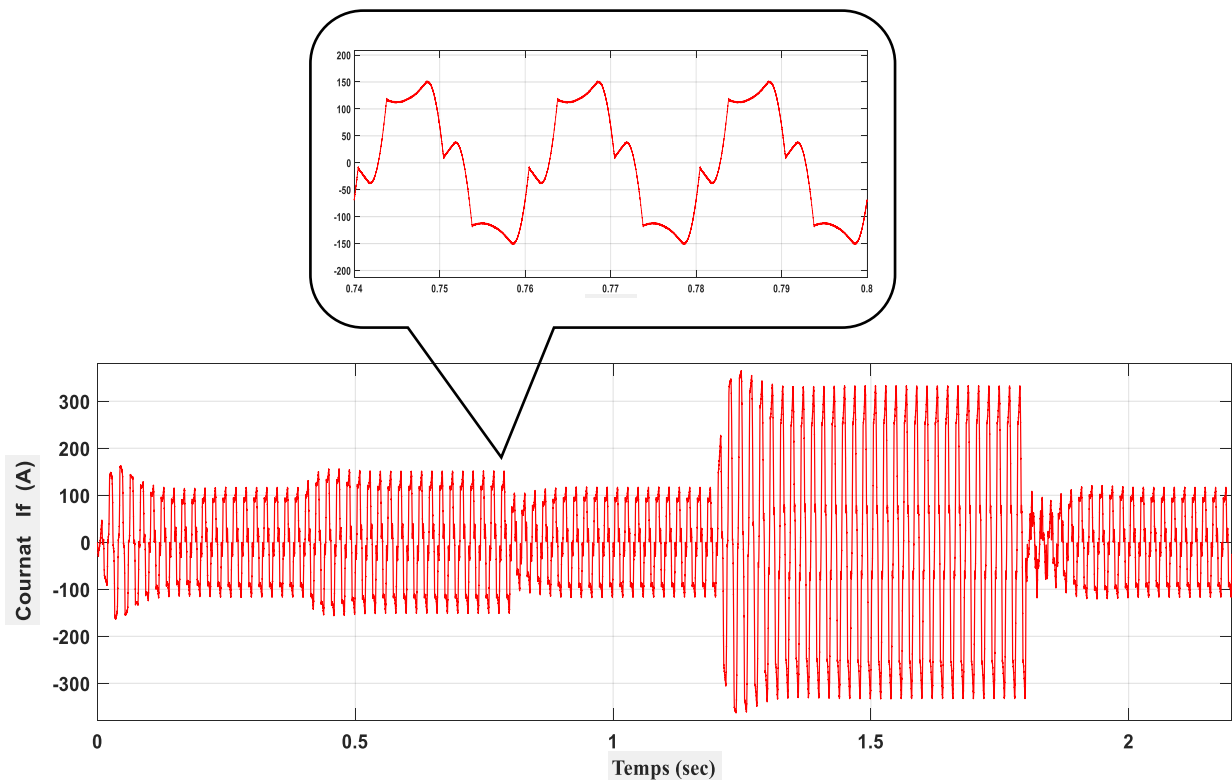


Fig.IV.8 : Courant injecté par le filtre active phase (a).

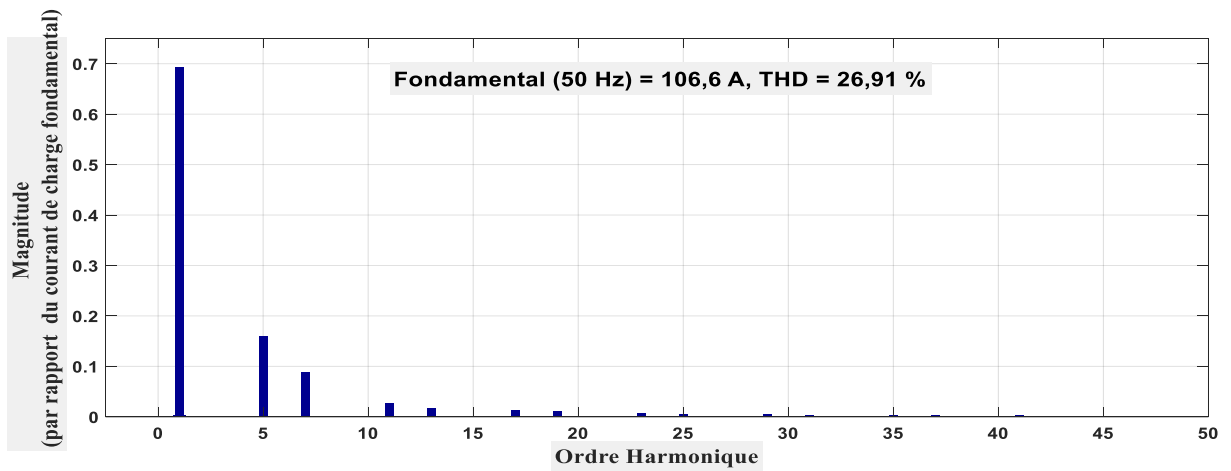


Fig.IV.9 : Spectres harmoniques de courant injecté phase (a), Signal sélectionné : 110 cycles. Fenêtre FFT : 10 cycles, magnitude (% par rapport au courant de charge fondamental).

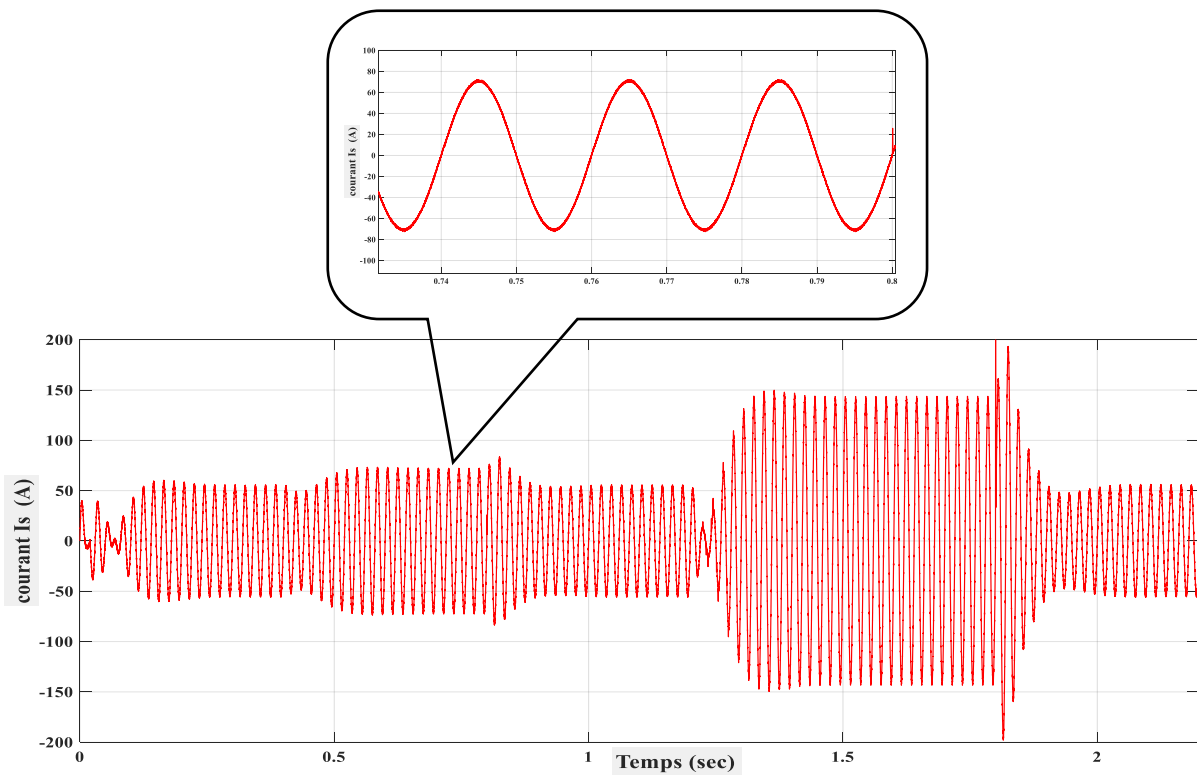


Fig.IV.10 : Courant de la source phase (a).

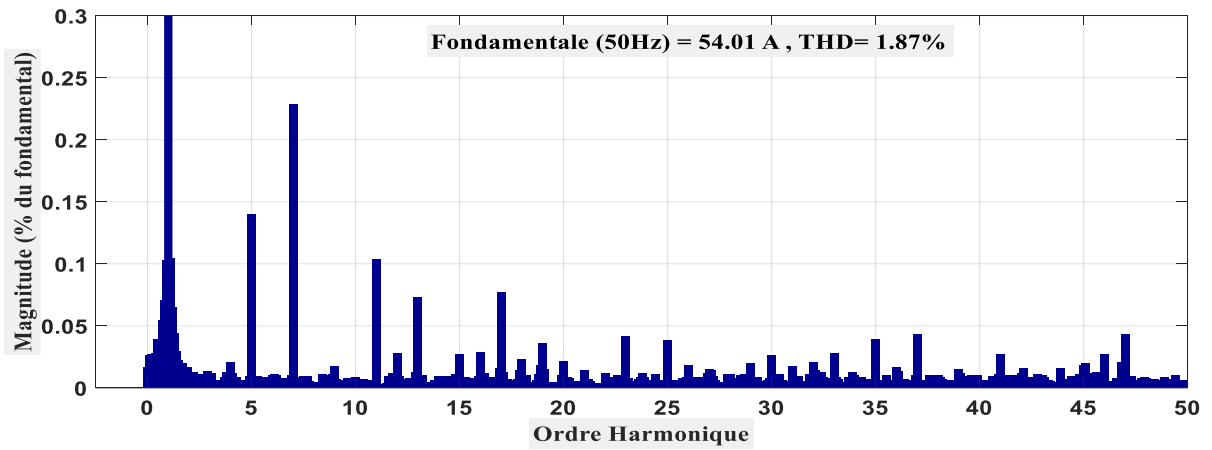


Fig.IV.11 : Spectres harmoniques de courant de source phase (a), Signal sélectionné : 110 cycles. Fenêtre FFT : 10 cycles.

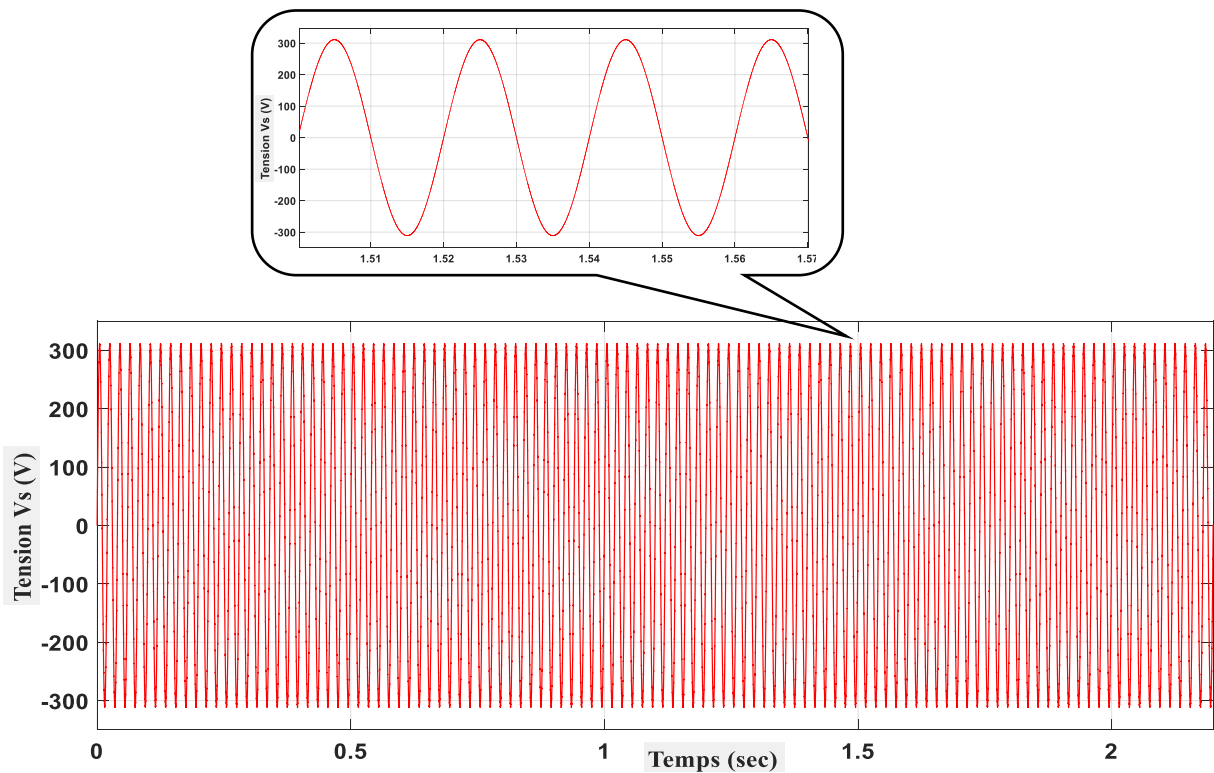


Fig.IV.12 : Tension de la source phase (a) avec Filtre active.

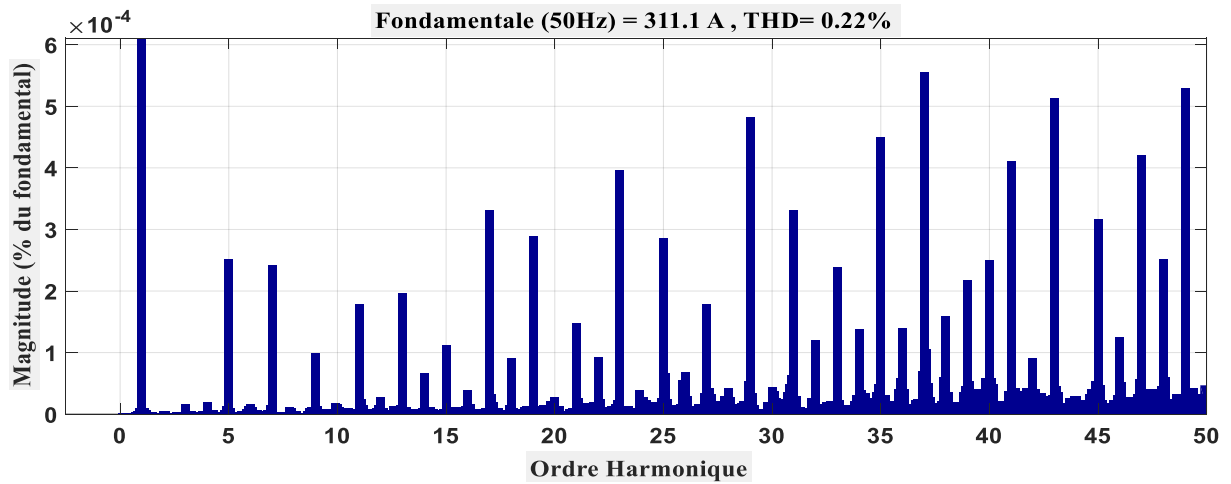


Fig.IV.13 : Spectres harmoniques de tension de source phase (a) avec Filtre active, Signal sélectionné : 110 cycles. Fenêtre FFT : 10 cycles.

Les figures précédentes montrent qu'il y a une amélioration remarquable de la forme du courant et de la tension au niveau du réseau électrique, une diminution de perturbation harmoniques de courant de source ($THDi = 18.61$ vers $THDi = 1.87$). On peut bien constater à partir des figures précédentes, que les déformations de la tension sont réduites et le THD calculé jusqu'à 2,5 KHz est diminué, voir (figures IV.11 et IV.13). Quoique la performance de filtrage ait été améliorée, en particulier avec les harmoniques de faibles fréquences, les harmoniques d'ordre élevé ont été insuffisamment amorties, une diminution de perturbations harmoniques de tension de source ($THDv = 4.73$ vers $THDv = 0.22$).

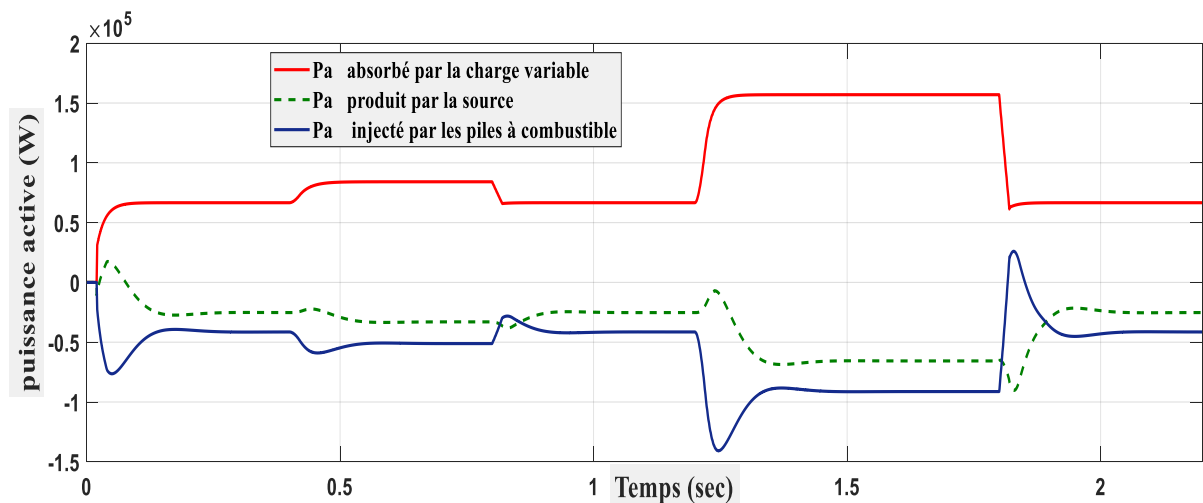


Fig.IV.14 : Flux de puissance active mutuelle entre les composants du système.

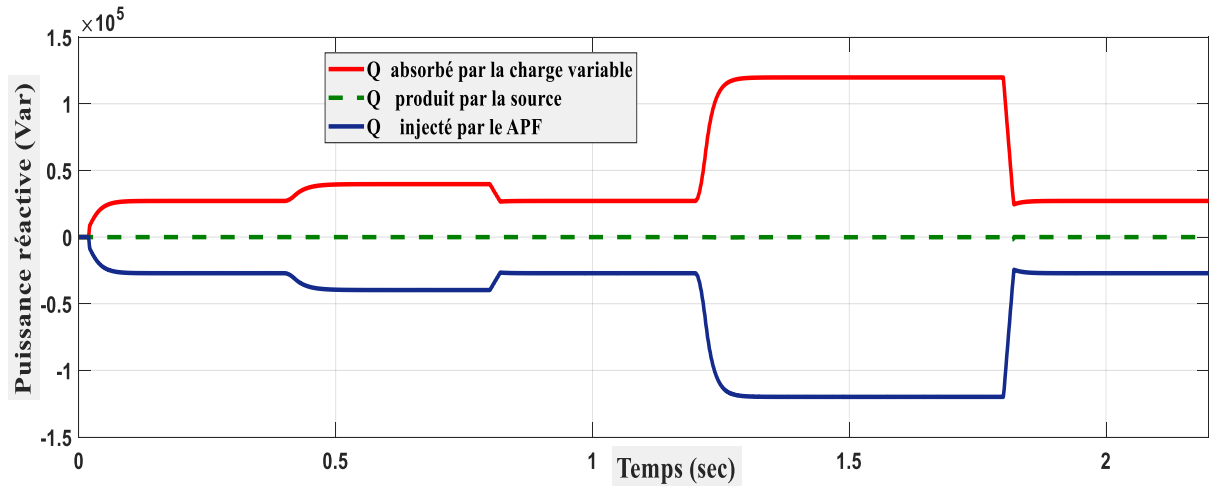


Fig.IV.15 : Flux de puissance réactive mutuelle entre les composants du système.

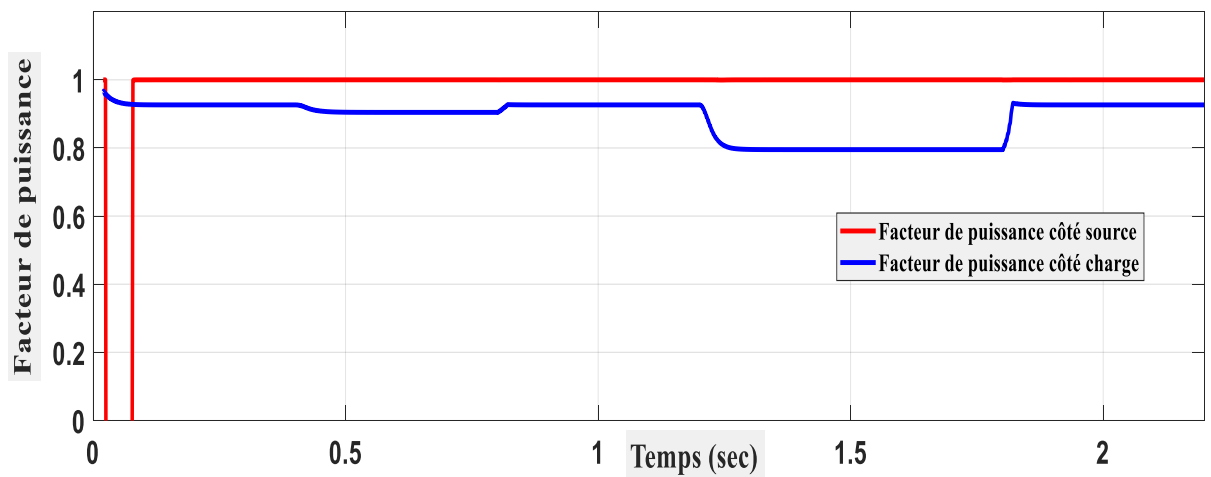


Fig.IV.16 : La variation du facteur de puissance.

En plus que le FAP protège le réseau contre les courants harmoniques, on peut remarquer selon la figure.IV.14 que le FAP injecte la puissance active des piles à combustible presque équivalent à 60% de la puissance active de la charge, et les 40% restantes est fournis par la source du réseau électrique. Ainsi que ce FAP compense également la puissance réactive requise par la charge, voir (figure.IV.15), et augmente le facteur de puissance à l'unité, (figure.IV.16).

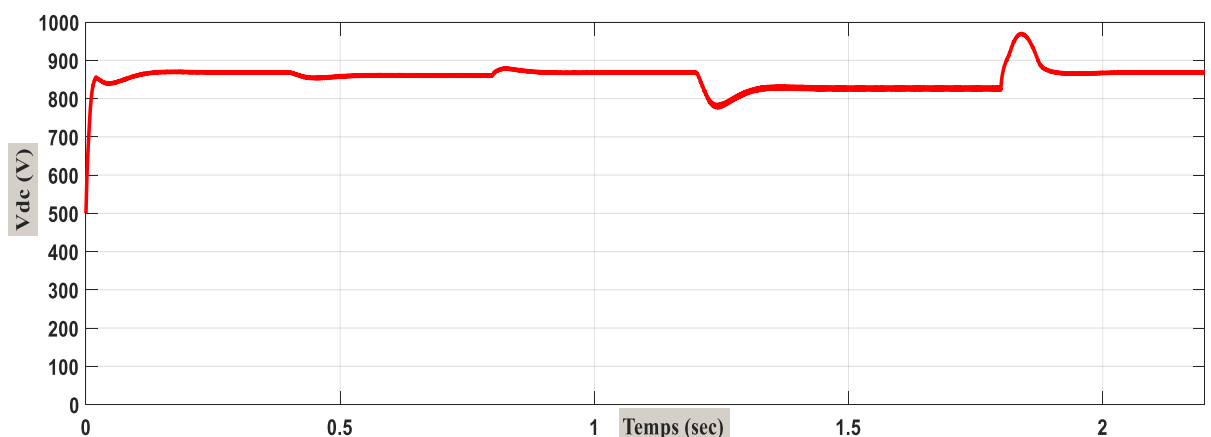


Fig.IV.17 : Tension du circuit intermédiaire Vdc.

La figure.IV.17 représente la tension contrôlée entre les bornes du condensateur. Cette tension est contrôlée par un régulateur PI qui est incorporé dans (méthode de p-q), il semble clairement que la régulation soit caractérisée par un très faible temps de montée et le temps de stabilisation presque nulle, et un dépassement qui ne dépasse pas 11%. PI présente des résultats satisfaisants au niveau du contrôle de la tension V_{DC} .

Le tableau suivant récapitule toutes les puissances traversant les éléments de ce système, en plus de cela il donne la valeur du facteur de puissance.

Tab.IV.2 : Les valeurs des puissances mutuelles entre les composants du système.

Ca s	Côté charge						Côté source						Les puissances injectées par (PAPF+FC)		$\frac{P_f}{P_c} \times 100$	
	Sc (kva)	Pc (kW)	Qc (kvar)	Fp	THD _v	THDi	Sc (kva)	Ps (kW)	Qs (kvar)	F _p	THD _v	THD _i	Sf (kva)	Pf (kW)		Qf (kvar)
1	71.79 3	66.64	27.08	0.9 2	0.28	18.6 0	25.2 2	25.2 2	0.03 4	1	0.28	1.87	49.28	41.15	27.12	61.8%
2	93.05	84.15	39.69	0.9 0	0.27	16.8 7	33	33	0.05 0	1	0.27	1.43	64.75	51.16	39.69	60.8%
3	71.79 3	66.64	27.08	0.9 2	0.28	18.6 0	25.2 2	25.2 2	0.03 4	1	0.28	0.85	49.28	41.15	27.12	61.8%
4	197.4 1	156.96	119.7 3	0.7 9	0.22	10.3 0	65.6 6	65.6 6	0.1	1	0.22	0.72	150.5 4	91.27	119.7 2	58.2%
5	71.79 3	66.64	27.08	0.9 2	0.28	18.6 0	25.2 2	25.2 2	0.03 4	1	0.28	1.87	49.28	41.15	27.12	61.8%

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats expérimentaux obtenus de notre manipulation pratique, qui sont très satisfaisants et démontrent l'efficacité de notre filtre actif parallèle par l'utilisation de la méthode des puissances instantanées P-Q.

Ces résultats prouvent que le filtre actif dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire. La chute de Taux de distorsion harmonique (THD) est remarquable après l'utilisation du filtre actif parallèle, une diminution de perturbations harmoniques de courant de source THDi =18.61 vers THDi =1.87, ainsi une diminution de perturbations harmoniques de tension de source THDv =4.73 vers THDv =0.22. Les résultats obtenus ont été très satisfaisant avec un THD conformément aux normes CEI.

En plus que le FAP réduire les harmoniques il aussi injecte la puissance active des piles à combustible presque équivalent à 60% de la puissance active de la charge ainsi qu'augmente le facteur de puissance à l'unité.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail effectué, dans ce mémoire de master, contribue à alimenter des charges non-linéaires variables avec de l'énergie provenant d'une source hybride (piles à combustible +fossile) ainsi que de compenser les courants harmoniques et réactives à l'aide d'un filtre de puissance active parallèle (PAPF) afin d'améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique.

Avant d'aller au cœur de notre objectif, au premier chapitre nous avons présenté une étude générale sur les piles à combustibles et principalement aux piles PEMFC. Les différents points abordés ont concerné leur principe de fonctionnement, l'architecture des systèmes ainsi qu'une description détaillée de chaque élément constituant une cellule.

Par la suite, nous avons analysé le problème de la pollution harmonique des réseaux électriques causée par des charges polluantes non linéaires. Après avoir soulevé la problématique de la pollution harmonique dans le réseau et les effets nuisibles qui l'accompagnent et les normes en vigueur, nous avons présenté les solutions traditionnelles pour les réduire, notamment le filtrage passif. Ce dernier présente le désavantage de ne pas pouvoir s'adapter à l'évolution du réseau et des charges polluantes. Donc, une nouvelle solution dit les solutions modernes et particulièrement le filtrage actif est adoptée compte tenu de ses avantages, citons entre autres la simplicité de la commande.

Parmi ces compensateurs actifs on trouve le filtre actif parallèle qui est l'objet de ce contexte, conçu pour assurer la compensation des harmoniques et du déséquilibre ainsi qu'assure l'injection de l'énergie chimique de la pile combustible type PEMFC aux réseaux. Dans ce type de filtrage la méthode d'identification des courants de référence est primordiale. C'est pourquoi les méthodes d'identification des courants harmoniques et techniques de commande du filtre ont été étudiées, nous avons choisi la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires (p-q) cette méthode est la plus performante, et facile à réaliser et surtout la plus adaptée à identifier d'autre types de perturbation (déséquilibre du courant, puissance réactive).

Les résultats de notre manipulation pratique obtenus par simulations (dans l'environnement Simulink /Matlab) prouvent que le filtre actif choisie peut réduire les harmoniques de courant à des valeurs inférieures à 5% qui répond aux normes internationales ; ainsi qu'une bonne compensation de l'énergie réactive, et augmente le facteur de puissance à l'unité, ce filtre adapte aux variations de la charge.

Les résultats de simulation montrent aussi que le PAPF injecte la puissance active des piles à combustible presque équivalent à 60% de la puissance active de la charge, et les 40% restantes est fournis par la source du réseau électrique

En conclusion, on peut affirmer que l'objectif de ce mémoire est atteint. Les résultats obtenus très satisfaisantes et montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle.

Liste de bibliographie

- [1] : Janet L. Sawin, Freyr Sverrisson *et al.*, *Renewables 2014 : Global status report*, 2014.
- [2] : Alana Tovey, « When stepping on the gas means hydrogen », *The Sunday Telegraph*, 6 mars 2016.
- [3] : « Énergies renouvelables : Trois ans après son installation, la pile à combustible de la Sara inaugurée en Martinique » [archive], sur *Outremers 360°*, 5 décembre 2019.
- [4] : S. Thomas et M. Zalbowitz, *Fuel Cells – Green Power*, prepared for the U.S. Department of Energy, under contract W-7405- ENG-36.
- [5] : B. Cook, “An introduction to fuel cells and hydrogen technology,” *Engineering Science and Education Journal*, vol. 11, n° 6, décembre 2002, pp. 205- 216.
- [6] : L. Carrette, K.A.Friedrich et U. Stimming, *Fuel Cells - Fundamentals and Applications*, Fuel Cells: 1 (2001) 5-39.
- [7] : P. Thounthong, S. Raël et B. Davat, “Test bench of a PEM fuel cell with low voltage static converter,” in *Proc. The 2004 Fuel Cell Seminar*, Austin (USA), 1-5 novembre, 2004, (CDROM).
- [8] : J. Larminie et A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 2003.
- [9] : W. Friede, S. Raël et B. Davat, “Mathematical model and characterization of the transient behavior of a PEM fuel cell,” *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol.
- [10] : 3M Company, 3M Membrane Electrode Assembly (MEA), http://www.3m.com/about3m/technologies/fuelcells/our_prod.jhtml.
- [11] : DuPont Company, PEM Conductive Plates,
- [12] : M.W. Ellis, M.R. Von Spakovsky et D.J. Nelson, “Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for the 21st century,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, n° 12 , décembre 2001, pp.1808-1818.
- [13] : J. J. Hwang, D. Y. Wang, N. C. Shih, D. Y. Lai et C. K. Chen, “Development of fuel-cell-powered electric bicycle,” *Journal of Power Sources*, vol. 133, n° 2, juin 2004, pp. 223-228.
- [14] : United Technologies Co., Fuel Cell: Space and Defense, disponible à : <http://www.utcfuelcells.com/space/spaceshuttle.shtm>.
- [15] : Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung, PEM fuel cell systems, http://www.zsw-bw.de/en/docs/products/pdfs/ECW_BZsys_en.pdf.
- [16] : K. R. Padiyar “Facts controllers in power transmission and distribution” 2007, New Age International (P) Ltd., Publishers, Published by New Age International (P) Ltd., Publishers.

- [17] : N.B.Saudin, “voltage sags mitigation techniques analysis” a project report submitted in partial fulfilment of the requirements for the award of the degree of Master of Engineering (Electrical – Power) Faculty of Electrical Engineering university Technology Malaysia, JUNE 2007.
- [18] : Beaulieu. S, “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.
- [19] : A. Moreno-Munoz “ Power Quality Mitigation Technologies in a Distributed Environment «British Library Cataloguing in Publication Data, Springer-Verlag London Limited 2007.
- [20] : K.mohammed racim et B.karim , “Paramètres de la qualité de la tension d’un réseau électrique étude et analyse“, mémoire d’ingénieur, Ecole nationale Polytechnique, Alger2008.
- [21] : M.Hennebel “ Valorisation des services système sur un réseau de transport d’électricité en environnement concurrentiel” Thèse de Doctorat, Soutenue le 5 février 2009.Faculté des sciences d’Orsay, université de Paris-SUD11.
- [22] : S.Beaulieu, “Etude et mise au point d’un filtre actif d’harmoniques en vue d’améliorer la qualité de l’alimentation électrique” Mémoire présentée comme exigence partielle de la Maîtrise en ingénierie, Mai 2007.
- [23] : N.Mendalek “ qualité de l’onde électrique et moyens de mitigation” Thèse comme exigence partielle à l’obtention du Doctorat en génie Ph.D, Soutenue le 14 Janvier 2003,Montréal.
- [24] : Dong-Myung Lee “A voltage sag supporter utilizing a pwm-switched autotransformer” Thèse comme exigence partielle à l’obtention du Doctorat en génie électrique Ph.D, Soutenue le 14 April 2004, School of Electrical & Computer Engineering, Institute de Technologie de Georgia, Atlanta.
- [25] : H.Sakkou“Conception d’un compensateur actif multifonctions corrigeant toutes les perturbations en générées par les charges non linéaires et les fours à arc” Thèse comme exigence partielle à l’obtention de la maîtrise en Technologie des systèmes, Soutenue le 09 Janvier 2007, École de technologie supérieure université du quebec, Montreal.
- [26] : O.Abdelkhale “Étude et simulation d’un UPQC pour l’élimination des harmoniques en temps réel dans le réseau électrique” Thèse de Doctorat En Sciences, Soutenue le 22 février 2010.Faculté des sciences et technique, Université de Béchar.
- [27] : M.A.E. Alali, “Contribution à l’Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension”, Thèse de doctorat, l’Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 12 Septembre 2002.
- [28] : B. Radibratovic “Reactive optimization of transmission and distribution networks” Thèse comme exigence partielle à l’obtention du Doctorat en génie électrique Ph.D, Soutenue le 20 Novembre 2008, School of Electrical & Computer Engineering, Institute de Technologie de Georgia, Atlanta.
- [29] : M.D. 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” Thèse comme exigence partielle à l’obtention de la maîtrise en Technologie des systèmes, Soutenue Septembre 2010, Université du Québec à Trois-Rivières.

- [30] : A. Hamadi “Contribution a l'étude des filtres hybrides de puissance utilises pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution” Thèse comme exigence partielle à l'obtention du Doctorat en génie électrique Ph.D, Soutenue le 14 Septembre 2010, , École de technologie supérieure université du québec, Montréal.
- [31] : B.Chellali “Contribution à l'Élimination des Harmoniques Par le Filtre Actif en Temps Réel dans les Réseaux Electriques” Thèse de Doctorat En Sciences, Soutenue le 5 février 2009. Faculté génie électrique, département d'électrotechnique, Université d'Oran USTO.
- [32] : A.Chandra, B. Singh, B.N. Singh, K. Al-Haddad, « An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power-factor correction, and balancing of nonlinear loads », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 3, May 2000, Page(s):495 - 507.
- [33] : A. Esfandiari, M. Parniani, H. Mokhtari, « A New control strategy of shunt active filters for power quality improvement of highly and randomly varying loads », IEEE Ind. Electronics, Vol. 2,4-7 May 2004, Page(s):1297 - 1302.
- [34] : M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun, « Energetic study of a shunt active conditioner compensating current harmonics, power factor and unbalanced », EPE-PEMC 2000, Kotic, Slovak Republic, vol. 5, pp. 211-216, September 2000.
- [35] : F.Z. Peng, H. Akagi and A. Nabae, « A study of active power filters using quad-series voltage-source PWM converters for harmonic compensation », IEEE Trans. on power electronics, vol. 5, N°1, pp. 9-15, January 1990.
- [36] : S. Guffon, « Modélisation et commandes a structure variable de filtres actifs de puissance », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 24 Juillet 2000.
- [37] : O.L. Lapena, L.G. de Vicuna, J. Matas, M. Lopez and M. Castilla, « A sliding mode control design of an active power filter with a low-pass filter as input stage », EPE-99 Lausanne, Suisse, 1999.
- [38] : H. Akagi, « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. on Industry applications, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.
- [39] : H. Akagi, « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.
- [40] : G. H. Choe, A. K. Wallace, and M. H. Park, « Control technique of active power filter for harmonic elimination, reactive power control », in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1988, pp. 859.866.
- [41] : W. M. Grady, M. J. Samotyj, and A. H. Noyola, « Survey of active power line conditioning Methodologies », IEEE Trans. Power Delivery, vol. 5, pp. 1536.1542, July 1990.
- [42] : H. Akagi, A. Nabae, S. Atoh, « Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters », IEEE Trans. on Industry applications, vol. IA-22, pp. 460-465, 1986
- [43] : M. Bojrup, « Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger Application », thesis of Lund Institute of Technology, Sweden, 1999.

[44] : S. Bala, « One cycle control of three-phase VAR compensators and active power filters », thesis of Indian Institute of Technology, Bombay, April 2003.

[45] : B. Singh, V. Verma, « A new control scheme of series active filter for varying rectifier loads », IEEE Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2003, The Fifth International Conference, Vol. 1, 17-20 Nov. 2003, Page(s):554 - 559.

[46] : L. Benchaita, « Etude par simulation numérique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande », thèse de doctorat de l'université H. Poincaré. Nancy, 1998.

[47] : M.A. Gray, « A Comparative Analysis Of Proportional-Integral Compensated And Sliding Mode Compensated Shunt Active Power Filters », thesis of Mississippi State University, USA, December 2004.