

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département de Génie Electrique  
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة الكهربائية  
المرجع: 2014/

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Doctorat en sciences**  
Spécialité : Génie Electrique

**Intégration des UPS dans le système de compensation des  
perturbations harmoniques pour une charge critique**

Présentée par :

**Benaissa Amar**

Soutenue publiquement le 30 Septembre 2014

**Devant le jury composé de :**

<b>Dr. Betka Achour</b>	<b>Professeur</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr. Moussi Ammar</b>	<b>Professeur</b>	<b>Rapporteur</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr. Rabhi Boualaga</b>	<b>MCA</b>	<b>Co-rapporteur</b>	<b>Université de Biskra</b>
<b>Dr. Bendaas Lokmane</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Batna</b>
<b>Dr. Saad Salah</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Annaba</b>
<b>Dr. Benatous Djilani</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université d'Eloued</b>
<b>Dr. M.T. Benchouia</b>	<b>Professeur</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Biskra</b>

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens d'abord à exprimer mes profondes reconnaissances et remerciements à Monsieur **MOUSSI Ammar**, mon directeur de thèse, Professeur à l'université de Biskra, pour ses conseils judicieux, ses critiques fructueuses, ses encouragements permanents.

Je remercie très vivement Monsieur **RABHI Boualaga**, co-directeur de thèse et Maître de Conférences à l'université de Biskra, pour toute la confiance qu'il m'a accordé, pour ses conseils, ses critiques pertinentes, ses encouragements permanents.

Je remercie très vivement Monsieur **BETKA Achour**, Professeur à l'université de Biskra pour l'honneur qu'il ma fait en acceptant de présider le jury de ce présent travail, malgré ses charges au niveau du département de génie électrique de Biskra, qu'il trouve ici l'expression de ma plus grande gratitude.

Je remercie très vivement Monsieur **BENDAAS Lokmane** Professeur à l'université de Batna, pour l'honneur qu'il ma fait en acceptant d'évaluer ce modeste travail, malgré ses lourdes charges au niveau de l'université de Batna, qu'il trouve ici ma reconnaissance pour sa modestie et son esprit scientifique.

Je tiens sincèrement à remercier Monsieur **SAAD Salah**, Professeur à l'université de Annaba, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être l'un des examinateur de cette thèse, malgré ses charges au niveau de l'université de Annaba, qu'il trouve ici ma reconnaissance pour sa modestie et son esprit scientifique.

J'exprime particulièrement mes reconnaissances à Monsieur **BENATOUS Djilani** , Professeur à l'université d'eloued , pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être l'un des examinateurs de cette thèse, malgré ses charges au niveau de l'université d'eloued, qu'il trouve ici ma reconnaissance pour sa modestie et son esprit scientifique.

J'exprime particulièrement mes reconnaissances à Monsieur **BENCHOUIA Mohamed Toufik** , Professeur à l'université de Biskra, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être l'un des examinateurs de cette thèse, malgré ses charges au niveau de l'université de Biskra, qu'il trouve ici ma reconnaissance pour sa modestie et son esprit scientifique.

J'exprime mes remerciements les plus sincères à Monsieur **BENKHORIS Mohamed Fouad**, Professeur à l'université de Nantes en France, pour son aide, pour ses conseils, pour ses orientations durant l'élaboration de cette thèse, pour sa modestie et de m'avoir accueilli au sein du laboratoire IREENA.

Finalement je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

## Résumé

Dans cette thèse, une PEMFC est utilisée pour améliorer les performances du filtre actif, tout en contribuant simultanément avec le réseau à fournir de l'énergie active pour une charge critique. La PEMFC remplace la batterie dans un système UPS, et s'intègre dans un système de compensation des perturbations harmoniques. L'onduleur à cinq niveaux est utilisé comme un filtre actif parallèle (FAP), en exploitant les avantages de l'onduleur multi-niveaux résolvant ainsi les problèmes de limitations des interrupteurs de puissance. L'onduleur est capable de compenser le facteur de puissance, les harmoniques de courant et peut également faire l'interface entre la source d'énergie renouvelable (PEMFC) et le réseau électrique, en injectant de l'énergie produite par la pile à combustible PEM à la charge. La stratégie de commande du filtre actif est basée sur l'utilisation des filtres multi-variables (FMV) pour la génération de courant de référence et un régulateur flou de courant. Les résultats obtenus montrent que, la pile à combustible PEM contribue simultanément avec succès à l'alimentation de la charge avec le réseau électrique et produit un courant de source sinusoïdal à faible distorsion harmonique, et en phase avec la tension de ligne.

## Abstract

In this thesis, a proton exchange membrane PEM fuel cell power plant (FCPP) is used to improve the filtering performance of the conventional active power filter, as well as simultaneously contribute with the electric grid to supply the power to the load.

The PEMFC replace the battery in a UPS system, and is integrated into a system of compensation of harmonic disturbances. The five-level inverter is used as a shunt active power filter (APF), taking advantages of the multilevel inverter such as low harmonic distortion and reduced switching losses. It is capable of compensating power factor, current harmonics and can also make the interface between renewable energy sources and the electric grid, injecting the energy generated by PEM fuel cell to the load. The active power filter control strategy is based on the use of self-tuning filters (STF) for reference current generation and a fuzzy logic current controller.

The obtained results show that, the PEM fuel cell contribute successfully to supply simultaneously the load with the electric grid and produced a sinusoidal supply current with low harmonic distortion and in phase with the line voltage.

## ملخص

في هذه الأطروحة ، استخدمنا خلايا الوقود "PEMFC" لتحسين أداء المرشح الفعال ، مع المساهمة في الوقت نفسه في تغذية الحمل . خلايا الوقود "PEMFC" تعوض البطارية في نظام "UPS" ، و تندمج في نظام تعويض الاضطرابات التوافقية . يتم استخدام المموج ذو المستويات الخمسة كمرشح فعال موازي لتخفيض التشوه التوافقي وتقليل ضياعات الطاقة كما يعوض معامل القدرة و يمكن أيضا جعله رابط بين مصدر الطاقة المتجددة ( PEMFC ) والشبكة الكهربائية عن طريق ضخ الطاقة التي تنتجها خلايا الوقود "PEMFC" إلى الحمل . تستند إستراتيجية التحكم في المرشح الفعال على مرشح متعدد المتغيرات ( FMV ) لتوليد الإشارة المرجعية و معدل المنطق الغامض ذو المرونة والاستجابة السريعة من اجل تامين التعديل وضبط التيار . أظهرت النتائج أن خلايا الوقود "PEMFC" تساهم بنجاح في وقت واحد بتغذية الحمل مع الشبكة وتجعل تيار المنبع جيبى بتشويه منخفض، ومتوافق في الطور مع الجهد.

## Liste des figures

### Chapitre I Topologies des alimentations sans interruption UPS

Fig I.1 : Alimentation sans interruption Off Line.....	06
Fig I.2 : Alimentation sans interruption On-Line (Double conversion).....	07
Fig I.3 : Alimentation sans interruption interactive serie-parallele (delta conversion).....	08
Fig.I.4 : Redresseur en pont non commandé.....	09
Fig. I.5 : Tension et courant de source pour un redresseur en pont non commandé.....	10
Fig.I.6 : Redresseur doubleur de tension non commandé.....	09
Fig.I.7 : Spectre du courant de source.....	10
Fig.I.8 : Redresseur de courant triphasé en pont commandé.....	11
Fig.I.9 : Tension et courant de source pour le redresseur en pont commandé.....	11
Fig.I.10 : Tension de sortie continue pour le redresseur en pont commandé.....	11
Fig.I.11 : Spectre du courant de source.....	11
Fig.I.12 : Onduleur en demi pont.....	12
Fig.I.13 : Onduleur en pont.....	12
Fig.I.14 : Schéma de principe d'une batterie au plomb.....	14
Fig.I.15 : UPS avec batterie connecté directement au bus continu.....	15
Fig.I.16 : UPS avec batterie connecté au bus continu à travers un convertisseur bidirectionnel.....	15
Fig.I.17 : Convertisseur bidirectionnel buck-boost CC/CC.....	16
Fig I.18 : Les ondulations en CA de non décharge.....	18
Fig I.19 : Les ondulations en CA de décharge.....	16
Fig.I.20 : Comparaison du générateur diesel classique avec un générateur à base de PAC.....	19
Fig.I.21 : Système réversible PAC - Electrolyse combinée à des générateurs d'énergies renouvelables.....	20
Fig.I.22 : Exemple d'utilisation des PAC pour une ASI quelconque.....	20

### Chapitre II Intégration d'une PEMFC dans un système UPS

Fig.II.1 : Diagramme d'une PAC.....	24
Fig.II.2 : Cellule PEM.....	25
Fig.II.3 : Structure d'un Stack PEM.....	25
Fig.II.4 : Courbe de polarisation de PAC.....	26
Fig.II.5 : Topologies d'amplification de tension.....	27
Fig.II.6 : Topologie du système proposé.....	28
Fig.II.7 : Schémas synoptique du système.....	28
Fig.II.8 : Modèle de la PEMFC.....	31
Fig.II.9 : Structure typique du hacheur elevateur CC-CC.....	33
Fig.II.10 : Filtre, Ligne et charge d'une phase.....	34
Fig.II.11 : Diagramme en bloc du controleur LQR.....	35
Fig.II.12 : Commutation de la charge (Habitat Résidentiel).....	40

Fig.II.13 : Puissances active et réactive en u.r.....	41
Fig.II.14 : Courant $I_{fc}$ sous variation de charge.....	41
Fig.II.15 : Tension $V_{fc}$ sous variation de charge.....	41
Fig.II.16 : Débit d'hydrogène.....	41
Fig.II.17 : L'angle de puissance $\delta$ .....	42
Fig.II.18 : Tension de sortie du convertisseur DC/DC.....	42
Fig.II.19 : Tension simple efficace de charge sur 230 V de base.....	42
Fig.II.20 : Le gain optimal $K_1$ .....	42
Fig.II.21 : Le gain optimal $K_2$ .....	42
Fig.II.22 : Le gain optimal $K_3$ .....	42
Fig.II.23 : Le gain optimal $K_4$ .....	43
Fig.II.24 : Le gain optimal $K_5$ .....	43
Fig.II.25 : Tension simple de sortie $V_{c1}$ avec spectre d'harmoniques.....	43
Fig.II.26 : Tensions instantanées de sorties $V_{c1}$ , $V_{c2}$ , $V_{c3}$ .....	43

## Chapitre III

### Commande du Filtre Actif parallèle associé à une PEMFC par la méthode des puissances instantanées avec des FMVs

Fig.III.1: Structure générale d'un filtre actif parallèle.....	46
Fig.III.2: Structure générale de l'association filtre actif- réseau- charge polluante.....	47
Fig.III.3: Détermination des courants de référence du filtre actif.....	52
Fig.III.4: Deux types classiques de filtres d'extraction de la composante harmonique.....	52
Fig.III.5: Principe du FMV.....	53
Fig.III.6: Détermination des courants de référence du filtre actif à l'aide de FMV.....	54
Fig.III.7: Diagramme de Bode en fonction de $K$ .....	55
Fig.III.8: Tensions $V_{\alpha\beta}$ (V) en entrées du FMV.....	55
Fig.III.9: Tensions $V_{\alpha\beta}$ (V) en sorties du FMV.....	55
Fig.III.10: Principe de la commande par MLI.....	56
Fig.III.11: Commande conventionnelle par hystérésis.....	57
Fig.III.12: Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.....	57
Fig.III.13: Schéma de principe d'un régulateur flou.....	59
Fig.III.14: Partition floue de $e$ .....	59
Fig.III.15: Partition floue de $de/dt$ .....	59
Fig.III.16: Partition floue de $cde$ .....	59
Fig.III.17: Établissement des règles floues.....	60
Fig.III.18: Boucle de régulation de la tension continue.....	62
Fig.III.19: Schéma de la régulation des courants du filtre actif.....	63
Fig.III.20: Schéma de régulation simplifié.....	63
Fig.III.21: Courant de la charge non linéaire $I_{cha}$ (A) et son spectre harmonique.....	66
Fig.III.22: Courant de source $I_{sa}$ (A) et son spectre harmonique (commande MLI).....	67
Fig.III.23: Courant $I_{fa}$ (A) injecté par le filtre.....	67
Fig.III.24: Tension du bus continu $V_{dc}$ (V).....	68
Fig.III.25: Tension $V_{fa}$ (V) à la sortie de l'onduleur de tension.....	68

Fig.III.26: Courant de source $I_{sa}$ (A) et son spectre harmonique.....	69
Fig.III.27: Courant $I_{fa}$ (A) injecté par le filtre.....	69
Fig.III.28: Tension du bus continu $V_{dc}$ (V).....	70
Fig.III.29: Tension $V_{fa}$ (V) à la sortie de l'onduleur de tension.....	70
Fig.III.30: Courant de source $I_{sa}$ (A) et son spectre harmonique.....	71
Fig.III.31: Courant $I_{fa}$ (A) injecté par le filtre.....	71
Fig.III.32: Tension du bus continu $V_{dc}$ (V).....	72
Fig.III.33: Tension $V_{fa}$ (V) à la sortie de l'onduleur de tension.....	72
Fig.III.34: Résultats de simulation du système pour un régime transitoire de la charge polluante...	73
Fig.III.35: Topologie du FAP trois bras cinq niveaux.....	75
Fig.III.36: Diagramme en bloc d'isolation d'harmoniques.....	76
Fig.III.37: Diagramme en bloc du contrôle de courant.....	77
Fig.III.38: Structure de stabilisation des tensions continues.....	77
Fig.III.39: Impulsions de commutations ( $T_{11}, T_{15}$ ).....	78
Fig.III.40: Courant de charge $I_{cha}$ (A).....	78
Fig.III.41: Tension de source $V_{sa}$ (V).....	79
Fig.III.42: Courant de source $I_{sa}$ (A).....	79
Fig.III.43: Correction du facteur de puissance $V_{sa}, I_{sa}$ .....	79
Fig.III.44: Courant injecté du FAP $I_{fa}$ .....	79
Fig.III.45: Tension de sortie du FAP $V_{ao}$ .....	79
Fig.III.46: Tension de sortie du FAP $V_{ab}$ .....	79
Fig.III.47: Tension de bus continue $V_{dc}$ .....	80
Fig.III.48: Tension $U_{c1}$ .....	80
Fig.III.49: Tension $U_{c2}$ .....	80
Fig.III.50: Tension $U_{c3}$ .....	80
Fig.III.51: Tension $U_{c4}$ .....	80
Fig.III.52: Topologie du système proposé.....	81
Fig.III.53: Topologie du hacheur elevateur CC/CC.....	83
Fig.III.54: Courant de charge $I_{cha}$ (A).....	84
Fig.III.55: Tension de source $V_{sa}$ (V).....	84
Fig.III.56: Courant de source $I_{sa}$ (A) , avec association de la PEMFC.....	84
Fig.III.57: Courant de source $I_{sa}$ (A), sans association de la PEMFC.....	84
Fig.III.58: Correction du facteur de puissance $V_{sa}, I_{sa}$ .....	85
Fig.III.59: Tension de sortie du FAP $V_{ao}$ .....	85
Fig.III.60: Tension de sortie du FAP $V_{ab}$ .....	85
Fig.III.61: Tension du bus continu $V_{dc}$ .....	85
Fig.III.62: Tension $U_{c1}$ .....	85
Fig.III.63: Tension $U_{c2}$ .....	85
Fig.III.64: Tension $U_{c3}$ .....	86
Fig.III.65: Tension $U_{c4}$ .....	86
Fig.III.66: Puissance active et réactive de la charge.....	86
Fig.III.67: Puissance active et réactive de la source.....	86
Fig.III.68: Puissance active et réactive du FAP.....	86

## Chapitre IV

### Intégration d'une UPS dans un système de compensation des perturbations harmoniques

Fig.IV.1: Intégration d'une PAC dans un système ASI.....	89
Fig.IV.2: Topologie du système proposé.....	90
Fig.IV.3: Diagramme en bloc de calcul des courants de références.....	91
Fig.IV.4: Impulsions de commutations ( $T_{11}, T_{15}$ ).....	92
Fig.IV.5: Courant de charge $I_{cha}$ (A).....	92
Fig.IV.6: Tension de source $V_{sa}$ (V).....	93
Fig.IV.7: Courant de source $I_{sa}$ (A).....	93
Fig.IV.8: Correction du facteur de puissance $V_{sa}, I_{sa}$ .....	93
Fig.IV.9: Courant injecté du FAP $I_{fa}$ .....	93
Fig.IV.10: Tension de sortie du FAP $V_{ao}$ .....	93
Fig.IV.11: Tension de sortie du FAP $V_{ab}$ .....	93
Fig.IV.12: Tension de bus continue $V_{dc}$ .....	94
Fig.IV.13: Tension $U_{c1}$ .....	94
Fig.IV.14: Tension $U_{c2}$ .....	94
Fig.IV.15: Tension $U_{c3}$ .....	94
Fig.IV.16: Tension $U_{c4}$ .....	94
Fig.IV.17: Puissances Active et réactive de la charge.....	94
Fig.IV.18: Puissances Active et réactive du FAP.....	95
Fig.IV.19: Puissances Active et réactive de la source.....	95

## Nomenclatures

ASI	:	Alimentation Sans Interruption
IEC	:	International Electrotechnical Commission
UPS	:	Uninterruptible Power Supply
THD	:	Total Harmonic Distortion
MOSFETs	:	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
IGBTs	:	Insulated Gate Bipolar Transistor
EP	:	Electronique de Puissance
VRLA	:	Valve Regulated Lead-Acid
PAC	:	Piles A Combustible
PEMFC	:	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PAFC	:	Phosphoric Acid Fuel Cell
SOFC	:	Solid Oxide Fuel Cell
MCFC	:	Molten Carbonate Fuel Cell
AFC	:	Alkaline Fuel Cell
DMFC	:	Direct Methanol Fuel Cell
LQR	:	Linear Quadratic Regulator
FMV	:	Filtre Multi-Variable
MLI	:	Modulation de la Largeur d'Impulsion
NPC	:	Neutral Point Clamped
FAP	:	Filtre Actif Parallèle
FPB	:	Filtre Passe Bas
FPH	:	Filtre Passe Haut
$N_0$	:	Nombre de cellules par stack
$E_0$	:	Tension à vide (V)
F	:	Constante de Faraday (C/kmol)
B, C	:	Constante tension d'activation dans la PEMFC ( $A^{-1}$ ) et (V)
$K_r$	:	Constante (kmol/s A)
$K_{H_2}$	:	Constante molaire de valve d'hydrogene (kmol/s atm)
$K_{H_2O}$	:	Constante molaire de valve d'eau (kmol/s atm)
$K_{O_2}$	:	Constante molaire de valve d'oxygene (kmol/s atm)
$P_{H_2}$	:	Pression partielle d'hydrogène (atm)

$P_{H_2O}$	:	Pression d'eau partielle (atm)
$P_{O_2}$	:	Pression partielle d'oxygène (atm)
$q_{H_2}$	:	Débit molaire d'hydrogène (kmol/s)
$q_{O_2}$	:	Débit molaire d'oxygène (kmol/s)
$R$	:	Constante des gaz universelle (J/kmol K)
$R^{int}$	:	Résistance interne du stack ( $\Omega$ )
$T$	:	Température absolue (K)
$\tau_{H_2}$	:	Constante de temps d'hydrogène (s)
$\tau_{H_2O}$	:	Constante de temps d'eau (s)
$\tau_{O_2}$	:	Constante de temps d'oxygène (s)

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : TOPOLOGIES DES ALIMENTATIONS SANS INTERRUPTION UPS</b>	<b>4</b>
I.1 Introduction.....	5
I.2 Classifications des alimentations sans interruption statiques.....	5
I.2.1 Alimentation sans interruption statique "off-line".....	5
I.2.2 Alimentation sans interruption statique à double conversion "on-line".....	6
I.2.3 Alimentation sans interruption statique interactive.....	8
I.3 Les convertisseurs utilisés dans les UPS.....	8
I.3.1 Redresseurs .....	8
I.3.2 Onduleurs.....	11
I.3.3 Batterie pour UPS.....	12
I.3.3.1 Historique .....	13
I.3.3.2 Présentation des batteries au Plomb.....	13
I.3.3.3 Chargeur de batterie.....	15
I.3.3.4 Caractéristiques de la batterie UPS.....	17
I.3.3.5 Problèmes .....	17
I.3.3.6 Catégories d'échec.....	18
I.4 Éléments susceptible de remplacer les batteries UPS .....	18
I.4.1 Applications stationnaires .....	19
I.4.1.1 Charge isolée.....	19
I.4.1.2 Combinaison avec des énergies renouvelables.....	19
I.4.1.3 Alimentation sans interruption.....	20
I.5 Conclusion .....	21
<b>CHAPITRE II : INTEGRATION D'UNE PEMFC DANS UN SYSTEME UPS</b>	<b>22</b>
II.1 Introduction.....	23
II.2 Principe de fonctionnement des PAC .....	23
II.3 Différents types des piles à combustible .....	24
II.3.1 PEMFC.....	25
II.4 Caractéristique statique- nature d'une source non linéaire .....	25
II.5 Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie de la pile au réseau .....	27
II.5.1 Topologies .....	27
II.5.2 Modélisation de la pile à combustible .....	28
II.5.2.1 Modèle dynamique de la pile .....	29
II.5.2.2 Expression des pressions partielles.....	29
II.5.2.3 Considérations générales pour un fonctionnement optimal.....	32
II.5.3 Hacheur élévateur CC/CC.....	33
II.5.4 Commande du convertisseur CC/CA.....	34
II.5.4.1 Description du modèle.....	34
II.5.4.2 Contrôleur linéaire quadratique.....	35
II.6 Résultats et discussions.....	40
II.7 Conclusion .....	43

<b>CHAPITRE III : COMMANDE DU FILTRE ACTIF PARALLELE ASSOCIE A UNE PEMFC</b>	<b>45</b>
III.1 Introduction.....	46
III.2 Structure générale : filtre actif parallèle -réseau-charge polluante.....	47
III.3 Commande du filtre actif .....	48
III.3.1 Identification des courants harmoniques de référence.....	49
III.3.1.1 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.....	49
III.3.1.2 Performances du FMV.....	54
III.3.2 Techniques de commande de l'onduleur du filtre actif.....	55
III.3.2.1 Commande par MLI à échantillonnage naturel .....	56
III.3.2.2 Commande par hystérésis .....	56
III.3.2.3 Commande par logique floue .....	57
III.3.3 Régulation des filtres actifs.....	61
III.3.3.1 Régulation de la tension continu .....	61
III.3.3.2 Régulation du courant du filtre actif.....	62
III.4 Calcul des paramètres du système (réseau-filtre actif-charge polluante).....	64
III.5 Résultats de simulation du système étudié.....	65
III.5.1 Résultats de simulation dans le cas du contrôle par MLI .....	66
III.5.2 Résultats de simulation dans le cas du contrôle par hystérésis.....	68
III.5.3 Résultats de simulation dans le cas du contrôle par logique floue.....	70
III.5.4 Etude du comportement du filtre actif en régime transitoire .....	73
III.5.5 Filtre actif parallèle trois bras cinq niveaux.....	74
III.5.5.1 Introduction.....	74
III.5.5.2 Schéma de la structure étudiée .....	75
III.5.5.3 Calcul des courants de références.....	76
III.5.5.4 Contrôle de l'onduleur de tension .....	76
III.5.5.5 Stabilisation de la tension continue des condensateurs.....	77
III.5.5.6 Résultats et discussion.....	77
III.5.6 Association PEMFC-FAP .....	81
III.5.6.1 Schéma de la structure étudiée .....	81
III.5.6.2 Calcul des courants de références.....	82
III.5.6.3 Hacheur élévateur CC/CC .....	83
III.5.6.4 Résultats et discussion .....	83
III.6 Conclusion.....	87
<b>CHAPITRE IV : INTEGRATION D'UNE UPS DANS UN SYSTEME DE COMPENSATION DES PERTURBATIONS HARMONIQUES</b>	<b>88</b>
IV.1 Introduction.....	89
IV.2 Configuration du système.....	89
IV.3 Schéma de la structure étudiée.....	90
IV.4 Calcul des courants de références.....	90
IV.5 Contrôle de l'onduleur de tension.....	91
IV.6 Stabilisation de la tension continue des condensateurs.....	91
IV.7 Hacheur élévateur CC/CC.....	91
IV.8 Résultats et discussion.....	92
IV.9 Conclusion .....	95
<b>CONCLUSION GENERAE</b> .....	<b>96</b>
ANNEXES	
BIBLIOGRAPHIES	

## Introduction Générale

L'énergie électrique en terme de qualité tels que sa disponibilité, absence de pollution est devenue un élément indispensable même vital dans certain domaine d'importances particulières à savoir les hôpitaux, les services de réanimation, les tours de contrôle des aéroports, les ordinateurs de banques, les systèmes de sécurité des réacteurs nucléaires ; il est évident qu'une légère défaillance d'alimentation en énergie dans ces milieux hypersensibles peut mettre en péril la santé, la sécurité, et même la vie des individus.

Ces charges critiques nécessitent l'absence des micro-coupures et exigent une grande stabilité d'amplitude et de fréquence, d'ou il faut prévoir une alimentation auxiliaire qui assume le rôle de la source principale, lorsque cette dernière subit une perturbation ou une coupure totale. Cette alimentation est appelée alimentation sans interruption (UPS) .

En matière de configuration les UPS peuvent être classées en trois grandes catégories : on-line (double conversion), off-line et interactives [1].

Pour les UPS "on-line", la charge est continuellement alimentée par l'onduleur. Leurs principales caractéristiques sont : bonne qualité de tension, rendement médiocre, durée de vie réduite et prix élevé. Cependant dans ce type de configuration, l'ensemble redresseur, batterie et onduleur constitue une charge non linéaire vis-à-vis le réseau et par la suite une source de pollution en harmoniques.

Pour ce qui est des UPS "off-line", l'alimentation de la charge est omnie assurée par le réseau. En cas de défaillance, l'onduleur remplace le réseau. Leurs principales caractéristiques sont : prix abordable, rendement élevé et longue durée de vie. Cependant dans ce type de configuration, et pour remédier au problème de pollution du réseau en harmoniques le redresseur pourra être commandé en filtre actif durant la présence du réseau tout en assurant la charge de la batterie.

Dans les systèmes interactifs, notamment la topologie Delta conversion, les convertisseurs série-parallèle peuvent être exploités en filtre actif série-parallèle en mode veille contribuant ainsi à la dépollution en harmoniques du réseau électrique.

Les caractéristiques les plus importantes des systèmes UPS sont leur fiabilité et leur disponibilité. Le composant qui influence cette caractéristique est très nettement la batterie.

Les batteries sont parmi les parties les plus importantes dans les systèmes UPS. Même si la conception des circuits électroniques de puissance est bonne, quand les batteries ne fonctionnent pas correctement, le système UPS entier n'accomplit pas son rôle, d'autre part leurs effets néfastes sur l'environnement, ont orienté la recherche vers une source d'énergie renouvelable telle que les piles à combustible (PAC) en vue de remplacer l'élément de stockage de l'énergie dans les systèmes UPS.

De plus nos réseaux électriques doivent inclure un large nombre de producteurs utilisant les énergies renouvelables comme source, nous citons les panneaux solaires, les centrales éoliennes, les piles à combustibles et ce selon les orientations du protocole Kyoto et d'autres accords internationaux.

Dans ce travail nous proposons une UPS capable non seulement à injecter dans le réseau électrique de l'énergie produite par une pile à combustible mais aussi à la compensation simultanée du facteur de puissance, et des courants harmoniques (filtre actif parallèle).

Le travail présenté dans cette thèse porte sur l'étude de l'intégration d'une PEMFC dans un système UPS en vue de remplacer l'élément de stockage d'une part et d'assurer la compensation des perturbations harmoniques d'autre part.

Ce présent travail s'articule autour de quatre chapitres : Le premier chapitre sera consacré aux topologies des UPS. Nous mettrons les points sur les avantages et inconvénients de leurs associations dans le réseau électrique d'une part et la possibilité de remplacement de l'élément de stockage de l'énergie (batteries) par une source d'énergie renouvelable d'autre part.

Le second chapitre portera sur l'intégration de la pile à combustible dans un système UPS en vue de remplacer l'élément de stockage de l'énergie (batteries) qui constitue une partie déterminante dans les systèmes UPS. Pour valider l'objet de recherche dans ce chapitre une application concernant l'alimentation d'un groupe d'habitat assurée par une Pile à membrane polymère échangeuse de protons (PEMFC) de 45 kW, est réalisée sous MATLAB SIMULINK.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude du filtre actif parallèle (FAP) et de son

association au PEMFC. La présentation de la méthode des puissances instantanées et sa variante en utilisant le filtre multi-variables (FMV), les techniques de commande nous citons MLI naturelle, hystérésis conventionnelle et logique flou seront étudiées et simulées sous MATLAB SIMULINK. Enfin deux applications d'importances particulières sur le filtrage actif parallèle cinq niveau, trois bras sans et avec l'association de la PEMFC seront présentées sous MATLAB SIMULINK, et ce pour valider l'efficacité des stratégies de contrôle proposé, les avantages des topologies multi niveaux de l'onduleur de tension d'une part et l'apport de l'association de la PEMFC d'autre part.

Le quatrième chapitre sera consacré à l'intégration d'une UPS dans un système de compensation des perturbations harmoniques pour une charge critique. Dans ce chapitre la PEMFC remplace l'élément de stockage de l'énergie dans les systèmes UPS et l'onduleur de tension assure la dépollution du réseau en harmoniques de courant tout en contribuant avec le réseau à l'alimentation de la charge critique injectant ainsi de la puissance active.

Enfin, nous concluons sur des perspectives basées principalement sur les résultats obtenus.

# **Chapitre I**

## **Topologies des alimentations sans interruption UPS**

## I.1 Introduction

À la fin des années 1990, la croissance des entreprises basées sur Internet, qui dépendent fortement sur les serveurs et autres équipements informatiques a entraîné une demande croissante en infrastructures électriques capables de protéger les équipements sensibles contre les coupures (aussi courtes que 1,5 cycles). La nécessité d'une alimentation conditionnée continue en raison de la dépendance accrue sur l'équipement commandé par ordinateur dans des domaines tels que la médecine, la bio-technologie et la fabrication de semi-conducteurs. Même les processus de l'ancienne économie comme revêtement, la peinture et l'usinage ont maintenant un seul ordinateur qui commande l'opération de finition avec un coût extrêmement élevé de produits finis (tels que les revêtements sur des aubes de turbines à gaz). Les Alimentations Sans Interruption (ASI) sont utilisés pour améliorer la qualité de la source d'alimentation ainsi que la protection de ces charges critiques contre les perturbations, telles que les décalages de fréquence, les pics de tension et les interruptions [1]. Il existe trois grands types d'UPS spécifiés par la norme IEC 62040-3

- Off-line (passive standby) (IEC 62040-3.2.20)
- On-line (Double conversion) (IEC 62040-3.2.16)
- Interactive (IEC 62040-3.2.18)

Ce chapitre portera sur l'étude des alimentations sans interruption statique (UPS), notamment en matière de topologies, constitution et stratégies de contrôle. Ainsi nous mettrons le point sur le remplacement de l'E.S (élément de stockage de l'énergie) par une source d'énergie renouvelable (PEMFC).

## I.2 Classifications Des Alimentations Sans Interruption Statiques

### I.2.1 Alimentation sans interruption statique "off-line"

Dans cette topologie figure I.1, l'unité de contrôle surveille en permanence la tension et la fréquence du réseau principal pour déterminer si elles sont dans les limites spécifiées. Si les paramètres du réseau sont à  $\pm 10\%$ , la charge est alimentée directement par le biais du commutateur statique à action rapide. Au cours de ce mode (mode veille) l'onduleur reste sous tension mais ne fournit pas de puissance à la charge. Le chargeur de batterie maintient la tension des batteries pendant ce temps.

En cas de défaillance du réseau ou si les paramètres d'alimentation ne sont pas dans les limites spécifiées, la charge est basculée via un commutateur statique sur l'onduleur. Sous cette condition (mode d'énergie stockée) l'onduleur alimenté par la batterie fournit la puissance à la charge.

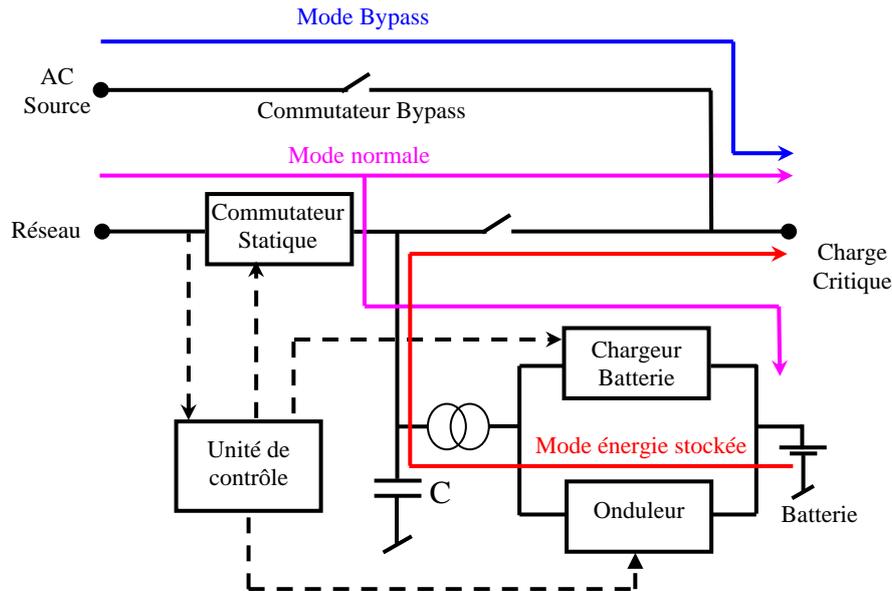


Fig I.1 Alimentation sans interruption Off-Line

L'inconvénient majeur de cette topologie est qu'elle ne conditionne pas l'énergie du réseau principal en ce mode (off-line). Ainsi, dans cette topologie le transfert au mode énergie stockée est très fréquent. Cependant, un avantage majeur de cette topologie réside dans sa simplicité de commande, à rendement élevé et à faible coût.

### I.2.2 Alimentation sans interruption statique à double conversion (on-line)

Dans les grandes installations d'énergie vitales, telles que les centres de données, l'utilisation des ASI à double conversion a toujours été considérée comme le meilleur choix pour alimenter les charges critiques avec un niveau élevé de protection contre pratiquement tous les types de perturbations du réseau électrique.

Trois modes de fonctionnement sont possibles dans cette topologie figure I.2, à savoir "le mode normal", "le mode d'énergie stockée" et "le mode by-pass". En mode normal, la charge est alimentée en continu par une combinaison redresseur - onduleur, qui réalise la double conversion (CA/CC, puis CC/CA). L'onduleur passe en mode énergie stockée en cas de défaillance du réseau principal ou si les paramètres d'alimentation ne sont pas dans les limites spécifiées. L'onduleur et la batterie continuent à supporter la charge dans ce mode. L'UPS fonctionne en mode énergie stockée jusqu'à ce qu'au l'épuisement des batteries ou jusqu'au retour de l'alimentation principale à son niveau de tolérance spécifiée.

Ce type d'ASI est généralement équipé d'un commutateur statique, ce qui permet le transfert instantané de la charge au réseau principal.

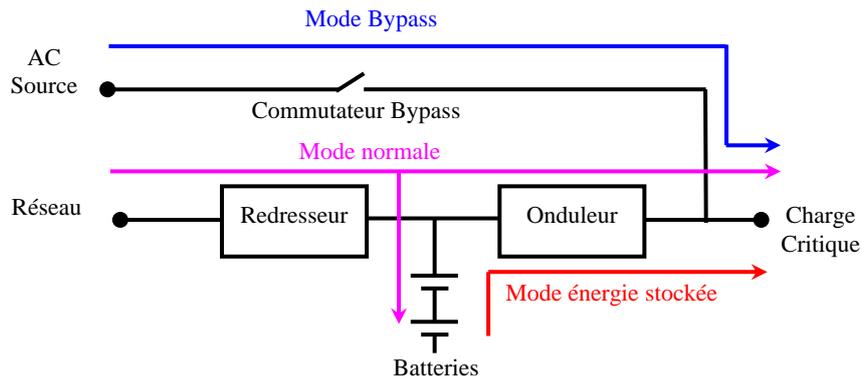


Fig I.2 Alimentation sans interruption On-Line (Double conversion)

Ce commutateur est utilisé dans le cas d'un dysfonctionnement dans la chaîne de la double conversion (CA/CC- CC/CA). Cependant, le retour de l'alimentation principale (réseau) exige une synchronisation entre celle-ci et l'onduleur pour permettre un transfert lisse sans aucune interruption.

Pour supporter toute la puissance de la charge et éviter la décharge de la batterie, les alimentations "on-line" sont équipées d'un redresseur de gabarit important, ce qui fait la cherté de leur prix, en plus le courant qui traverse le redresseur et l'onduleur occasionne une perte d'énergie de 25 à 30% qui s'accompagne d'une élévation de température, qui réduit considérablement la durée de vie des composants électriques de l'onduleur et de la batterie; il convient de prendre cette perte en compte en plus du prix initial du système. Notons aussi qu'un courant ondulé est transmis à la batterie, ce qui provoque des cycles de charge et de décharge qui font travailler inutilement la batterie et provoquent son usure prématurée [2].

Les inconvénients majeurs des topologies "on-line" [3-5] résident dans un faible facteur de puissance, un courant d'entrée tordu par le redresseur soit un THD élevé et un faible rendement inhérent à cette configuration en raison de la nature de la double conversion.

Malgré ces inconvénients, l'alimentation "on-line" est la configuration la plus préférée, en raison de la qualité de la tension de sortie et la protection de la charge. Elle a une très large étendue d'applications de quelque KVA à plusieurs MVA [3,4].

### I.2.3 Alimentation sans interruption statique interactive

#### - Delta Conversion topologie :

La topologie interactive statique appelée Delta conversion, est montrée dans la figure I.3. Il s'agit d'une topologie UPS interactive avec une capacité de conditionnement de puissance série-parallèle active.

Le convertisseur série pourra être utilisé comme filtre actif série pour compenser les tensions harmoniques, et le convertisseur parallèle pourra être utilisé comme filtre actif parallèle pour compenser les courants harmoniques en mode veille.

En mode énergie stockée, le convertisseur parallèle change son mode de fonctionnement à partir d'une source de courant en une source de tension. Le commutateur statique est ouvert pendant ce mode pour empêcher tout retour de courant à partir de la batterie au réseau électrique.

Un avantage de cette topologie interactive sur la topologie on-line est son efficacité globale. Le facteur de puissance est généralement proche de l'unité et le THD des courants de lignes pourra être près de 1% dans de nombreux cas.

### I.3 Les convertisseurs utilisés dans les UPS

Une alimentation sans interruption statique peut être considérée comme étant une charge non linéaire et une source de pollution en harmonique par rapport au réseau électrique puisqu'elle est composée d'un redresseur, d'un onduleur, et d'un ensemble de batteries. La configuration de chaque bloc peut varier d'une application à une autre ; on donne ci-dessous les parties essentielles constitutives d'une alimentation sans interruption [6].

#### I.3.1 Redresseurs

Dans une alimentation sans interruption le redresseur est chargé d'établir une tension continue de qualité suffisante pour que l'onduleur opère d'une manière adéquate.

On distingue deux grandes catégories des redresseurs:

- Redresseur non commandé
- Redresseur commandé.

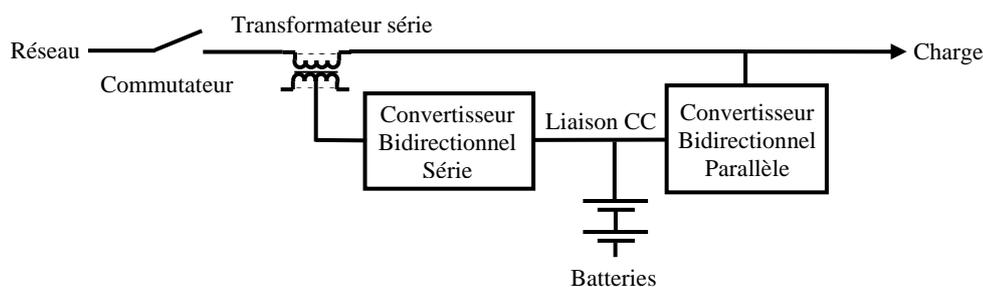


Fig I.3 Alimentation sans interruption interactive serie-parallele (delta conversion).

### I.3.1.1 Redresseurs non commandés

Les redresseurs non commandés utilisent des diodes ; un redresseur non commandé en pont est montré dans la figure I.4. Les diodes  $D_1$  et  $D_2$  conduisent pendant l'alternance positive et les diodes  $D_3$  et  $D_4$  conduisent pendant l'alternance négative de la tension d'entrée  $V_s$ . Le condensateur  $C_{dc}$  est choisi assez grand pour limiter l'ondulation de la tension continue à la valeur prééglée.

Puisque le condensateur  $C_{dc}$  est tout à fait grand, le courant débité par la source est fortement tordu, voir figures I.5 et I.7. Ceci a comme conséquence un facteur de puissance médiocre et naissance d'harmoniques coté réseau ce sont les principaux inconvénients des redresseurs non contrôlés. Un autre inconvénient de ces redresseurs est que la tension continue  $V_{dc}$  est égale à la tension maximale d'entrée.

Quand une tension continue plus élevée est désirée, un redresseur non contrôlé doubleur de tension peut être utilisé. Sa topologie est présentée dans la figure I.6. Dans cette topologie,  $D_1$  charge le condensateur  $C_1$  à la valeur maximale de la tension d'entrée pendant l'alternance positive. En conséquence,  $D_2$  charge  $C_2$  à la valeur maximale de la tension d'entrée pendant l'alternance négative. La tension de sortie continue est deux fois la valeur maximale de la tension d'entrée. Sans compter l'avantage d'une tension continue plus élevée, cette topologie a également moins de nombre de diodes comparée au redresseur en pont. Il faut mentionner que les tensions inverses bloquées par les diodes pour la topologie de doubleur de tension sont deux fois plus grandes que celles pour le redresseur en pont. Un autre inconvénient de la topologie de doubleur de tension est qu'il utilise deux condensateurs électrolytiques de courant continu, qui sont encombrants. Les avantages clairs des redresseurs non commandés sont leur simplicité, précision et prix réduit.

Leurs principaux inconvénients sont le facteur de puissance médiocre et la distorsion du courant de source qui nuisent énormément aux producteurs de l'énergie électrique.

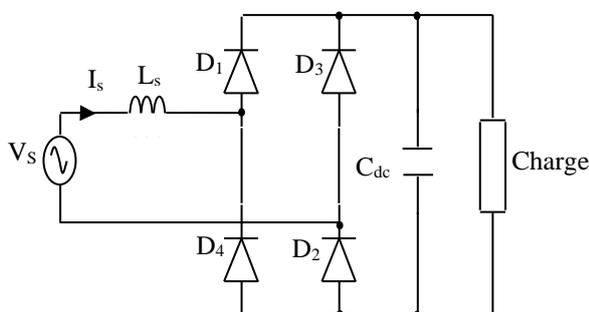


Fig.I.4. Redresseur en pont non commandé.

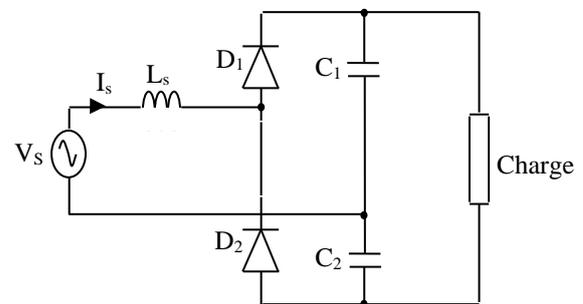


Fig.I.6. Redresseur doubleur de tension non commandé.

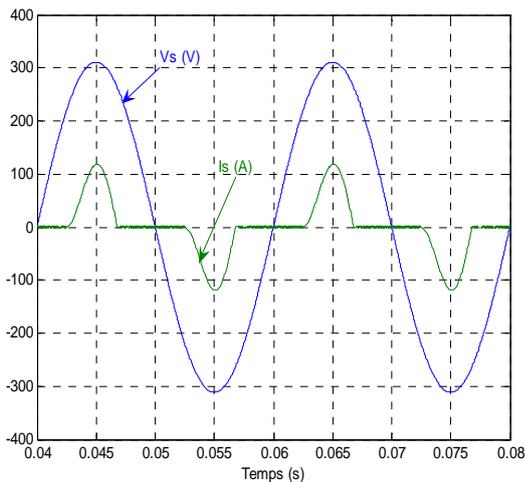


Fig. I.5. Tension et courant de source pour un redresseur en pont non commandé.

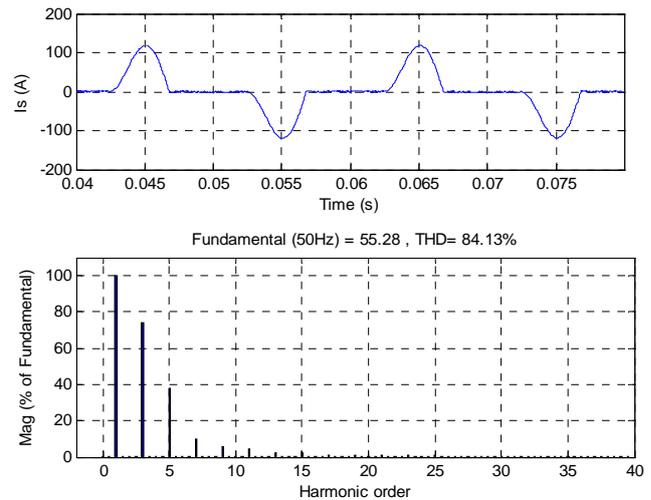


Fig.I.7. Spectre du courant de source

### I.3.1.2 Redresseurs commandés (MLI)

Les redresseurs commandés utilisent des thyristors, des transistors MOSFETs, ou IGBTs comme interrupteurs de puissance. Un redresseur de courant triphasé en pont commandé avec six interrupteurs actifs (IGBTs) est montré dans la figure I.8.

Le redresseur se compose des interrupteurs  $T_{11}$ ,  $T_{21}$ ,  $T_{31}$ ,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  et  $T_{30}$ , d'un condensateur électrolytique de courant continu  $C_{dc}$  et à l'entrée des inductances de lissage du courant  $L_{sa}$ ,  $L_{sb}$  et  $L_{sc}$ . En commutant ces six interrupteurs actifs, de manière que le courant de source soit sinusoïdal et en phase avec la tension d'entrée, voir figure I.9 et I.11. [7]. En même temps, la tension de sortie continue peut être étroitement réglée à une valeur de tension désirée qui est toujours plus grande que la valeur maximale de la tension d'entrée. Le résultat de simulation pour la tension de sortie continue est montré dans la figure I.10.

De cette façon, la tolérance du système on-line aux variations de la tension d'entrée est augmentée. En conséquence, les batteries de secours n'entrent pas dans le cycle charge/décharge où la tension d'entrée tombe au-dessous de sa valeur nominale. Ceci augmente considérablement la durée de vie des batteries.

Les performances telle qu'un facteur de puissance unitaire, une absorption d'un courant de source sinusoïdale avec un THD appréciable sont atteintes avec ces topologies utilisant des interrupteurs actifs. Le coût élevé est leur inconvénient majeur.

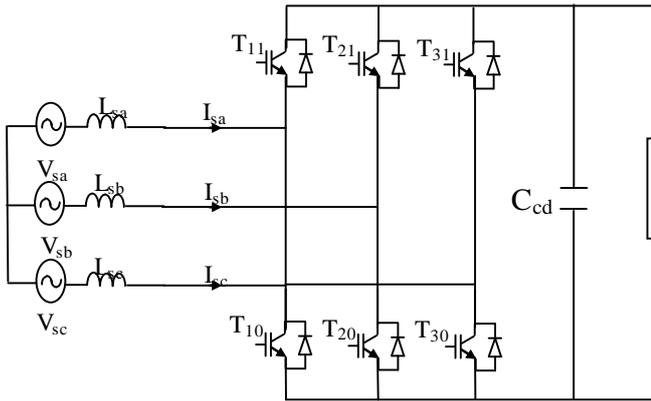


Fig.I.8. Redresseur de courant triphasé en pont commandé.

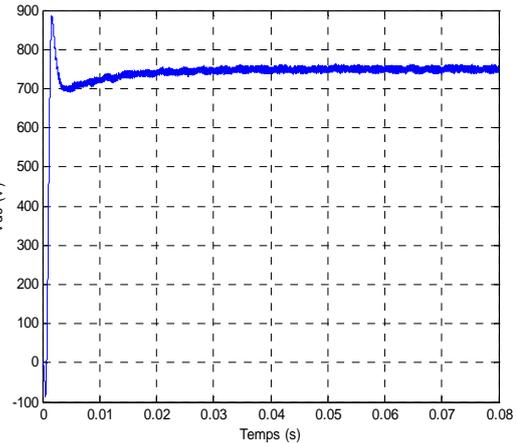


Fig.I.10. Tension de sortie continue pour le redresseur en pont commandé.

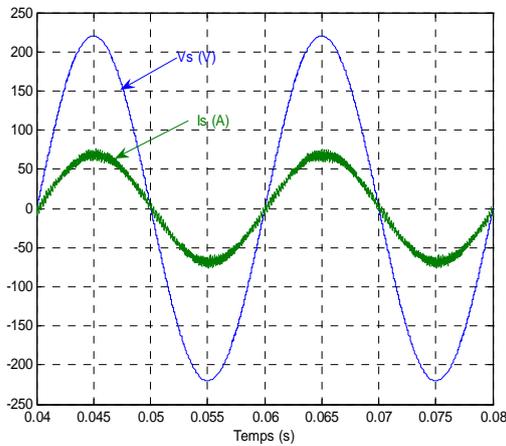


Fig.I.9. Tension et courant de source pour le redresseur en pont commandé.

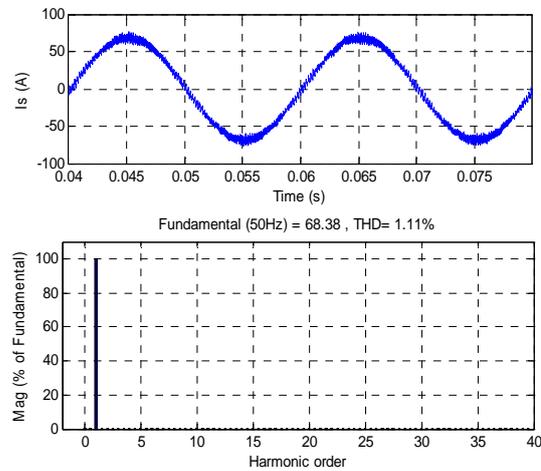


Fig.I.11. Spectre du courant de source

### I.3.2 Onduleurs

#### I.3.2.1 Principe de fonctionnement

Il y a deux types d'onduleurs monophasés : onduleur en demi-pont et onduleur en pont [8]. Une topologie typique d'onduleur en demi-pont est présentée sur la figure I.12. Le bus continu se compose de deux condensateurs égaux,  $C_1$  et  $C_2$ , qui sont reliés en série et deux interrupteurs  $S_1$  et  $S_2$ . La tension appliquée à la charge peut être  $\pm E / 2$ . Quand l'interrupteur  $S_1$  est fermé, l'interrupteur  $S_2$  est ouvert, la tension d'entrée continue  $E$  est divisée entre les deux condensateurs, et la tension de charge est  $+ E / 2$ . En outre, quand l'interrupteur  $S_2$  est fermé, l'interrupteur  $S_1$  est ouvert, et la tension de charge est  $- E / 2$ . Pour éviter le court circuit, il y a toujours un temps mort entre le moment où un des interrupteurs est éteint et l'autre est allumé. Le temps mort devrait être assez grand pour permettre à un interrupteur de s'arrêter avant que l'autre interrupteur commence à conduire. Les avantages de la topologie d'onduleur en demi-pont sont le nombre inférieur des interrupteurs et la commande simple. Cependant, il souffre de deux inconvénients inhérents :

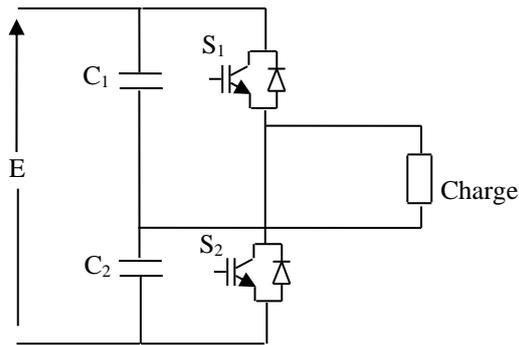


Fig.I.12. Onduleur en demi-pont.

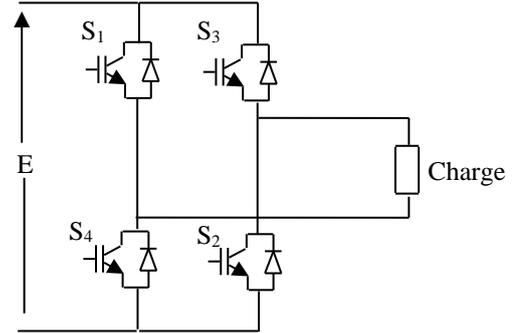


Fig.I.13. Onduleur en pont.

Le premier est l'utilisation médiocre de la tension d'entrée continue. Le second il est commandé seulement avec les techniques MLI bipolaires. Ceci exige un filtre de sortie plus grand et mène généralement à une efficacité inférieure. En raison des inconvénients mentionnés ci-dessus, l'utilisation de la topologie d'onduleur en demi-pont est limitée aux applications de basse puissance. Pour des applications de moyenne et grande puissance, la topologie d'onduleur en pont est habituellement utilisée [9,10].

Un onduleur en pont est présenté sur la figure I.13. L'onduleur en pont se compose de quatre interrupteurs (IGBTs),  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  et  $S_4$ , reliés en série deux à deux formant deux bras d'onduleur. En commandant la fermeture et l'ouverture des interrupteurs, la tension appliquée à la charge peut être  $+E$ ,  $-E$  ou  $0$ . Quand les interrupteurs  $S_1$  et  $S_2$  sont fermés, les interrupteurs  $S_3$  et  $S_4$  sont ouverts, la tension de la charge est  $+E$ . Quand les interrupteurs  $S_3$  et  $S_4$  sont fermés, les interrupteurs  $S_1$  et  $S_2$  sont ouverts, la tension de charge est  $-E$ . En outre, quand les interrupteurs  $S_1$  et  $S_3$  sont fermés, les interrupteurs  $S_2$  et  $S_4$  sont ouverts et la tension de charge est  $0$ . De même, quand les interrupteurs  $S_2$  et  $S_4$  sont fermés, les interrupteurs  $S_1$  et  $S_3$  sont ouverts, en conséquence, la tension de charge est  $0$ . Pour éviter les courts circuits, il y a toujours un temps mort entre le moment où l'un des interrupteurs dans un bras d'onduleur est ouvert et l'autre est fermé.

### I.3.3 Batterie pour UPS

Les caractéristiques les plus importantes des systèmes UPS sont leur fiabilité et leur disponibilité. Le composant qui influence cette caractéristique est très nettement la batterie. Les batteries doivent assurer l'alimentation de la charge lorsque le réseau tombe en panne. Si elles ne sont pas capables de le faire, tout le système UPS échoue, quelle que soit la qualité de l'interface EP utilisée. En outre, les batteries déterminent généralement là où les systèmes UPS seront placés car ils nécessitent plus d'espace et avoir un poids supérieur à tous les autres composants de systèmes UPS. Dans de nombreux cas, les batteries constituent la partie la plus importante du coût du système UPS entier [11].

### **I.3.3.1 Historique**

Les premiers systèmes UPS ont été utilisés dans les grandes installations centralisées pour protéger les charges critiques dans les hôpitaux et les bureaux de télécommunication. Les Batteries de ces grandes installations ont été placées dans des bâtiments spéciaux distincts, équipés de ventilation et nécessitent un entretien régulier qui consiste à rajouter de l'eau au bout d'un certain temps [12]. Le type de batterie utilisé est appelées 'flooded' qui a une longue durée de vie et d'excellents taux de décharge généralement de 5 à 20 h.

Aujourd'hui, il y a une autre approche pour l'alimentation des charges critiques " l'approche distribuée " [13]. Ici, de petits systèmes UPS sont utilisés pour alimenter des petites charges particulières. Cette tendance a forcé les systèmes UPS de passer des spéciaux bâtiments à des petits locaux et chambres d'hôpital. Cela a conduit à l'exigence de compatibilité avec la nouvelle structure soit la nécessité d'avoir des batteries qui n'exigent pas d'entretien régulier et continu. En conséquence, les batteries aux plombs étanches (VRLA) « Valve Regulated Lead-Acid» qui ne nécessitent pas d'entretien sont apparues sur le marché.

### **I.3.3.2 Présentation des batteries au plomb**

Les batteries au plomb constituent l'autre composant à risque des ASI, inventé par le physicien français Gaston Planté en 1895, la batterie au plomb a été la première batterie rechargeable. Il existe deux principaux types de batteries au plomb [12] :

- Les batteries appelées 'flooded' qui nécessite un entretien régulier qui consiste à rajouter de l'eau au bout d'un certain temps
- Les batteries aux plombs étanches (VRLA) pour « Valve Regulated Lead-Acid» qui ne nécessitent pas d'entretien. Ces batteries sont de plus en plus utilisées dans plusieurs applications (automobile, télécommunication) et notamment dans les ASI. Comparativement à d'autres types de batteries (Lithium-Ion, Cadmium Nickel,..), les VRLA batteries restent compétitives dans les ASI si plusieurs critères sont pris en compte tels que le coût, la durée de vie et la surface massique).

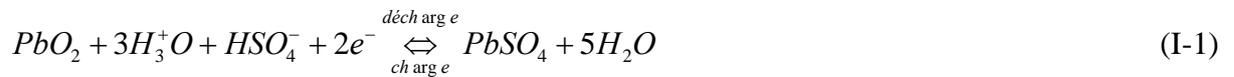
#### **I.3.3.2.1 Principe de fonctionnement**

Comme tous les autres types de batterie, les batteries au plomb sont capables de convertir l'énergie électrique en énergie chimique et réciproquement. Ces deux opérations s'appellent respectivement charge et décharge.

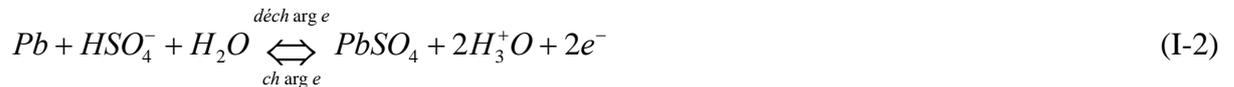
Le fonctionnement d'un accumulateur au plomb réside dans le couplage de deux électrodes : une électrode positive (  $PbO_2 / PbSO_4$  ) et une négative (  $Pb / PbSO_4$  ) qui sont immergées dans une solution d'acide sulfurique. Un schéma simplifié de la batterie au plomb est donné sur la figure I.14.

Les réactions de charge/décharge aux électrodes sont données par les équations chimiques suivantes :

A l'électrode positive :



A l'électrode négative :



Soit pour la réaction globale appelée « double sulfatation » :



Il existe aussi une réaction secondaire pendant les opérations de charge et de décharge. Particulièrement en fin de charge, nous observons à l'électrode positive une électrolyse de l'eau avec dégagement d'oxygène et à l'électrode négative un dégagement d'hydrogène, les réactions secondaires sont les suivantes :

A l'électrode positive :



A l'électrode négative :



D'où la réaction globale :



Ainsi pour les batteries au plomb de type « flooded » qui contiennent un électrolyte liquide, la réaction secondaire résulte en une perte de l'eau, c'est la raison pour laquelle les batteries de type « flooded » nécessitent une intervention humaine pour ajouter l'eau dans l'électrolyte.

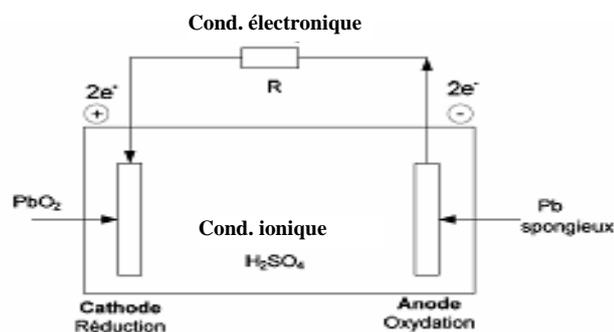


Fig.14. : Schéma de principe d'une batterie au plomb

Pour les batteries au plomb de type « VRLA » dont l'électrolyte est poreux, l'oxygène généré à l'électrode positive peut atteindre l'électrode négative par les pores. Cet oxygène est réduit en eau avec  $H^+$  et  $e^-$  de l'électrolyte. C'est pourquoi les batteries de type « VRLA » sont sans maintenance. Une quantité de gaz peut être dégagée par la valve de sécurité seulement en cas de surcharge sévère.

### I.3.3.3 Chargeur de batterie

Les batteries sont parmi les parties les plus importantes dans les systèmes UPS. Même si la conception des circuits électroniques de puissance est bonne, quand les batteries ne fonctionnent pas correctement, le système UPS entier n'accomplit pas son rôle.

Les batteries sont extrêmement sensibles aux conditions de fonctionnement non optimales, telles que la température élevée ou basse, causant la décharge profonde et la surcharge. Si la température ambiante n'est pas prise en compte lors de la conception de la commande des UPS, la charge et décharge des batteries sont liées principalement à la température.

Il y a deux options pour la connexion des batteries dans les systèmes UPS. La première est de les relier en parallèle directement aux condensateurs du bus continu voir figure I.15.

Cette configuration a comme conséquence un système très simple. Le redresseur commandé charge les batteries en maintenant une tension appropriée du bus continu. Cependant, beaucoup de cellules de batteries doivent être reliées en série pour maintenir une tension élevée de bus continu. Cette condition mène à plusieurs problèmes tels que l'espace, le coût, la fiabilité et la sûreté.

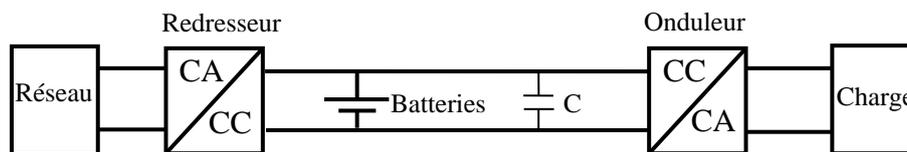


Fig.I.15. UPS avec batterie connecté directement au bus continu .

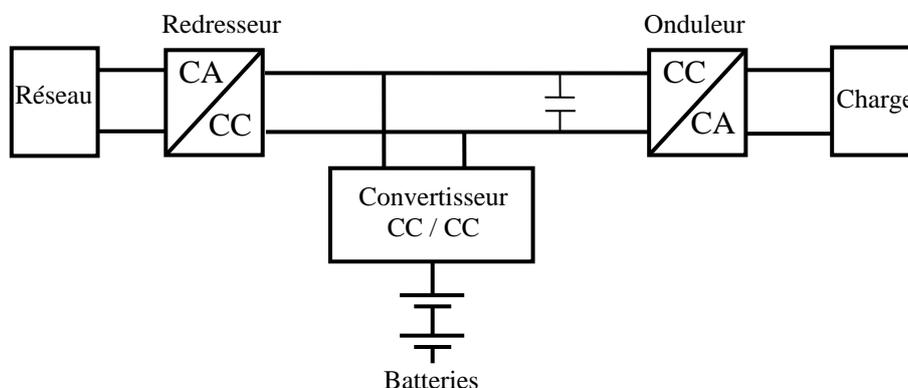


Fig.I.16. UPS avec batterie connecté au bus continu a travers un convertisseur bidirectionnel.

Les limitations de l'espace et les considérations de coût sont des paramètres de conception critiques dans les applications de basse puissance des UPS telles que les ordinateurs personnels. Pour maintenir une tension élevée aux bornes de la batterie, il faut payer un coût d'entretien plus élevé. La fiabilité est également en question, dans le cas de tension élevée de batterie.

Pour une certaine capacité de stockage, la fiabilité diminue quand le nombre de cellules de batterie connecté en série augmente.

Parmi les différentes solutions qui ont été proposées pour surmonter les problèmes de tension élevée des batteries, la plus utilisée est d'ajouter un convertisseur bidirectionnel CC/CC, il diminue la tension élevée du bus continu à la basse tension de batterie pendant le mode de fonctionnement de charge et intensifie la basse tension de batterie à la tension élevée de bus continu pendant le mode de fonctionnement de secours voir figure I.16. Le convertisseur "Buck" utilisé dans le convertisseur bidirectionnel CC/CC est présenté sur la figure I.17. Ce convertisseur est composé de la diode  $D_1$  et l'inductance  $L_{dc}$ . L'interrupteur  $T_2$  coupe la tension continue  $V_{dc}$  et la diminue vers le bas :

$$V_{bat} = \alpha \cdot V_{dc} \quad (I-7)$$

Où  $\alpha$  est le rapport cyclique de l'interrupteur  $T_2$ .

Le convertisseur "Boost" est composé de l'interrupteur  $T_1$ , la diode  $D_2$  et l'inductance  $L_{dc}$ . Quand  $T_1$  est fermé, l'inductance  $L_{dc}$  est active. Quand  $T_1$  est ouvert, l'énergie stockée dans l'inductance  $L_{dc}$  est transférée à la sortie intensifiant la basse tension  $V_{bat}$  de la batterie à la tension élevée :

$$V_{dc} = \frac{V_{bat}}{1 - \alpha} \quad (I-8)$$

Où  $\alpha$  est le rapport cyclique de l'interrupteur  $T_1$ .

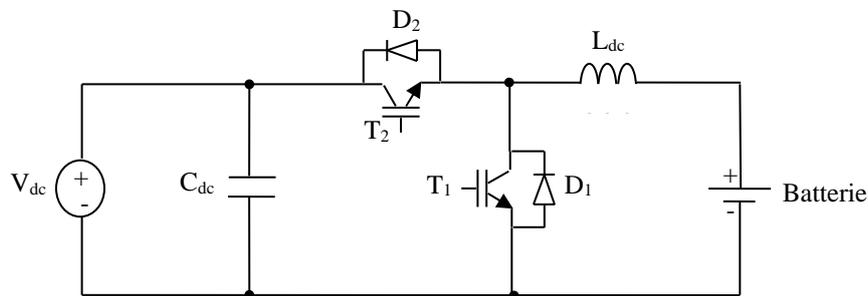


Fig.I.17. Convertisseur bidirectionnel buck-boost CC/CC.

#### **I.3.3.4 Caractéristiques de la batterie UPS**

La principale exigence pour les batteries VRLA étanches conçues pour des applications UPS est de fournir un courant élevé pendant une courte durée parce que la durée du temps de secours pour les systèmes UPS est généralement courte, de quelques secondes à une heure, généralement environ 15 minutes [14]. Il y a deux principales différences entre les batteries VRLA typiques et les batteries VRLA conçues pour UPS. Tout d'abord, afin de fournir un courant plus élevé pour un court laps de temps, les batteries conçues pour UPS ont besoin d'une grande surface active, ce qui explique pourquoi ces batteries ont un nombre plus élevé de plaques minces. La deuxième différence est que les batteries conçues pour UPS doivent avoir une résistance interne plus faible afin de transporter des courants élevés avec un minimum de pertes.

#### **I.3.3.5 Problèmes :**

La réduction de la résistance interne de la batterie a également des effets négatifs. La faible résistance interne provoque des problèmes avec les ondulations en CC et CA de la tension aux bornes des batteries [15].

Les ondulations en CC sont les fluctuations dans la tension de sortie du redresseur non lisse ; elles augmentent la température interne de la batterie. Bien que cette augmentation soit généralement de quelques degrés Celsius, elle est très dangereuse pour la vie de la batterie parce que chaque augmentation de degré Celsius de la température réduit la vie de la batterie d'environ 10%.

Les ondulations en CA sont sinusoïdales et superposées sur la composante continue. Elles sont également classifiées comme deux types : de décharge et de non décharge. Quand leur amplitude est faible devant l'amplitude de la composante continue, elles sont de type "non décharge", voir figure I.18 ; et si leur amplitude est plus grande que l'amplitude de la composante continue, elles sont de type "décharge", et le courant de ces ondulations devient positif et négatif, voir figure I.19.

Les ondulations en CA de non décharge ont le même effet sur la batterie que les ondulations en CC. Elles augmentent la température interne de la batterie. Puisque les ondulations en CA de décharge sont beaucoup plus grandes en amplitude que la composante continue, elles conduisent la batterie vers des cycles de charge-décharge avec un taux déterminé par la fréquence du signal en CA, les ondulations en CA de basse fréquence sont particulièrement nocives pour la batterie et cause son usure prématurée [16].

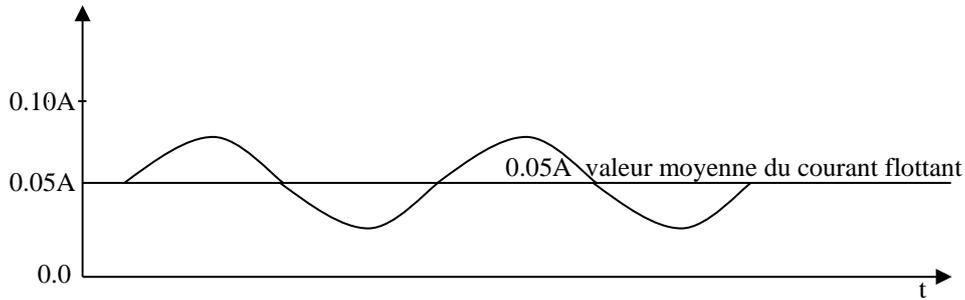


Fig I.18. Les ondulations en CA de non décharge.

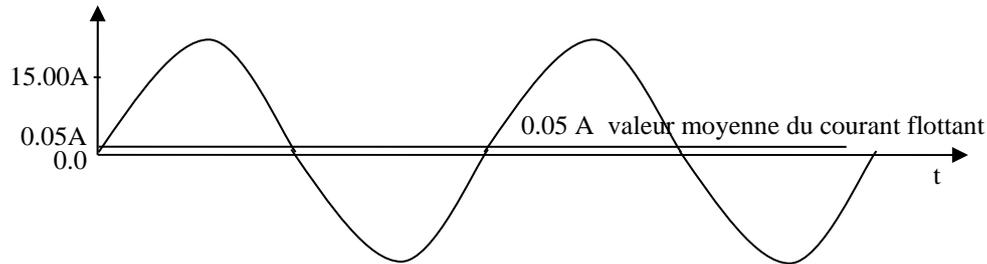


Fig I.19. Les ondulations en CA de décharge

### I.3.3.6 Catégorie d'échec

Les échecs dans les batteries peuvent être classés en trois types : grande impédance, basse impédance et détérioration de la capacité. Les échecs dans le cas de grande impédance sont provoqués par la corrosion des plaques, le contact est lâché entre le matériel actif des plaques, ou la basse densité de l'acide. Les échecs dans le cas de basse impédance sont provoqués par le court-circuit entre les plaques. Les échecs dans le cas de la détérioration de la capacité sont provoqués par utilisation profonde de décharge, usage cyclique et température élevée [17].

## I.4 Éléments susceptible de remplacer les batteries UPS

Les problèmes et les échecs dans les batteries UPS cités ci-dessus et leurs effets néfastes sur l'environnement ont orienté la recherche vers une source d'énergie renouvelable telle que les piles à combustible, en vue de remplacer l'élément de stockage de l'énergie dans les systèmes UPS.

Le domaine d'application des PAC est très vaste du fait de la diversité des caractéristiques de chaque type de PAC. Par exemple, la puissance peut aller de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts.

En tenant compte de cette diversité, le but de ce paragraphe est de présenter sommairement les applications réelles où la PAC pourrait remplacer un générateur d'énergie traditionnel ou l'ES (batteries). On peut classer ces applications suivant trois grandes catégories [18]:

- Applications embarquées, transport
- Applications portables
- Applications stationnaires

Dans ce qui suit nous nous limitons aux applications stationnaires vues son intégrité dans l'objectif de recherche fixé dans cette thèse.

#### I.4.1 Applications stationnaires

Dans ce domaine, on peut classer les applications comme suit :

##### I.4.1.1 Charge isolée

La PAC doit alimenter en permanence et d'une façon autonome une charge isolée. Elle peut être associée à un ES pour fournir la puissance nécessaire de la charge.

Le temps de démarrage et la réponse dynamique de la PAC sont des critères rédhibitoires, car ils conditionnent la taille de l'ES. Le rendement et l'utilisation de la chaleur sont les paramètres fondamentaux pour valoriser l'installation. Tous ces aspects font de la SOFC et de la PEM les meilleures candidates. Dans ce domaine, la PAC s'intègre généralement facilement dans les installations existantes lesquelles utilisent principalement des générateurs diesel voir figure I.20.

##### I.4.1.2 Combinaison avec des énergies renouvelables

La PAC combinée avec l'électrolyse constitue un système réversible en terme de stockage d'énergie. Ce système réversible peut répondre à l'aspect aléatoire de la production électrique à partir d'énergies renouvelables. On peut donc imaginer de stocker l'énergie lors de périodes de grands vents ou de fort ensoleillement sous forme d'hydrogène. Cet hydrogène serait transformé en électricité via une PAC, lorsque les énergies renouvelables ne pourraient pas satisfaire la demande. En outre, cela permettrait d'atténuer énormément les variations de puissance provoquées par les variations instantanées de l'ensoleillement ou du vent.

Dans ces applications figure I.21, le rendement global du système réversible Electrolyse-PAC est le principal facteur critique. La PEM semble la PAC la mieux adaptée.

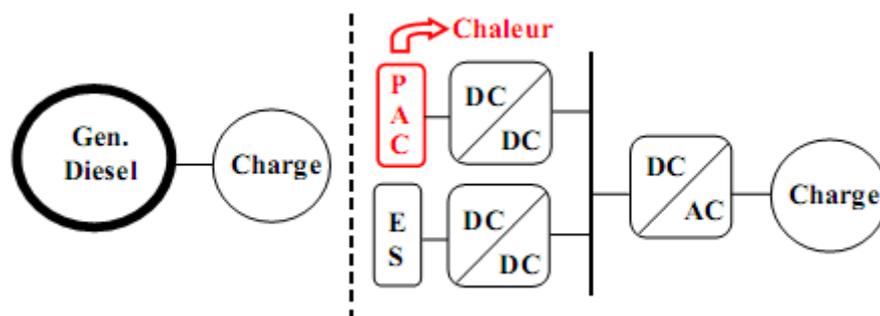


Fig. I.20 Comparaison du générateur diesel classique avec un générateur à base de PAC

### I.4.1.3 Alimentation sans interruption

La puissance nominale de la PAC peut varier de plusieurs kilowatts jusqu'à quelques centaines de kilowatts. Ces applications exigent généralement un démarrage rapide et un taux de défaillance minimale. Pour ces raisons, les PAC les mieux adaptées sont celles fonctionnant à basse température telles les PEM ou les PAFC. La PAC peut être intégrée de plusieurs manières en fonction de l'application. Elle peut fonctionner d'une manière permanente en cas de présence de réseau la PAC, contribue à fournir de la puissance active tout en améliorant la qualité d'énergie (objectif chapitre IV) voir figure I.22 (a), en cas de défaillance du réseau la PAC alimente la charge critique (Objectif chapitre II) voir figure I.22 (b).

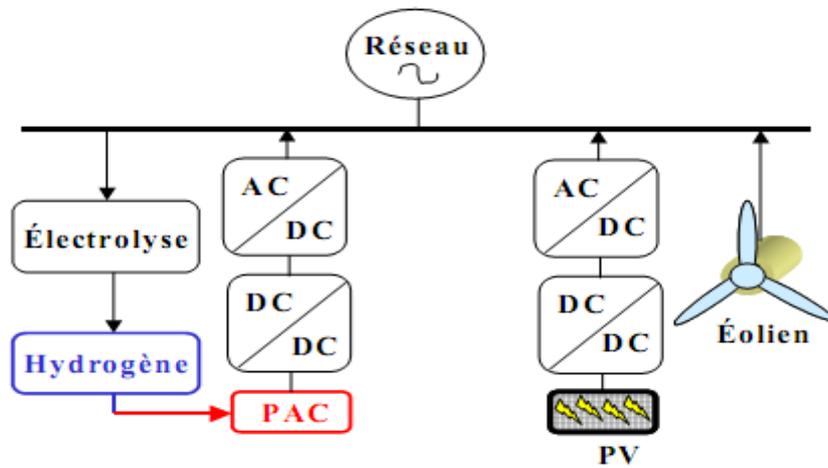


Fig. I.21 Système réversible PAC - Electrolyse combinée à des générateurs d'énergies renouvelables

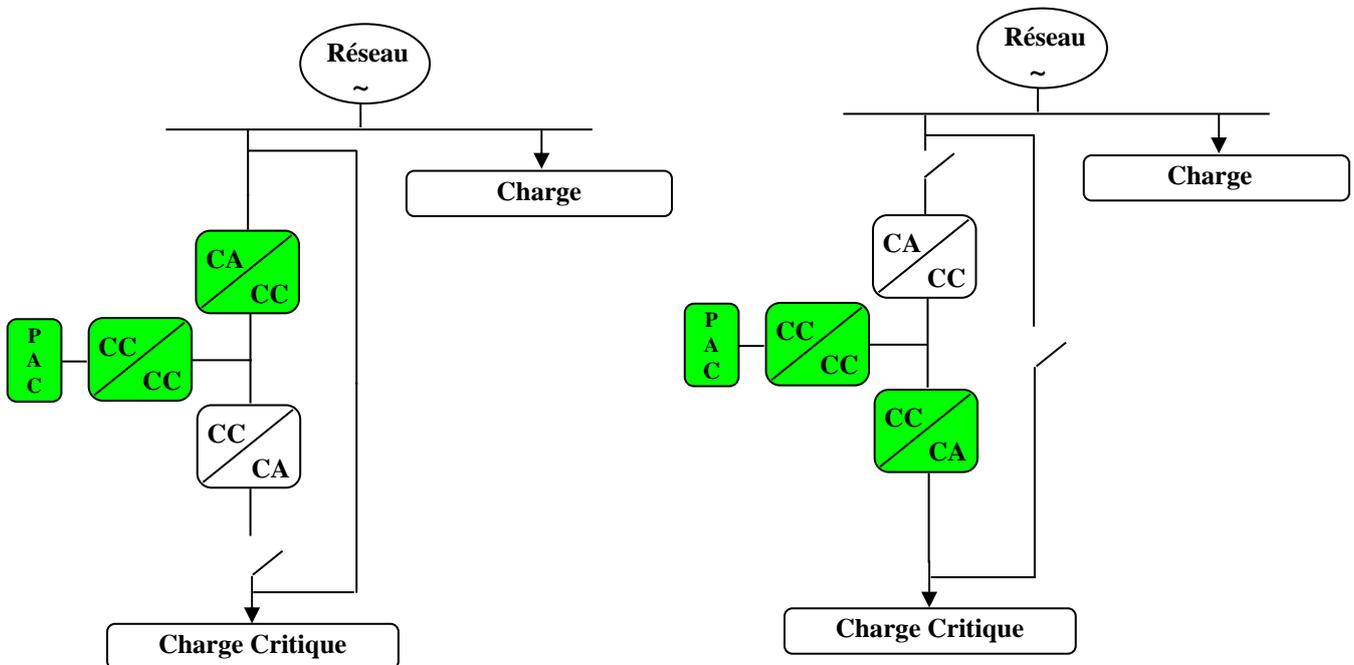


Fig. I.22 (a) : Cas présence du réseau

Fig. I.22 (b) : Cas absence du réseau

Fig. I.22 Exemple d'utilisation des PAC pour une ASI quelconque.

## I.5 Conclusion

Une alimentation sans interruption statique typique est composée d'un redresseur, d'un onduleur, et d'un ensemble de batteries. La configuration de chaque bloc peut varier d'une application à une autre.

Les UPS peuvent être classées en trois grandes catégories, les configurations de type off-line , type on-line (double conversion) et type interactive.

Dans les systèmes “on-line”, l'onduleur est connecté en série, et alimente sans interruption la charge. En termes d'avantage, la topologie “on-line” alimente la charge sans aucun temps de transfert, par contre en termes d'inconvénient nous citons :

- le faible facteur de puissance.
- Le courant d'entrée est tordu par le redresseur soit un THD élevé.
- Le faible rendement est inhérent à cette configuration en raison de la nature de la double conversion.

Dans les systèmes “off line”, l'onduleur est au repos pendant le mode de fonctionnement normal ; en cas de défaillance du réseau, la charge est alimentée par l'onduleur. En termes d'avantage, la topologie “off-line” le redresseur dans ce type de configuration pourra être utilisé pendant la présence du réseau en filtre actif contribuant ainsi à la dépollution du réseau en harmoniques, par contre en termes d'inconvénient la topologie “off-line” nécessite un temps de transfert qui dépend de la vitesse de détection de la coupure du réseau et de mettre en marche l'onduleur.

Dans les systèmes interactifs, notamment la topologie Delta conversion, les convertisseurs série-parallèle peuvent être exploités en filtre actif série-parallèle en mode veille contribuant ainsi à la dépollution en harmoniques du réseau électrique.

Les problèmes et les échecs dans les batteries UPS cités précédemment et leurs effets néfastes sur l'environnement ont orienté la recherche vers une source d'énergie renouvelable telle que les piles à combustible, en vu de remplacer l'élément de stockage de l'énergie dans les systèmes UPS.

Plusieurs configurations ont été présentées permettant ainsi l'intégration de la PAC dans les systèmes UPS où elle pourrait remplacer un générateur d'énergie traditionnel ou l'ES (batteries).

Dans le chapitre suivant nous étudierons une application où la PAC alimente une charge critique dans le cas de défaillance du réseau principal.

# **Chapitre II**

## **Intégration d'une PEMFC dans un système UPS**

## II.1 Introduction

Alors que le monde cherche à trouver d'autres moyens de production de l'énergie propre, les piles à combustible apparaissent comme une source prometteuse de la production d'électricité. Selon leur type, les piles à combustible peuvent être utilisées pour une large gamme d'applications, allant de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts [18]. La PAC est considérée comme l'une des technologies les plus prometteuses en raison de l'efficacité de fonctionnement rendement élevée (40-60%), la fiabilité et une plus grande capacité potentielle [32], [33]. La pile à combustible peut être placée n'importe où pour améliorer l'intégrité, la fiabilité et l'efficacité du système. Les Piles à membrane polymère échangeuse de protons (PEMFC) sont particulièrement attrayantes pour un usage résidentiel en raison de leur température de fonctionnement relativement basse ( $\sim 80^\circ\text{C}$ ) et une bonne réponse dynamique [34], [35].

Dans les systèmes UPS, les batteries sont considérées parmi les parties les plus importantes, quand les batteries ne fonctionnent pas correctement, le système UPS entier n'accomplit pas son rôle. Elles sont extrêmement sensibles aux conditions de fonctionnement non optimales, telles que la température élevée ou basse, causant la décharge profonde et la surcharge. Leur remplacement demeure indispensable pour un système UPS qui alimentait des charges critiques.

En vu de remplacer les batteries et d'intégrer une PEMFC dans un système UPS en cas d'absence de la source principale (réseau électrique), nous proposons dans ce chapitre une application qui consiste à l'alimentation d'une charge par une PEMFC de 45 kW.

## II.2 Principe de fonctionnement des PAC

La PAC est un générateur électrochimique basé sur le procédé inverse de l'électrolyse. Ce générateur génère de l'électricité en mettant en jeu sans les mélanger un combustible et un comburant à travers un électrolyte voir figure II.1. Les réactions chimiques introduites dans l'anode, cathode et la réaction globale du procédé pour production d'électricité sont décrites ci-dessous [18].



La PAC se compose des cellules unitaires. Une cellule est constituée d'une anode et d'une cathode alimentées en comburant et combustible. Ces deux éléments sont séparés par un électrolyte et deux électrodes.

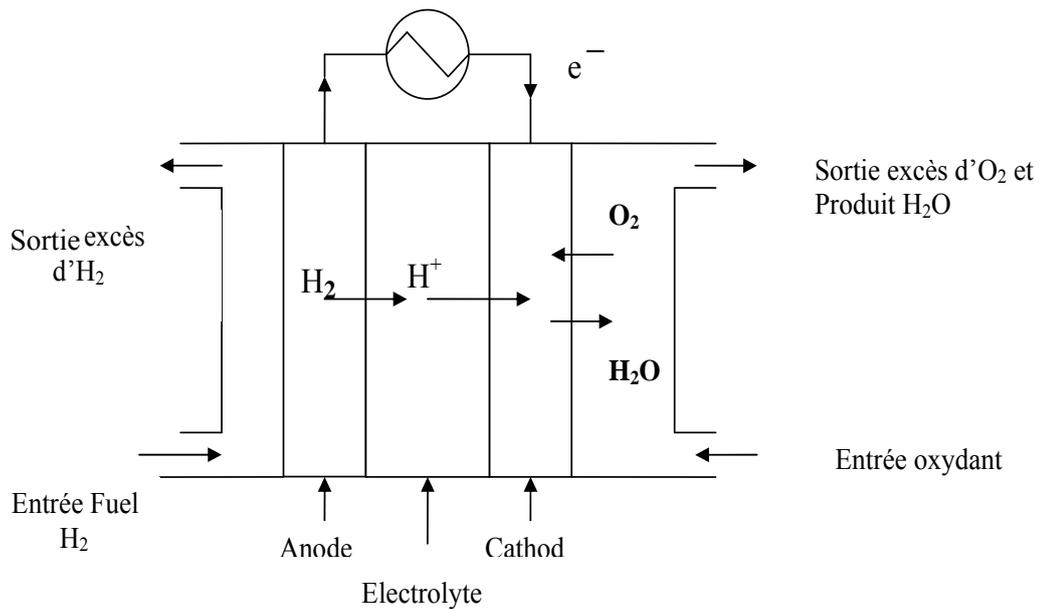


Fig.II.1 Diagramme d'une PAC

L'électrolyte, solide ou liquide, doit permettre la circulation des ions sous une forme plus ou moins hydratée en empêchant aux électrons de passer. Les électrodes constituent les points de connexion au circuit électrique externe. Elles sont généralement construites avec des matériaux poreux complétés par des catalyseurs.

Du fait de la faible puissance générée par une cellule unitaire, plusieurs cellules sont connectées en série pour constituer des stacks. On augmente ainsi la valeur de la tension de sortie ce qui facilite l'utilisation de l'énergie électrique. Cependant, cela exige la présence d'un élément additionnel entre les cellules, la plaque bipolaire. Celle-ci, conductrice électriquement, ne doit en aucun cas autoriser le contact entre l'hydrogène et l'oxygène qui passent à son travers.

L'énergie électrique générée par une PAC est caractérisée par une relation non linéaire entre la tension et le courant, qui ont respectivement une petite et une grande valeur. Cette réponse électrique dépend du courant de la pile, de la température et de la concentration des espèces chimiques principalement.

### II.3 Différents types des piles à combustible

Actuellement, les PAC existantes peuvent être classées en 5 catégories suivant la température de fonctionnement et le type d'électrolyte :

- Pile à membrane polymère échangeuse de protons PEMFC.
- Pile à acide phosphorique PAFC.

- Pile à oxyde solide SOFC.
- Pile à carbonate de fondu MCFC.
- Pile alcaline AFC.
- Pile alimentée directement par méthanol DMFC.

Actuellement, les efforts de recherche et de développement portent principalement sur les PEMFC et les SOFC, puisque ce sont les plus prometteuses [18].

### II.3.1 PEMFC

La cellule d'une PEMFC est constituée physiquement de trois éléments principaux [18] (voir figure II.2 et II.3).

- Electrolyte solide constitué par une membrane ionomère.
- Deux électrodes composées d'une couche de diffusion et d'une couche active.
- Deux plaques bipolaires.

Les réactions chimiques d'une cellule sont illustrées par les équations (II-1) et (II-2).

### II.4 Caractéristique statique – nature d'une source non linéaire:

La courbe de polarisation de la figure II.4 présente la caractéristique d'une PAC en statique. La variation du courant et de la tension de la PAC en fonction du niveau de la puissance fournie montre que la PAC n'est ni une source de tension ni une source de courant en statique. En effet, le potentiel thermodynamique théorique de la pile est de 1,23 V. Cependant, la tension à vide varie seulement entre 0,9 et 1,1 V. Cette première réduction est due à l'irréversibilité des réactions électrochimiques, notamment de la réduction de l'oxygène à la cathode.

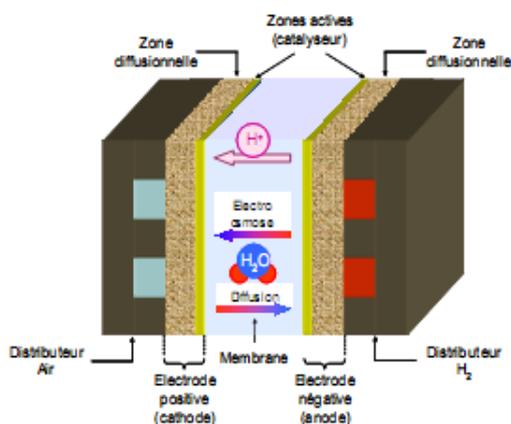


Fig. II.2 Cellule PEM

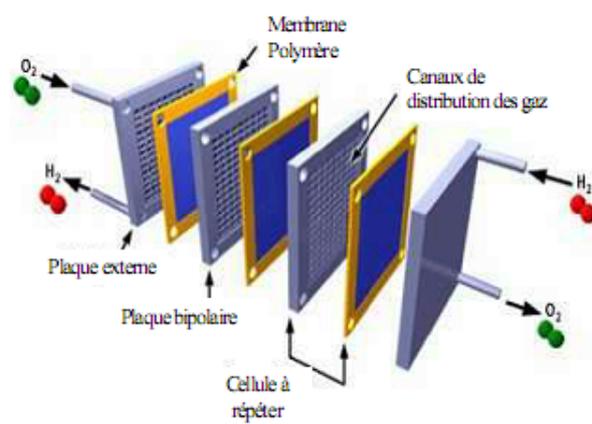


Fig. II.3 Structure d'un Stack PEM

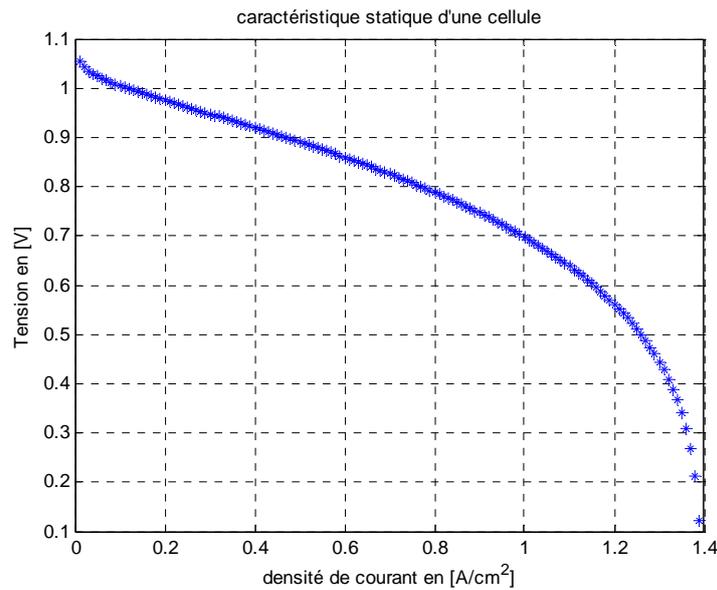


Fig.II.4 Courbe de polarisation de PAC

De plus, pour les faibles densités de courant, des contre-réactions sur les électrodes, dont l'importance est liée à leur cinétique, génèrent des surtensions d'activation. Les pertes d'activation sont plus importantes à la cathode qu'à l'anode. Ensuite, pour la partie relativement linéaire de la courbe, ce sont des pertes liées aux résistances électroniques et ioniques internes (pertes ohmiques). Les pertes relatives à la circulation des électrons sont localisées dans le conducteur électronique des électrodes, dans les plaques bipolaires et aux interfaces communes (résistance de contact). Les pertes relatives au transport des protons se situent dans l'électrolyte constituant la membrane et dans la zone active des électrodes. Les pertes ohmiques sont principalement localisées dans la membrane. Mais aux fortes densités de courant, ce type de pertes existe également dans les électrodes et à leurs jonctions [35].

Enfin, pour les fortes densités de courant, c'est la cinétique de diffusion des gaz à travers les électrodes et l'accumulation d'eau dans les pores des électrodes (noyage) qui conduisent à des pertes de diffusion et de noyage importantes. Ce phénomène est d'autant plus précoce si l'on utilise de l'air au lieu de l'oxygène pur (les 80% d'azote passif gêne l'accès des sites réactifs aux 20% d'oxygène actif). A partir d'une certaine quantité de courant demandée, l'alimentation en molécule de l'oxygène ne peut plus suivre, et la tension chute rapidement.

Ainsi, la PAC est une source non linéaire, sa tension et son courant varient en fonction de la puissance générée. Cette caractéristique est une des raisons principales de la nécessité d'avoir une interface EP afin de stabiliser sa tension de sortie.

## II.5 Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie de la pile au réseau

### II.5.1 Topologies :

La PEMFC peut être intégrée de plusieurs manières, dans cette application, cas de défaillance du réseau la PEMFC alimente la charge critique d'une manière permanente jusqu'au rétablissement du réseau électrique.

Il existe de nombreuses topologies d'interfaçage EP qui peuvent être choisies pour répondre aux exigences demandées. En plus la PEMFC fonctionne dans une plage de tension basse et la tension du réseau est relativement élevée d'où la tension de la pile doit être amplifiée via un étage CC / CC ou un étage CA / CA voir figure II.5 [36].

La meilleure topologie dépend du coût, des performances désirées, et de l'application du système. La topologie choisie dans cette étude pour le contrôle de tension est constituée d'une PEMFC (45 kW, 272 V), un hacheur élévateur, un onduleur triphasé suivi d'un filtre L-C.

La figure II.6, décrit le système composé de la PEMFC, l'unité de conditionnement de puissance et la charge.

Le système de contrôle de puissance a été développé dans [36] que l'on peut résumer comme suit:

$$P_{ac} = \frac{v_c v_L}{X} \sin(\delta) \quad (\text{II-4})$$

Où  $P_{ac}$  est la puissance active,  $v_c$  la tension aux bornes du condensateur  $C$ ,  $v_L$  la tension de charge, la réactance de la ligne  $X$ , et  $\delta$  est l'angle de charge.

En négligeant les pertes de l'onduleur et l'hacheur :

$$P_{ac} = P_{dc} = V_{cell} I'_{dc} \quad (\text{II-5})$$

$$q_{H_2} = \frac{N_{stack} N_0 I_{dc}}{2FU} \quad (\text{II-6})$$

Où  $P_{dc}$  est la puissance active en continu,  $I_{dc}$  courant de stack,  $q_{H_2}$  le débit molaire d'entrée de l'hydrogène,  $N_{stack}$  le nombre stacks,  $N_0$  le nombre de cellules par stack,  $F$  la constante de Faraday,  $U$  le facteur d'utilisation.

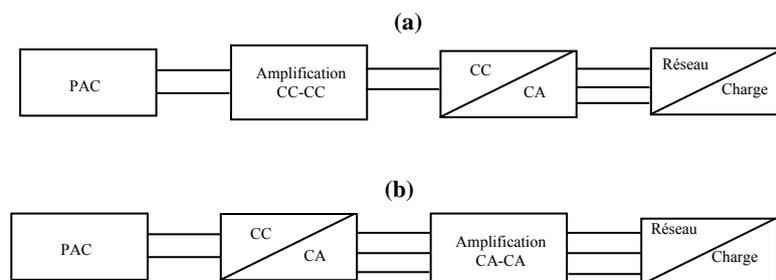


Fig. II.5 Topologies d'amplification de tension

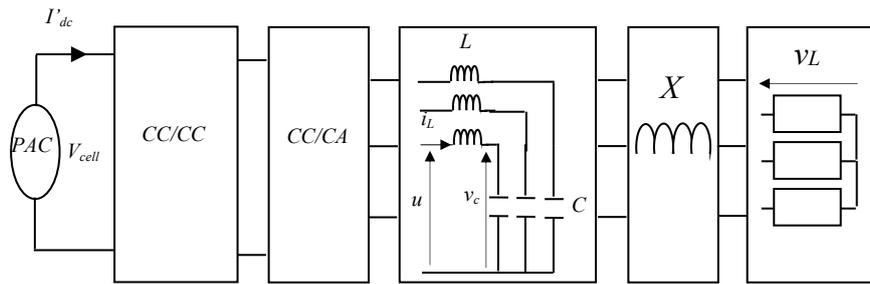


Fig. II.6 Topologie du système proposé

$$\sin(\delta) = \frac{2FUXV_{cell}}{v_c v_L N_0 N_{stack}} q_{H_2} \tag{II-7}$$

En supposant un angle de charge assez petit,

$$\delta = \frac{2FUXV_{cell}}{v_c v_L N_0 N_{stack}} q_{H_2} \tag{II-8}$$

L'équation (II-8) décrit la relation entre la tension de sortie, angle de charge  $\delta$  et  $q_{H_2}$  débit d'hydrogène. Équations (II-4) et (II-8) montrent que la puissance active fonction de l'angle de charge  $\delta$  peut être contrôlée à l'aide de la quantité de flux d'hydrogène. La tension de sortie peut être commandée par le contrôleur LQR.

Le schéma synoptique du système utilisé dans la simulation est montré dans la figure.II.7.

### II.5.2 Modélisation de la pile à combustible

Le modèle de simulation d'une PAC dépend principalement de son utilisation. Un modèle très précis exige un niveau de complexité très élevé, ce qui a comme conséquence un poids de calcul plus important et donc une utilisation plus limitée. Néanmoins, dans certains cas, cette précision est nécessaire.

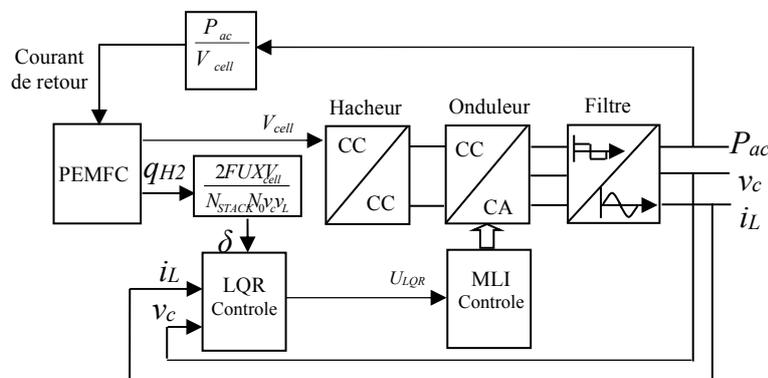


Fig. II.7 Schémas synoptique du système

Certains phénomènes physiques relatifs à la PAC peuvent, suivant l'analyse à réaliser, revêtir plus ou moins d'importance. Ainsi, par exemple, les modèles destinés au contrôle commande ne nécessitent pas la prise en compte des phénomènes physiques au niveau des électrodes. Par contre, pour l'étude des matériaux visant à leur amélioration, il sera impératif de comprendre et modéliser ces comportements. Les modèles se focalisent donc sur les phénomènes qui influent notablement sur les paramètres à prendre en compte dans l'étude.

Le model utilisé est d'une SOFC, il a été introduit dans la référence [37] et modifier pour simuler une PEMFC [38]. Ce modèle est basé sur la simulation des relations entre la tension de sortie de la PEMFC et les pressions partielle de l'hydrogène, l'oxygène et de l'eau.

### II.5.2.1 Modèle dynamique de la pile

On s'intéresse dans ce paragraphe à la modélisation de la pile. Une série d'hypothèses est faite afin de trouver un modèle dynamique aussi complet que possible [39] :

- Les gaz sont idéaux ;
- Le volume des canaux transportant les gaz est fixe, leur longueur est petite. Ceci nous permet de négliger les chutes de pression et de ne considérer qu'une seule valeur pour la pression ;
- La température est considérée constante ;
- La sortie du canal se fait via un seul orifice. Le rapport entre les pressions à l'intérieur et l'extérieur du canal est assez grand pour pouvoir considérer l'orifice comme étouffé;
- Seules les pertes ohmiques et les pertes d'activations seront prises en considération ;
- L'équation de Nernst est appliquée pour déterminer la tension aux bornes de la pile.

### II.5.2.2 Expression des pressions partielles

Les gaz étant idéaux, l'équation des gaz parfaits peut être appliquée :

$$pV = nRT \quad (\text{II-9})$$

Où :

$V$  : Le volume du canal anodique et cathodique ;

$n$  : Le nombre de moles de l'élément considéré dans le canal de l'anode ou de la cathode ;

$R$  : Constante des gaz parfaits ;

$T$  : Température absolue en degré Kelvin ;

Si l'élément considéré est l'hydrogène, en appliquant la dérivée à l'équation précédente on obtient :

$$\frac{d}{dt}(P_{H_2}) = \frac{RT}{V_{an}} q_{H_2} \quad (\text{II-10})$$

Où  $q_{H_2}$  représente le débit molaire de l'hydrogène [40].

On trouve trois contributions pertinentes au débit molaire de l'hydrogène : [40]

- Le débit injecté dans la pile  $q_{H_2}^{in}$  ;
- Le débit qui participe à la réaction chimique  $q_{H_2}^r$  et donc transformé en courant .
- Et enfin le débit excédent qui sort de la pile  $q_{H_2}^{Out}$  ;

Ainsi, on peut exprimer l'équation (II-10) de la manière suivante :

$$\frac{V_{an}}{RT} \frac{d}{dt} (P_{H_2}) = (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{Out} - q_{H_2}^r) \quad (II-11)$$

Le débit participant à la réaction chimique peut être exprimé, en faisant appel aux équations de l'électrochimie, par : [38]

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0}{2F} I = 2k_r I \quad (II-12)$$

Où  $N_0$  : représente le nombre des cellules en série ;

$F$  : Constante de Faraday ;

$I$  : Le courant de la pile ;

$k_r$  : Constante introduite pour des raisons de modélisation.

Le débit sortant de l'anode  $q_{H_2}^{Out}$  est exprimé en fonction de la pression à l'intérieur de l'électrode. En effet selon l'hypothèse (4), la caractéristique suivante pour certaines valeurs de la température est vraie.

$$\frac{W}{p} = k\sqrt{M} \quad (II-13)$$

$W$  : Débit massique (kg/s) ;

$k$  : Constante de la valve fonction principalement de la surface de l'orifice ( $\sqrt{kmol/g/atm.s}$ ) ;

$p$  : Pression à l'intérieur du canal, on aura donc :

$$\frac{q_{H_2}^{Out}}{P_{H_2}} = \frac{k_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = k_{H_2} \quad (II-14)$$

$k_{H_2}$  : Constante de la valve.

En appliquant la transformée de Laplace on trouve :

$$\frac{d}{dt} P_{H_2} = (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{Out} - q_{H_2}^r) \frac{RT}{V_{an}} \quad (II-15)$$

En tenant compte des équations (II-12) et (II-14) on obtient :

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - k_{H_2} p - 2k_r I) \tag{II-16}$$

En introduisant l'opérateur de Laplace :

$$\frac{V_{an}}{RT} p_{H_2} s + k_{H_2} p_{H_2} = q_{H_2}^{in} - 2k_r I \tag{II-17}$$

En regroupant les termes équivalents :

$$k_{H_2} p_{H_2} \left( 1 + \frac{V_{an}}{RTk_{H_2}} s \right) = q_{H_2}^{in} - 2k_r I \tag{II-18}$$

En posant  $\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{RTk_{H_2}}$  on obtient l'équation suivante :

$$p_{H_2} = \frac{1/k_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{in} - 2k_r I) \tag{II-19}$$

De la même manière on détermine les expressions des pressions partielles pour l'oxygène et l'eau :

$$p_{O_2} = \frac{1/k_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} s} (q_{O_2}^{in} - k_r I) \tag{II-20}$$

$$p_{H_2O} = \frac{1/k_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O} s} k_r I \tag{II-21}$$

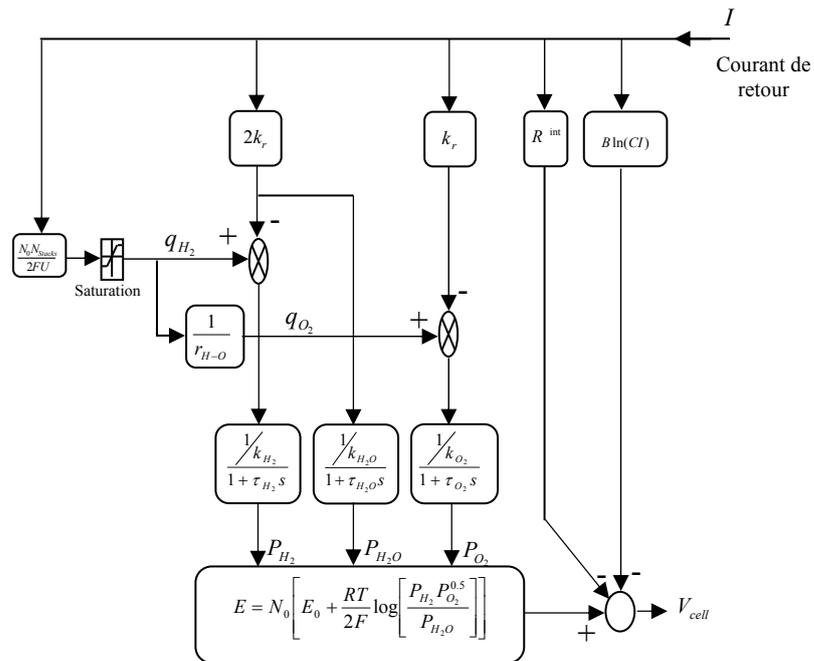


Fig. II.8 Modèle de la PEMFC.

### II.5.2.3 Considérations générales pour un fonctionnement optimal

#### II.5.2.3.1 Rapport entre les débits des réactants

En regardant la réaction globale :



On remarque que le rapport stoichiométrique est de 2 à 1. Un excès d'oxygène est toujours considéré afin de permettre une réaction aussi complète que possible.

Le débit d'oxygène peut être contrôlé par la commande de vitesse du compresseur d'air. Un rapport d'équilibre doit être maintenu entre les deux débits :

$$q_{O_2}^{in} = \frac{1}{r_{H-O}} q_{H_2}^{in} \quad (II-23)$$

Où :  $r_{H-O} = 1.168$

#### II.5.2.3.2 Rapport entre le débit hydrogène et le courant de la pile

Les équations de l'électrochimie montrent que le courant débité par la pile est proportionnel au débit d'hydrogène qui y entre :

$$N_0 I_{fc} = 2Fq_{H_2}^r \quad (II-24)$$

Une autre définition importante caractérise le fonctionnement des piles. L'utilisation du carburant qui est le rapport entre le débit participant à la réaction chimique et le débit total.

$$U_f = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} = \frac{q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{Out}}{q_{H_2}^{in}} \quad (II-25)$$

L'utilisation est comprise entre deux seuils : [41]

-  $U_f \geq 90\%$  : une sur utilisation de fuel peut entraîner un manque de carburant, dans ce cas un dommage permanent serait inévitable ;

-  $U_f \leq 70\%$  dans ce cas la tension des cellules s'accroîtra rapidement.

La valeur optimale pour l'utilisation est de :

$$U_{opt} = 85\% \Rightarrow q_{H_2}^{ref} = \frac{2k_r I_{fc}}{U_{opt}} \quad (II-26)$$

#### II.5.2.3.3 Contraintes de sécurité

Afin d'éviter tout incident désagréable, une limitation secondaire est imposée sur le débit d'hydrogène en limitant le courant de la pile entre deux seuils d'utilisation par l'équation suivante [42] :

$$\frac{0.8q_{H_2}^{in}}{2k_r} \leq I_{fc} \leq \frac{0.9q_{H_2}^{in}}{2k_r} \quad (\text{II-27})$$

### II.5.3 Hacheur élévateur CC/CC

La tension de sortie de la PAC s'écrase avec l'augmentation du courant de charge comme le valide le modèle dynamique de la PAC, un hacheur élévateur CC/CC s'inscrit à la topologie générale du système pour réduire les dimensions de la PAC d'une part et de maintenir une tension continue stable de 400V d'autre part.

La figure II.9 montre la topologie du hacheur élévateur CC/CC, sa commande est assurée par un contrôleur à hystérésis.

La sélection des éléments constituant le hacheur est d'une importance particulière dans la réduction de l'ondulation du courant de la bobine et de la tension de sortie aux bornes de la capacité pour une fréquence de commutation donnée [43].

$$V_{dc} = V_{cell} \frac{T}{t_{off}} = \frac{V_{cell}}{1-k} \quad (\text{II-28})$$

Où  $t_{off} = (1-k)T$  et  $t_{on} = kT$ .

En supposant le circuit sans pertes, la valeur moyenne du courant est :

$$I_{cell} = \frac{I_l}{1-k} \quad (\text{II-29})$$

D'où

$$\Delta I_{cell} = \frac{V_{cell}(V_{dc} - V_{cell})}{fL_{dc}V_{dc}} = \frac{V_{cell}k}{fL_{dc}} \quad (\text{II-30})$$

Où  $\Delta I_{cell}$  est la variation du pic au pic de l'ondulation du courant de l'inductance  $L_{dc}$  et  $f$  indique la fréquence de commutation.

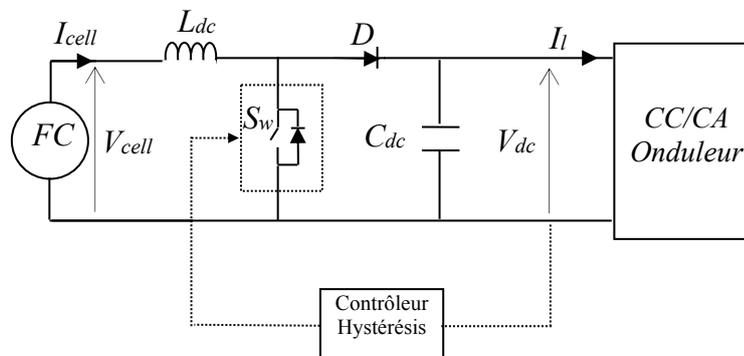


Fig.II.9 Structure typique du hacheur elevateur CC-CC

Quand le commutateur  $S_w$  est fermé la capacité alimente la charge pendant  $t = t_{on}$ . La valeur moyenne du courant de la capacité pendant cette durée  $t_{on}$  est  $I_{cdc} = I_l$  et la variation du pic au pic de l'ondulation de tension de la capacité est :

$$\Delta V_{Cdc} = \frac{I_l k}{f C_{dc}} \quad (\text{II-31})$$

Les dimensions des éléments du hacheur élévateur peuvent être déterminés à partir de la tension, de l'ondulation du courant, de l'ondulation de la tension et de la fréquence de commutation du convertisseur CC/CC en se basant sur les équations (II-28), (II-30) et (II-31).

## II.5.4 Commande du convertisseur CC/CA

### II.5.4.1 Description du modèle

Le filtre LC, la réactance de ligne et la charge sont considérés comme le modèle du système. L'onduleur est commandé par la MLI unipolaire. Les interrupteurs de puissance sont commutés à la fréquence de la porteuse. La figure II.10 présente une phase du système triphasé.

Le modèle peut être décrit par les variables d'états  $v_c$  et  $i_L$ :

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_c \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{ZC} & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u, y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ i_L \end{bmatrix} \quad (\text{II-32})$$

Où

$$\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx \quad (\text{II-33})$$

$$\dot{Z} = \dot{Z}_{Load} + \dot{X}$$

Le modèle en temps discret avec un temps d'échantillonnage  $T_s$  peut être donné par:

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k), y(k) = C_d x(k) \quad (\text{II-34})$$

$$x(k) = [v_c(k) \quad i_L(k)]^T,$$

$$A_d = I + T_s A \quad (\text{II-35})$$

$$B_d = T_s B.$$

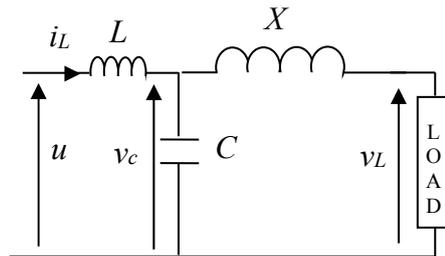


Fig. II.10 Filtre, ligne et charge d'une phase.

**II.5.4.2 Contrôleur linéaire quadratique**

Le dispositif de commande (LQR) a pour objectif de suivre la référence sinusoïdal  $r(k)$  à chaque instant d'échantillonnage [40]. La sortie du système  $y(k)$  est la tension du condensateur dans la forme discrète  $v_c(k)$ . Les variables d'état utilisées dans la commande (LQR) sont la tension de sortie mesurée  $v_c(k)$ , le courant mesuré de l'inductance  $i_L(k)$ , l'intégrale de l'erreur  $v(k)$ , la référence  $r(k)$  et sa dérivée  $\dot{r}(k)$ . Chaque variable d'état est réglée à travers un choix optimal de gains  $K_i$  pour l'atteinte des objectifs de contrôle. La figure II.11, présente le digramme en bloc du contrôleur LQR.

Le vecteur d'état  $z(k)$  est défini par:

$$z(k) = \begin{bmatrix} v_c(k) & i_L(k) & v(k) & r(k) & \dot{r}(k) \end{bmatrix}^T \tag{II-36}$$

Et la commande  $U_{LQR}$  est donnée par :

$$u_{LQR}(k) = -Kz(k) \tag{II-37}$$

Avec  $K$  représente les gains de Ricatti tel que :

$$K = [K_1 \quad K_2 \quad K_3 \quad K_4 \quad K_5] \tag{II-38}$$

Pour concevoir  $K_1, K_2, \dots, K_5$ , gains optimaux du contrôleur le système doit être représenté sous la forme canonique:

$$z(k + 1) = Gz(k) + Hu_{LQR}(k) \tag{II-39}$$

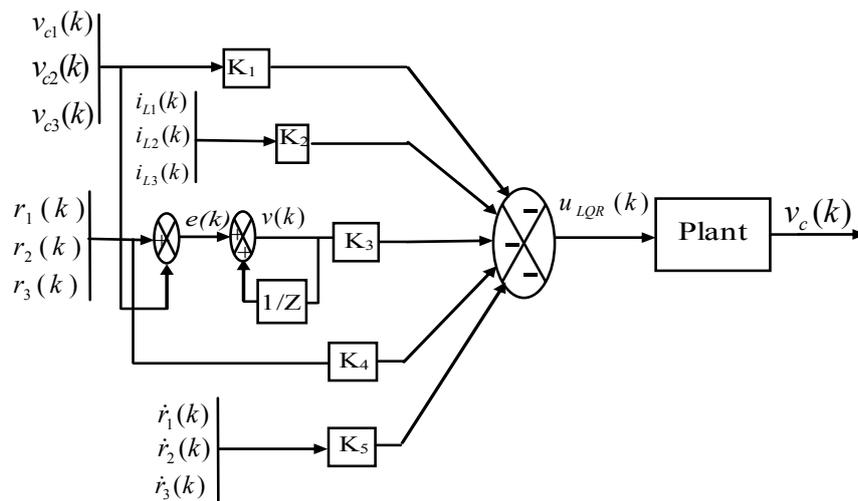


Fig. II.11 Diagramme en bloc du contrôleur LQR

### II.5.4.2.1 Représentation d'état du système augmenté :

Elle consiste à mettre le système augmenté sous la forme standard :

$$z(k+1) = Gz(k) + Hu_{LQR}(k) \quad (\text{II.40})$$

Pour déterminer les matrices G et H nous procédons comme suit :

Les états  $v_c(k)$ ,  $i_L(k)$  sont obtenus à partir de l'équation (II.34).

On peut écrire :

$$\begin{cases} v_c(k+1) = \left(1 - \frac{T_s}{RC}\right)v_c(k) + \frac{T_s}{C}i_L(k) + 0v(k) + 0r(k) + 0\dot{r}(k) + 0u_{LQR}(k) \\ i_L(k+1) = -\frac{T_s}{L}v_c(k) + i_L(k) + 0v(k) + 0r(k) + 0\dot{r}(k) + \frac{T_s}{L}u_{LQR}(k) \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Pour l'intégration de l'erreur  $v(k)$  on a :

$$v(k+1) = e(k+1) + v(k) \quad (\text{II.42})$$

L'erreur est donnée par :

$$e(k+1) = r(k+1) - y(k+1) \quad (\text{II.43})$$

$$= r(k+1) - C_d x(k+1)$$

$$v(k+1) = r(k+1) - C_d (A_d x(k) + B_d u(k)) + v(k) \quad (\text{II.44})$$

La réorganisation de l'équation (II.44) nous pouvons écrire :

$$v(k+1) = -C_d A_d x(k) + v(k) + r(k+1) - C_d B_d u_{LQR}(k) \quad (\text{II.45})$$

D'autre part le signal de référence est choisi sinusoïdal pour que la tension de sortie de l'onduleur soit sinusoïdale. Ce signal est défini par :

$$r(t) = 230\sqrt{2} \sin(\omega t + \delta) \quad (\text{II.46})$$

$$\text{Où } \delta = \frac{2FUXV_{cell}}{V_{ac}V_{load}N_0N_{stack}} q_{H_2}$$

Où  $\omega$  est la pulsation du signal de référence :

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad \text{avec } f = 50\text{Hz}$$

Le signal de référence en temps continu est écrit :

$$\ddot{r} + \omega^2 r = 0 \quad (\text{II.47})$$

On peut le représenter sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

En temps discret on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} r(k+1) \\ \dot{r}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ -\omega^2 T_s & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r(k) \\ \dot{r}(k) \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

$$n(k+1) = R_d n(k) \quad (\text{II.50})$$

Où :

$$n(k+1) = \begin{bmatrix} r(k+1) \\ \dot{r}(k+1) \end{bmatrix}; R_d = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ -\omega^2 T_s & 1 \end{bmatrix}; n(k) = \begin{bmatrix} r(k) \\ \dot{r}(k) \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

Ce qui permet d'écrire :

$$r(k+1) = C_d R_d n(k) \quad (\text{II.52})$$

D'où :

$$v(k+1) = -C_d A_d x(k) + v(k) + C_d R_d n(k) - C_d B_d u_{LQR}(k) \quad (\text{II.53})$$

D'où le système augmenté se présente comme suit :

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ v(k+1) \\ n(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d & 0 & 0 \\ -C_d A_d & 1 & C_d R_d \\ 0 & 0 & R_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \\ n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_d \\ -C_d B_d \\ 0 \end{bmatrix} u_{LQR} \quad (\text{II.54})$$

Et

$$y(k) = \begin{bmatrix} C_d & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \\ n(k) \end{bmatrix} \quad (\text{II.55})$$

Posons :

$$G = \begin{bmatrix} A_d & 0 & 0 \\ -C_d A_d & 1 & C_d R_d \\ 0 & 0 & R_d \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} B_d \\ -C_d B_d \\ 0 \end{bmatrix}$$

La loi de commande est donnée par :

$$u_{LQR} = -Kz(k) \quad (\text{II.56})$$

Les gains qui définissent la loi de commande sont ceux qui minimisent la fonction de coût J donnée par :

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \{z^T(k) Q z(k) + u^T(k) R_u u(k)\} \quad (\text{II.57})$$

De tel façon qu'on ramène  $z(0) = z_0$  vers  $z(N) = 0$

Les matrices Q et Ru sont des matrices de pondération arbitraire de l'état et de l'entrée, qui sont définies positives.

La stratégie de commande optimale sans qu'il y ait contrainte sur la commande  $U_{LQR}$  (pas de limitation par exemple) se présente comme suit :

On forme le Hamiltonien H :

$$H = \frac{1}{2} u^T(N) R_u u(N) + P^T(k+1) (Gz(k) + H u_{LQR}) \quad (\text{II.58})$$

L'équation vectorielle adjointe :

$$P^*(k) = \frac{\partial H^*}{\partial z(k)} = Q z(k) + G^T P^*(k+1) \quad (\text{II.59})$$

On suppose que l'inverse de  $G = G^{-1}$  existe.

Condition de transversalité :

$$P(N) = \frac{\partial \Theta(z(N))}{\partial z(N)} = 0 \quad (\text{II.60})$$

Trajectoire optimale  $z^*(k)$  :

$$\frac{\partial H^*(k)}{\partial u_{LQR}} = 0 \Rightarrow u^*_{LQR}(k) = -R_u^{-1} H^T P^*(k+1) \quad (\text{II.61})$$

On a 2n équations différentielles à deux conditions aux limites ( $z(0) = z_0$  et  $P(N) = P_N$ )

D'où :

$$\begin{cases} z^*(k+1) = Gz^*(k) - HR_u^{-1} H^T P^*(k+1) \\ P^*(k) = Qz^*(k) + G^T P^*(k+1) \end{cases} \text{ avec } z(0) = z_0 \quad (\text{II.62})$$

Une solution en boucle fermée proposée par Ho et Bryson (1969), tel que :

$$P(k) = P_{LQR}(k) z(k) \quad (\text{II.63})$$

Par substitution des équations (II.61), (II.62) et (II.63) afin d'éliminer  $P(k)$  nous aurons donc :

$$\begin{cases} z(k+1) = Gz(k) - HR_u^{-1} H^T P_{LQR}(k+1) z(k+1) \\ P_{LQR}(k) z(k) = Qz(k) + G^T P_{LQR}(k+1) z(k+1) \end{cases} \quad (\text{II.64})$$

D'où

$$P_{LQR}(k) z(k) = Qz(k) + G^T P_{LQR}(k+1) [I + HR_u^{-1} H^T P_{LQR}(k+1)]^{-1} Gz(k) \quad (\text{II.65})$$

Soit :

$$P_{LQR}(k)z(k) = [Q + G^T P_{LQR}(k+1) [I + HR_u^{-1} H^T P_{LQR}(k+1)]^{-1} G] z(k) \quad (\text{II.66})$$

$\forall z(k) \neq 0$ , on a :

$$P_{LQR}(k) = Q + G^T P_{LQR}(k+1) [I + HR_u^{-1} H^T P_{LQR}(k+1)]^{-1} G \quad (\text{II.67})$$

Soit :

$$P_{LQR}(k) = Q + G^T [P_{LQR}^{-1}(k+1) + HR_u^{-1} H^T]^{-1} G \quad (\text{II.68})$$

L'équation (II.68) présente l'équation de différence non linéaire matricielle de Riccati, avec condition terminale [44-46] :

$$P_{LQR}(k) \Big|_{k=N} = 0$$

La commande est :

$$u^*_{LQR}(k) = -R_u^{-1} H^T P^*(k+1) \quad (\text{II.69})$$

$$= -R_u^{-1} H^T P_{LQR}(k+1) z^*(k+1) \quad (\text{II.70})$$

D'autre part on a :

$$(P_{LQR}(k) - Q) z^*(k) = G^T P_{LQR}(k+1) z^*(k+1) \quad (\text{II.71})$$

$$P_{LQR}(k+1) z^*(k+1) = (G^T)^{-1} (P_{LQR}(k) - Q) z^*(k)$$

En remplaçant l'équation (II.71) dans (II.70) :

$$u^*_{LQR}(k) = -R_u^{-1} H^T (G^T)^{-1} (P_{LQR}(k) - Q) z^*(k) \quad (\text{II.72})$$

Pour lancer la commande optimale on doit tout d'abord résoudre :

$$P_{LQR}(k) = Q + G^T [P_{LQR}^{-1}(k+1) + HR_u^{-1} H^T]^{-1} G \quad (\text{II.73})$$

Avec condition terminale

$$P_{LQR}(k) \Big|_{k=N} = 0$$

la résolution de l'équation (II-73) Back Ward de  $k=N$  à  $k=0$  en stockant toutes les valeurs  $P_{LQR}(k)$  dans des cases mémoires pour les utiliser aux instants  $t_k$   $k=1,2,\dots,N$  durant le lancement de la commande optimale forward.

On peut ainsi adopter la stratégie de commande optimale par retour d'état.

Ou :

$$u^*_{LQR}(k) = -K_{LQR} z^*(k)$$

Avec les gains :

$$K_{LQR}(k) = R_u^{-1} H^T (G^T)^{-1} (P_{LQR}(k) - Q) \quad (\text{II.74})$$

Pour synthétiser le processus du calcul des gains optimaux nous procédons comme suit :

- on calcule  $P_{LQR}(N)=0, P_{LQR}(N-1), \dots, P_{LQR}(0)$

- on lance le calcul de la commande optimale à travers :

$$u^*_{LQR}(k) = -R_u^{-1} H^T (G^T)^{-1} (P_{LQR}(k) - Q) z^*(k) \text{ Sachant que } z^*(0) = z_0$$

- on calcule la trajectoire optimale à chaque pas à travers l'équation :

$$z^*(k+1) = Gz^*(k) + Hu^*_{LQR}(k)$$

### II.6 Résultats et discussions

Les paramètres du modèle de la PEMFC présenté sur la figure Fig.II.8 sont donnés dans le tableau .A.1 (voir Annexe).

Une commande linéaire quadratique est utilisée pour le contrôle de la tension et de la puissance active d'une PEMFC, ce qui a pour objectif de suivre la référence sinusoïdale  $r(k)$  en fonction des variations de la charge illustrées à la figure. II.12.

Les paramètres du contrôleur LQR et les spécifications du système sont présentés dans le tableau A.2 (voir Annexe).

Dans cette application une PEMFC de 45 kW, alimente 9 habitats résidentiels répartis régulièrement sur les trois phases de l'onduleur triphasé.

Les données correspondant aux appareils ménagers divers de chaque habitat sont présentées dans le tableau II.1.

La série de variation en puissance est convertie en courant de retour de la PAC pour calculer la tension de sortie de la pile PEMFC correspondante.

Electroménager	Puissance active [KW]	Facteur de puissance
Réfrigérateur (a) x2	0.61	1.0
Ampoule (b)	0.060	0.99
Lampe fluorescente(c)	0.025	0.59
Climatiseur (d)	1.68	0.97
Téléviseur (e)	0.11	0.72
Machine à laver (f)	0.42	0.54
Aspirateur (g)	1.25	0.98
Four à micro-onde (h)	1.34	0.97
Ordinateur (i)	0.12	0.66
Grille-pain (j)	1.10	1.0
Four (k) (25%)	5.81	1.0
Variateur de lumière (l)	0.505	0.73

Table II.1 Données appareils ménagers utilisés dans la simulation [46].

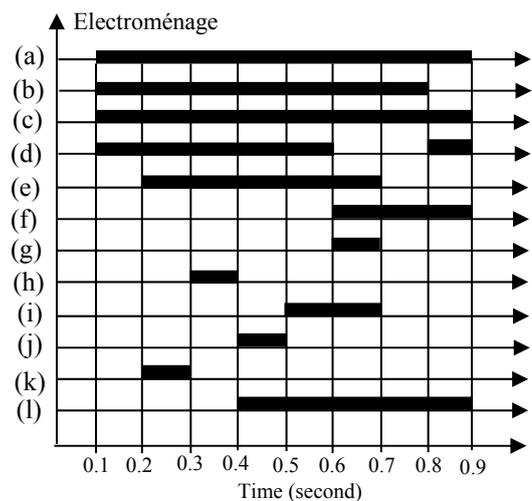


Fig .II.12 Commutation de la charge (Habitat Résidentiel)

La réponse en régime transitoire et permanent du système en utilisant le contrôleur LQR a été jugée excellente, comme le montrent les figures. II.13 à II.19

À partir des figures. II.13 à II.15, il est évident que l'augmentation de la puissance de la charge entraîne une augmentation du courant de la pile PEMFC, qui se traduit par écrasement de la tension de sortie de la pile PEMFC et vice-versa.

Les figures II.16-II.17 montrent que l'augmentation du courant de la pile PEMFC entraîne l'augmentation du débit d'hydrogène qui se traduit par l'augmentation de l'angle de phase de la tension de référence poursuivie par la commande LQR.

La figure II.18 démontre l'effet du hacheur CC/CC vis-à-vis de la variation de la charge. Il est évident que la tension du bus continu de l'onduleur est maintenue constante et insensible à la variation de la charge. La figure II.19 montre que le contrôleur LQR maintient la tension de sortie constante sous commutations de charge de la figure.II.12, et les figures. II.20-II.24 montrent les gains optimaux correspondants. La figure II.25 montre la tension instantanée de sortie simple  $V_{c1}$  avec un THD appréciable. Les tensions triphasées de sortie sont montrées sur la figure II.26

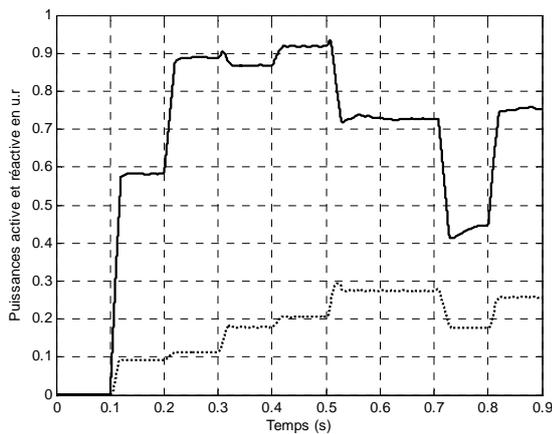


Fig. II.13. Puissances active et réactive en u.r. (45 kW base: puissance active en trait continu, puissance réactive en trait interrompu).

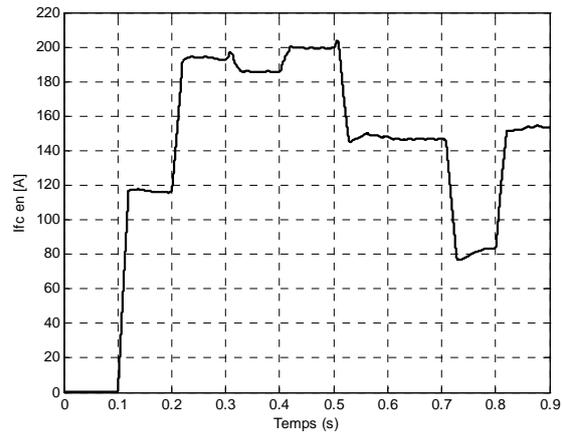


Fig. II.14. Courant  $I_{fc}$  sous variation de charge.

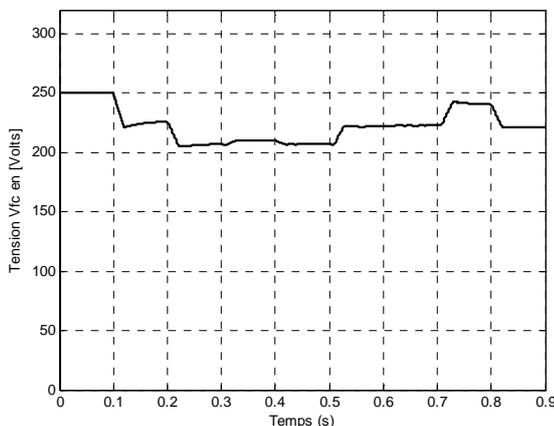


Fig. II.15. Tension  $V_{fc}$  sous variation de charge.

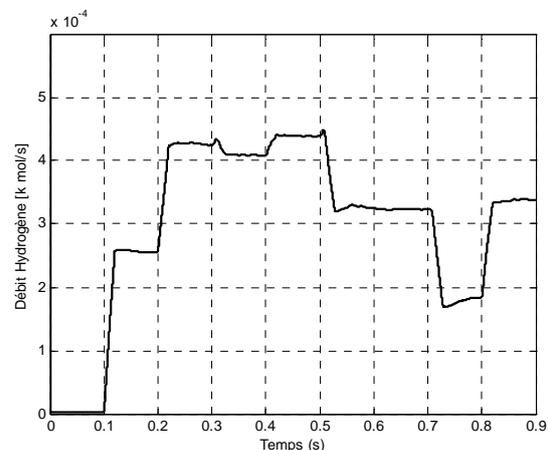


Fig. II.16. Débit d'hydrogène

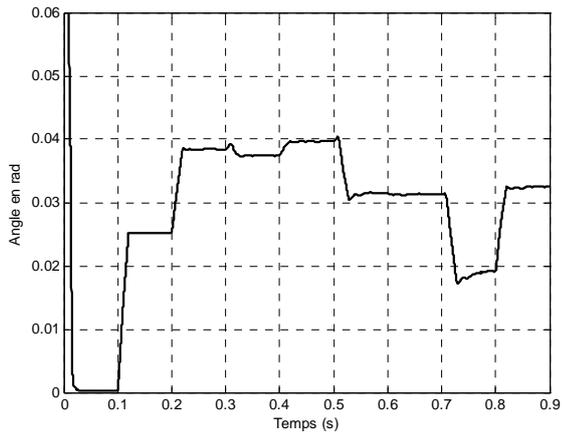


Fig. II.17 L'angle de puissance  $\delta$

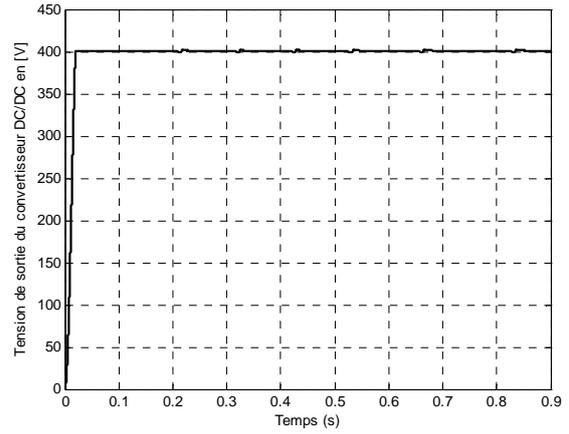


Fig. II.18 Tension de sortie du convertisseur DC/DC

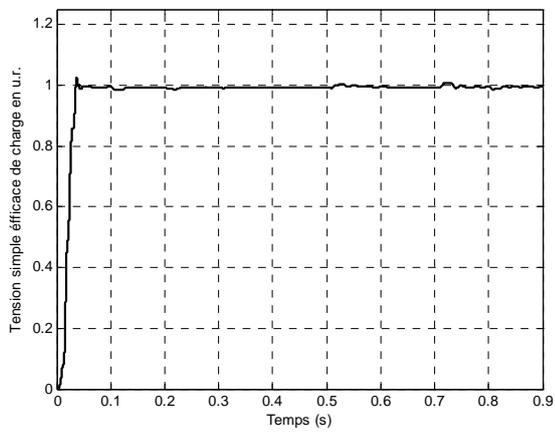


Fig. II.19 Tension simple efficace de charge sur 230 V de base

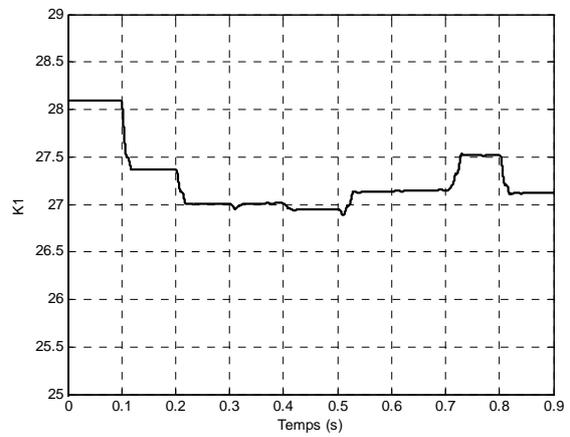


Fig. II.20 Le gain optimal  $K_1$

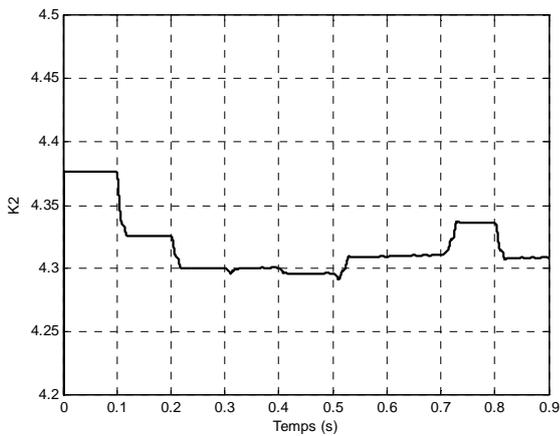


Fig. II.21 Le gain optimal  $K_2$

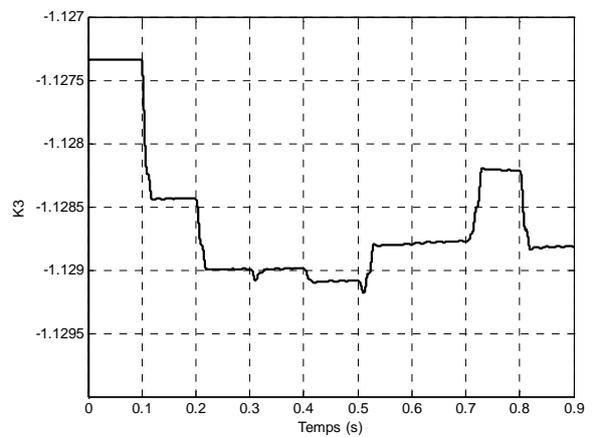


Fig. II.22 Le gain optimal  $K_3$

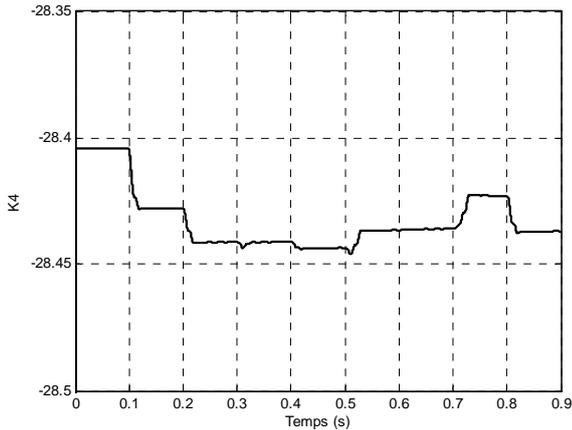


Fig. II.23 Le gain optimal  $K_4$

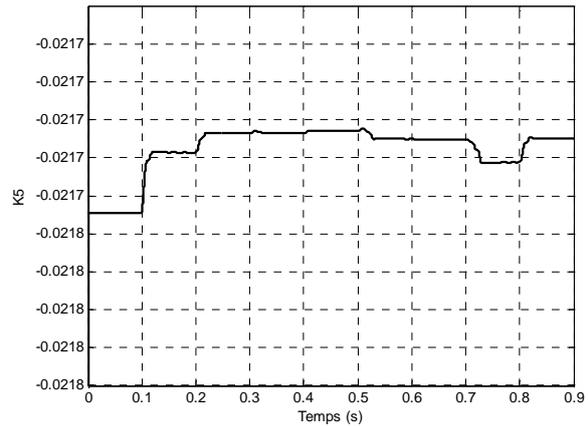


Fig. II.24 Le gain optimal  $K_5$

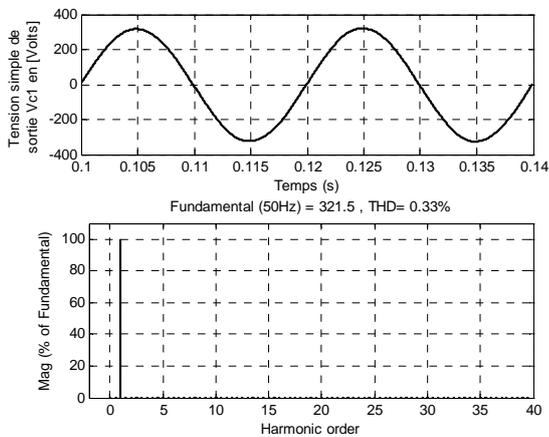


Fig. II.25 Tension simple de sortie  $V_{c1}$  avec spectre d'harmoniques

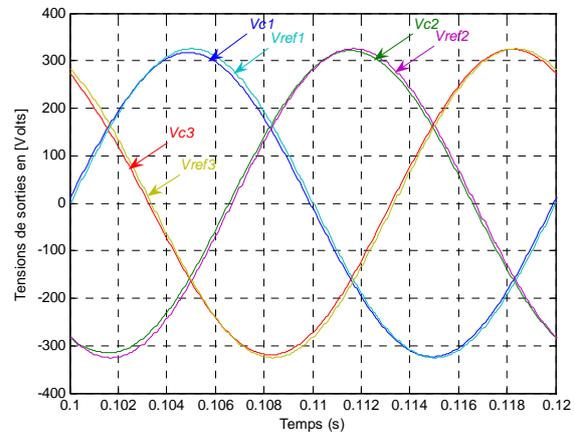


Fig. II.26 Tensions instantanées de sorties  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$ ,  $V_{c3}$

## II.7 Conclusion

L'étude du comportement dynamique d'une source de production de l'énergie électrique composée de l'association d'une pile à combustible type PEMFC et de convertisseurs statiques CC/CC et CC/CA a été réalisée dans ce chapitre dans l'environnement MATLAB/SIMULINK.

Après une introduction au domaine des piles à combustible, peu exploré par notre communauté d'électrotechniciens, le principe de fonctionnement de ces générateurs électrochimiques et leurs différentes technologies étaient vus.

Un modèle dynamique de la pile qui tient compte des considérations générales pour un fonctionnement fiable est exprimé.

Une nouvelle vision pour la modélisation du système était faite. Elle repose sur le fait que:

- La variation du courant appelé par la charge se traduit par la variation de la tension de la PAC.

- Pour faire face aux variations de la tension à l'entrée de l'onduleur, un convertisseur CC/CC est utilisé pour réduire les dimensions de la PAC d'une part et pour maintenir une tension continue stable de 400V d'autre part.
- Afin de déterminer les instants d'amorçages des interrupteurs du convertisseur CC/CA, un contrôleur LQR est proposé pour modifier les gains optimaux  $k_i$ , et l'angle de charge pour contrôler la puissance active et réactive à chaque variation de charge.

Il est évident à partir des résultats de simulation que les réponses dynamiques obtenues sont satisfaisantes. La stratégie de contrôle proposée offre de bonnes performances par rapport aux variations de charge avec un faible THD, même à basses fréquences de commutation (2 kHz) qui la rende très utile pour les applications de grande puissance.

Dans ce chapitre la PEMFC s'intègre dans le système UPS à travers l'alimentation d'une charge isolée (cas d'absence du réseau principal) en cas de présence du réseau la PEMFC pourra s'intégrer à travers l'injection de la puissance active tout en dépolluant en courants harmoniques le réseau (filtre actif parallèle).

Mais avant de présenter cette deuxième intégration nous avons jugé utile de consacrer le chapitre suivant à l'association de la PEMFC au filtrage actif parallèle.

# **Chapitre III**

## **Commande du Filtre Actif parallèle associé à une PEMFC**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre l'objectif de recherche aura pour objet l'amélioration des performances de compensation du filtre actif parallèle dans le cas des conditions de tensions distordues d'une part et l'étude de l'association PEMFC – filtre actif parallèle en vu de remplacer l'élément de stockage de l'énergie d'autre part. La figure III.1 rappelle la structure générale d'un filtre actif parallèle. Ce filtre peut être décomposé en deux parties: la partie puissance et la partie commande [48] .

La première comporte un onduleur, un filtre de découplage et une source de stockage d'énergie qui pourra être des condensateurs ou une autre source telle que la PEMFC.

Dans cette étude, nous allons présenter successivement :

- la structure générale du filtre actif parallèle de type tension ;
- une variante de la méthode des puissances active et réactive instantanées. Cette variante permet d'identifier les courants harmoniques de référence et met en œuvre des filtres sélectifs dits « multi-variables »,
- l'intérêt d'utiliser des FMVs,
- le contrôle du filtre actif par trois types de commandes, MLI à échantillonnage naturel, hystérésis conventionnelle et logique floue.
- application du contrôleur flou pour la commande du FAP :
  - trois bras, cinq niveaux [49]
  - association PEMFC-FAP trois bras, cinq niveaux

Pour conclure ce chapitre, les résultats de simulation que nous avons obtenus seront présentés et commentés.

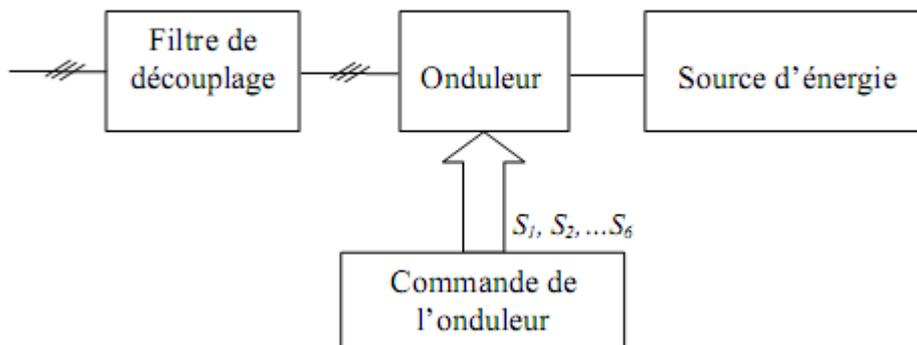


Fig. III.1. Structure générale d'un filtre actif parallèle.

### III.2 Structure générale : filtre actif parallèle - réseau- charge polluante

La figure III.2 présente la structure générale Filtre Actif Parallèle - Réseau- Charge Polluante. Le filtre actif à structure tension où l'onduleur de tension est connecté en parallèle sur le réseau via un filtre de découplage ( $L_f$ ,  $R_f$ ). La tension  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande.

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court circuit et une charge polluante formée par un pont de Graëtz à 6 diodes.

L'onduleur de tension triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en anti-parallèle avec une diode.

Dans cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

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

Les deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandés d'une façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de tension dépendent de l'état de trois signaux de commande  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ , définis ci-dessous :

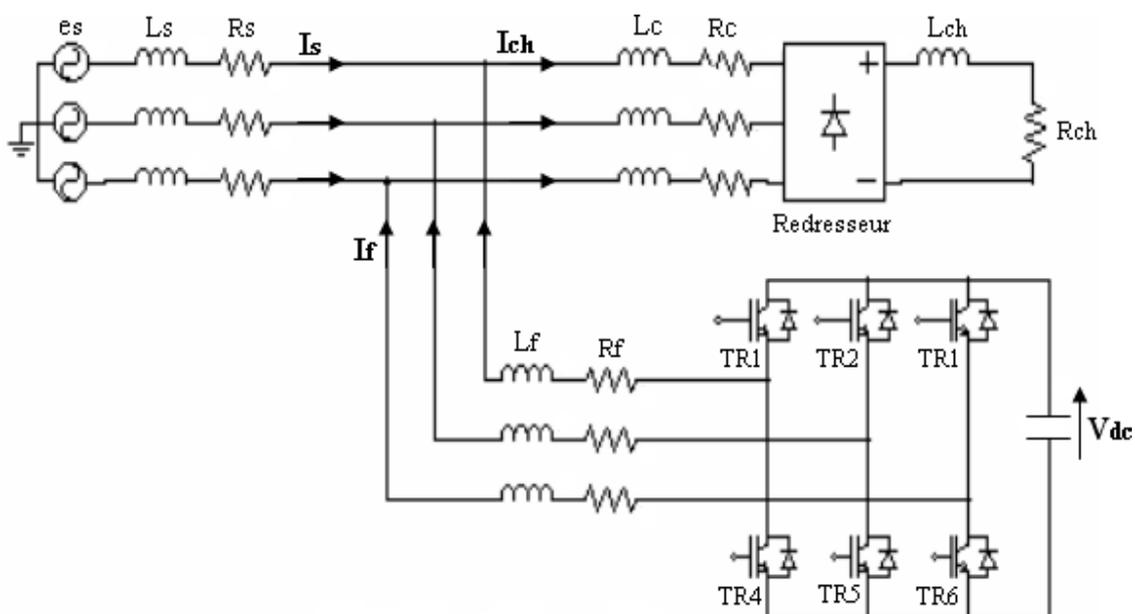


Fig. III.2. Structure générale de l'association filtre actif- réseau- charge polluante

$$T_1 = \begin{cases} 1 & T_{R1} \text{ fermé et } T_{R4} \text{ ouvert} \\ 0 & T_{R1} \text{ ouvert et } T_{R4} \text{ fermé} \end{cases}$$

$$T_2 = \begin{cases} 1 & T_{R2} \text{ fermé et } T_{R5} \text{ ouvert} \\ 0 & T_{R2} \text{ ouvert et } T_{R5} \text{ fermé} \end{cases}$$

$$T_3 = \begin{cases} 1 & T_{R3} \text{ fermé et } T_{R6} \text{ ouvert} \\ 0 & T_{R3} \text{ ouvert et } T_{R6} \text{ fermé} \end{cases}$$

Les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un temps de retard entre la commande au blocage d'un interrupteur et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras.

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif  $V_f$  (référéées au neutre  $n$  de la source), comme le montre le Tab. III.1 [50].

Cas N°	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	V <sub>f3</sub>	V <sub>f2</sub>	V <sub>f1</sub>
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
4	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

Table III.1. Tensions en sortie de l'onduleur.

### III.3 Commande du filtre actif

La commande du filtre actif a pour objectif, la génération de courants harmoniques afin qu'ils suivent en temps réel leurs références harmoniques. Il faut donc identifier ces courants harmoniques de référence. La figure III.2 présente le système global à étudier, constitué du réseau d'alimentation, de la charge polluante et du filtre actif parallèle.

La partie commande du filtre actif est constituée de trois parties principales :

- Identification des courants harmoniques de la charge polluante,
- Commande de l'onduleur du filtre actif,
- Régulation du filtre actif.

### III.3.1 Identification des courants harmoniques de référence

Le courant absorbé par une charge polluante est constitué par une composante fondamentale et des composantes harmoniques. Le filtre actif doit générer les courants harmoniques de référence, ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal.

L'identification avec précision des courants harmoniques de la charge polluante demeure une phase nécessaire et d'importance particulière pour l'amélioration des performances du filtre actif.

Les méthodes d'identification de courant perturbateur (harmonique) peuvent être regroupées en deux catégories.

La première utilise la transformée de Fourier rapide (FFT) dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérantes. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive. Fondamentalement, les différents schémas proposés essaient d'inclure la composante réactive afin d'éliminer les courants harmoniques et de corriger le facteur de puissance [51].

La méthode classique des puissances instantanées est devenue aujourd'hui très courante dans les applications comme le filtrage actif car elle réalise le meilleur compromis entre performances statique et dynamique [48]. la méthode d'isolation de la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, ...) [52-53].

Parmi toutes les méthodes présentées dans la littérature, nous avons choisi une variante de la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées. Elle utilise des filtres FMV au lieu des filtres classiques (FPB et FPH).

#### III.3.1.1 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

La méthode des puissances instantanées est une méthode temporelle. Elle a été utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en oeuvre des méthodes fréquentielles. Cette méthode a été introduite par H. Akagi [54], son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de

ligne, à un système diphasé (repère  $\alpha$ - $\beta$ ) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées [55].

### III.3.1.1.1 Calcul des puissances réelle et imaginaire instantanée.

Le concept de cette théorie est très commun pour l'extraction des courants de référence d'un filtre actif parallèle. Elle consiste en une transformation variable, dans le référentiel  $\alpha$ - $\beta$ , des puissances, courants et tensions instantanés à partir du référentiel a-b-c [56-57].

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties: active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation (III-1).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{III-1})$$

Cette méthode exploite la transformation  $\alpha$ - $\beta$  pour obtenir les puissances réelles et imaginaires, les valeurs instantanées des courants et tensions triphasées peuvent être obtenues dans le plan  $\alpha$ - $\beta$  par les équations suivantes:

Les tensions :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III-2})$$

Et les courants :

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

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

$$P(t) = v_{sa} i_{sa} + v_{sb} i_{sb} + v_{sc} i_{sc} = p(t) + p_0(t) \quad (\text{III-4})$$

$$p(t) = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (\text{III-5})$$

$$p_0(t) = v_0 i_0 \quad (\text{III-6})$$

Avec  $p(t)$  la puissance réelle instantanée,  $p_0(t)$  la puissance homopolaire instantanée, de la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -1/\sqrt{3}[(v_{sa} - v_{sb})i_{sc} + (v_{sb} - v_{sc})i_{sa} + (v_{sc} - v_{sa})i_{sb}] = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \quad (\text{III-7})$$

A partir des relations (III-5) et (III-7), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III-8})$$

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 :

$$p = \hat{p} + \tilde{p} \quad (\text{III-9})$$

$$q = \hat{q} + \tilde{q} \quad (\text{III-10})$$

Avec :

- $\hat{p}$  une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- $\hat{q}$  une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  Composantes alternatives de  $p$  et  $q$

### III.3.1.1.2 Calcul des différentes composantes du courant

En inversant la relation (III-8), nous pouvons calculer les courants dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  comme le montre l'équation (III-11) :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III-11})$$

En considérant les équations (III-9-11), nous pouvons séparer le courant dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) en trois composantes, active, réactive et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courants harmoniques}} \quad (\text{III-12})$$

Avec  $\Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2$  supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

Maintenant, si on souhaite également compenser la puissance réactive, ainsi que les courants harmoniques générés par les charges non linéaires, le signal de référence du filtre actif parallèle doit inclure  $\tilde{p}$  et  $\hat{q} + \tilde{q}$ . Dans ce cas, les courants de référence sont calculés par:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \hat{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III-13})$$

Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence, sont calculés à partir de la transformation ( $\alpha$ - $\beta$ ) inverse donnée par la relation (III-14) :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (\text{III-14})$$

La figure III.3 présente le principe de cette méthode.

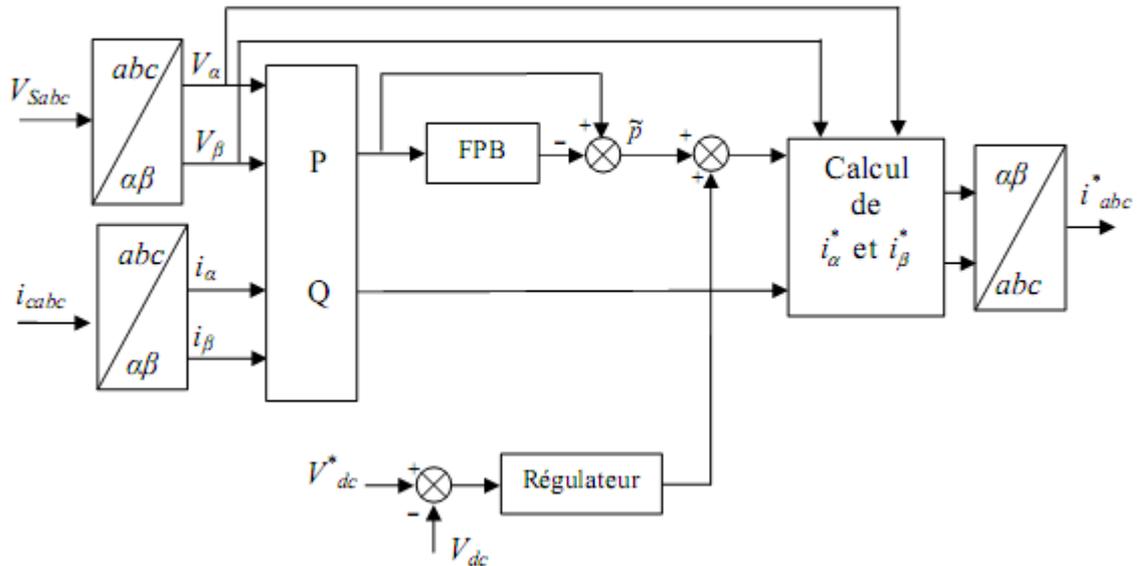


Fig. III.3. Détermination des courants de référence du filtre actif

Dans la méthode classique des puissances instantanées [53], on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passe-bas afin de ne garder que la composante harmonique du signal. La figure III.4 présente les deux types de filtre d'extraction :

Cependant, comme cela est exposé dans la littérature, ces filtres d'extraction permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes. Ces deux types de filtres ont été étudiés [57], et ils n'ont pas donné entière satisfaction car :

- Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En général, la fréquence de coupure est choisie assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif de puissance lors de variations rapides de la charge.

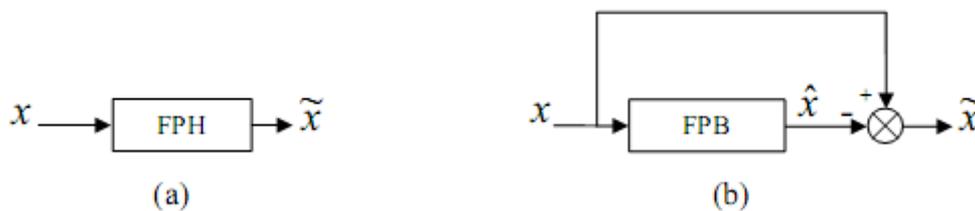


Fig. III.4. Deux types classiques de filtres d'extraction de la composante harmonique.

- Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante.

Pour ces raisons, un nouveau type de filtre d'extraction nommé ici FMV a été développé. Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok [58] et est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, directement selon les axes  $\alpha$ - $\beta$  comme cela est présenté à la figure III.5.

Les expressions liant les composantes  $\hat{x}_{\alpha\beta}(s)$  en sortie du FMV aux composantes d'entrée  $x_{\alpha\beta}(s)$  sont les suivantes :

$$\hat{x}_{\alpha}(s) = \frac{k}{s} [x_{\alpha}(s) - \hat{x}_{\alpha}(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_{\beta}(s) \quad (\text{III-15})$$

$$\hat{x}_{\beta}(s) = \frac{k}{s} [x_{\beta}(s) - \hat{x}_{\beta}(s)] + \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_{\alpha}(s) \quad (\text{III-16})$$

Sachant que :

$x_{\alpha\beta}$  : Le signal électrique d'entrée selon les axes  $\alpha$ - $\beta$ , de nature tension ou courant

$\hat{x}_{\alpha\beta}(s)$  : Les composantes fondamentales de  $x_{\alpha\beta}$

$k$  : Constante à fixer

$\omega_c = 2\pi f$  : pulsation fondamentale du réseau

Ce filtre FMV sera utilisé dans toutes les commandes étudiées tout au long de ce travail. La figure III.6 présente le schéma modifié de l'identification des courants de référence par la méthode des puissances instantanées en employant des FMVs.

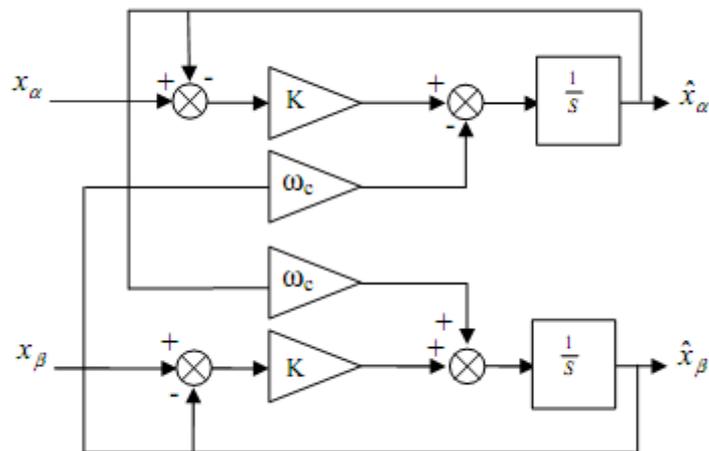


Fig. III.5. Principe du FMV.

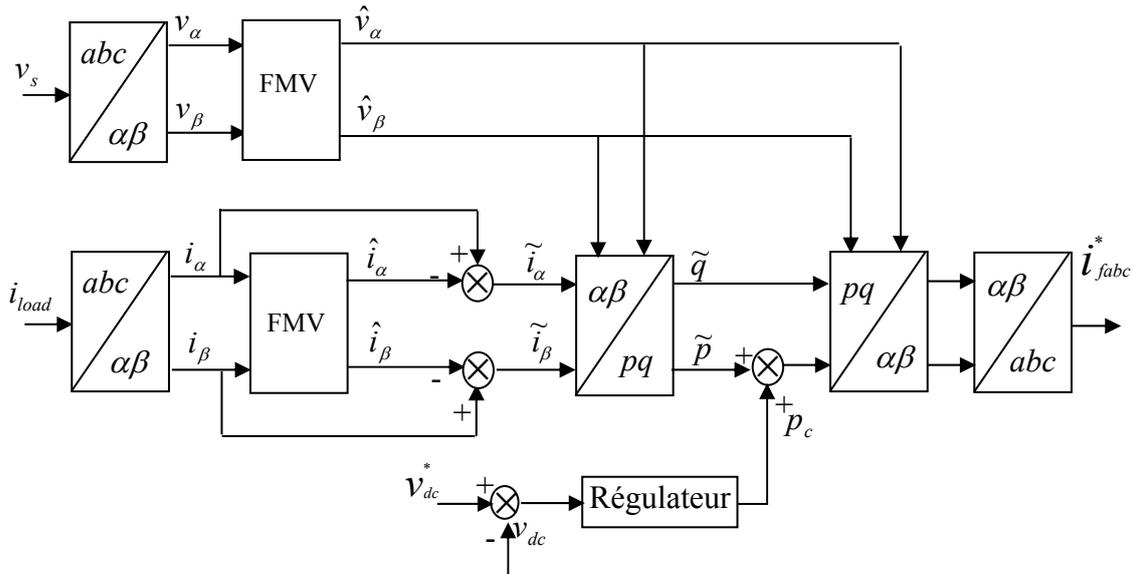


Fig. III.6. Détermination des courants de référence du filtre actif à l'aide de FMV.

**III.3.1.2 Performances du FMV**

Le principe du FMV est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux (courants/tensions), directement selon les axes  $\alpha$ - $\beta$ . La figure III.7 présente le diagramme de Bode qui illustre les performances du filtre FMV accordé sur la pulsation fondamentale ( $\omega_c = 2\pi f$  et  $f = 50\text{Hz}$ ) pour différentes valeurs du paramètre  $K$ . On remarque qu'il n'y a pas de déphasage ou de déplacement introduit par ce filtre à la pulsation  $\omega_c$ . On peut noter aussi que la sélectivité du FMV augmente lorsque  $K$  diminue [59], [60-61].

**III.3.1.2.1 Comportement du FMV**

Le comportement du FMV pour des signaux équilibrés avec des harmoniques, a été étudié à travers des simulations sous Matlab/Simulink.

Nous supposons que les trois signaux (ici des tensions par exemple) sont équilibrés et comportent l'harmonique de rang 5. Les expressions des trois tensions sont alors de la forme :

$$V_{sa}(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t) + V_5 \sin(5\omega t) \tag{III-17}$$

$$V_{sb}(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t - 2\pi/3) + V_5 \sin(5\omega t - 2\pi/3) \tag{III-18}$$

$$V_{sc}(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t + 2\pi/3) + V_5 \sin(5\omega t + 2\pi/3) \tag{III-19}$$

Les résultats de simulation obtenus témoignent de l'efficacité du FMV. Ce FMV donne toujours de bons résultats sans changement de phase. Les figures III.8 et III.9 montrent les résultats de simulation où le THD vaut 20 % en entrée du filtre (figure III.8), et 1,55 % en sortie du filtre (figure III.9).

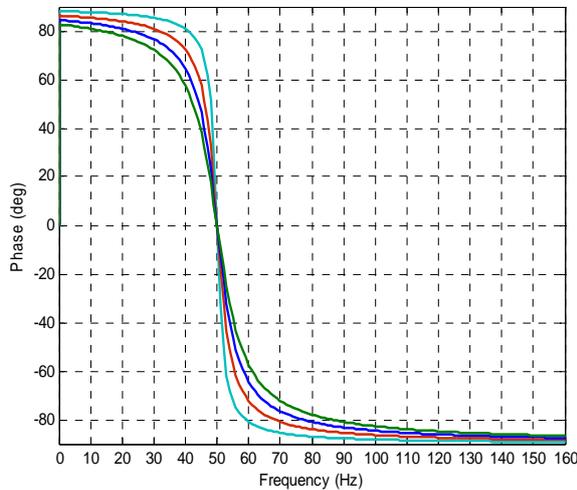
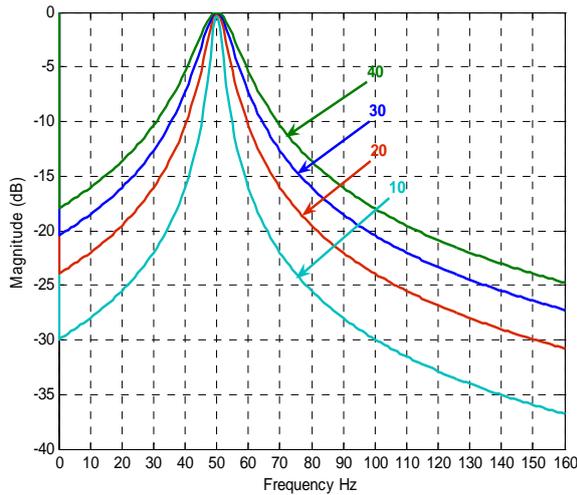


Fig. III.7. Diagramme de Bode en fonction de K.

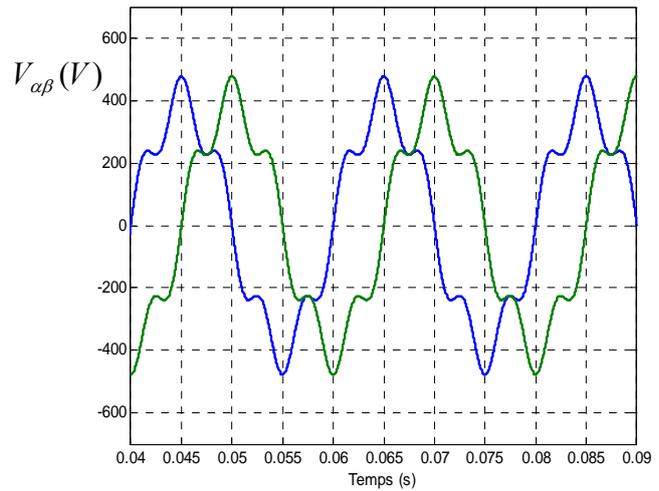


Fig.III.8 Tensions  $V_{\alpha\beta}$  (V) en entrées du FMV

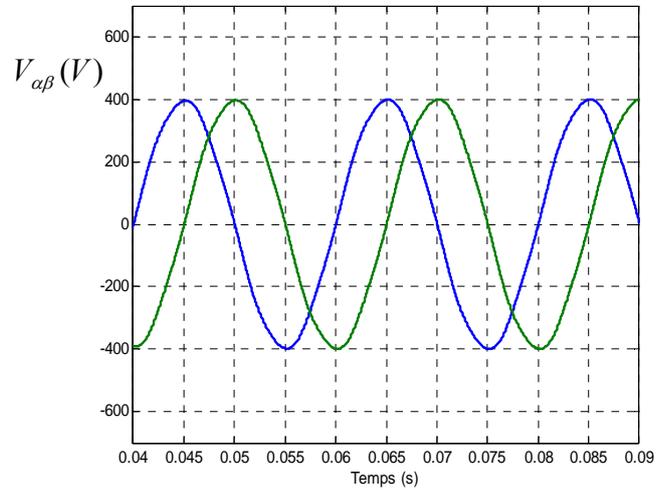


Fig.III.9 Tensions  $V_{\alpha\beta}$  (V) en sorties du FMV

### III.3.2 Techniques de commande de l'onduleur du filtre actif

Les performances du filtre actif, notamment la diminution du THD du courant de source sont liées aux :

- Performances de la génération des références de courants harmoniques.
- Topologies de l'onduleur de tension.
- Techniques de commande de l'onduleur de tension (poursuite des courants de références).

Dans ce paragraphe nous allons examiner trois techniques de commandes de l'onduleur de tension, à savoir :

- MLI à échantillonnage naturel,
- Hystérésis conventionnelle,
- Commande par logique floue.

### III.3.2.1 Commande par MLI à échantillonnage naturel :

Le principe du contrôle par MLI est décrit à la figure III.10. L'écart entre le courant réel et sa référence est appliqué à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs. La commande par MLI permet un fonctionnement à fréquence fixe et conduit à un contenu harmonique parfaitement identifié. Cependant, cette technique a des propriétés dynamiques qui peuvent être limitatives et la réponse du système lors d'un changement brutal des courants de référence est plus lente que celle d'une commande par hystérésis [56].

### III.3.2.2 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure III.11 décrit son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence et le courant réel produit par l'onduleur. Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés [56].

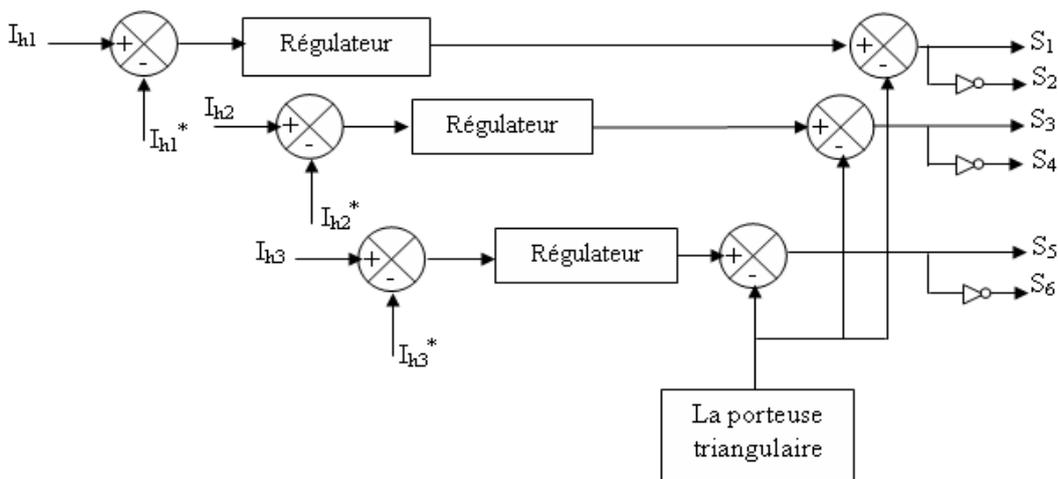


Fig. III.10. Principe de la commande par MLI.

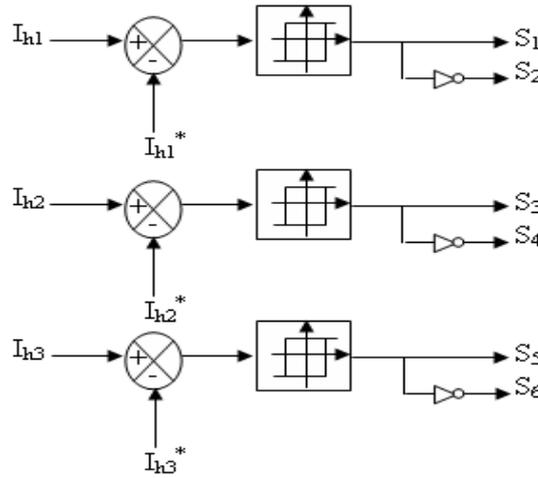


Fig. III.11. Commande conventionnelle par hystérésis.

**III.3.2.3 Commande par Logique Floue :**

**III.3.2.3.1 Introduction :**

La modélisation adéquate du système à régler à l’aide de la fonction de transfert ou d’équations d’état demeure une étape nécessaire voir indispensable pour les méthodes de réglage conventionnelles. Celles-ci ne sont pas toujours disponibles.

La majorité des systèmes industriels complexes sont difficiles à contrôler automatiquement. Cette difficulté provient de :

- Leur non-linéarité.
- La variation de leurs paramètres.
- La qualité des variables mesurables.

Ces difficultés ont conduit au développement de nouvelles techniques dont le réglage par logique floue qui s’adapte bien au réglage et à la commande de processus mal maîtrisable par des méthodes classiques conventionnelles, et permet d’obtenir une commande performante et robuste vis-à-vis des incertitudes sur les paramètres et les perturbations externes.

**III.3.2.3.2 Eléments de base d’un contrôleur à logique floue**

La configuration interne d’un régulateur par logique floue est donnée par la figure III-12, elle est composée de trois blocs distincts dont les définitions sont données ci-dessous [62-63].

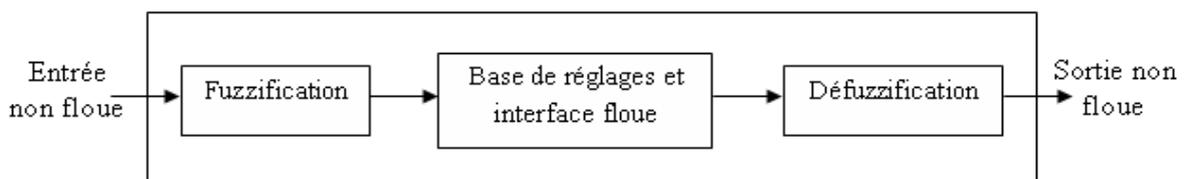


Fig. III.12: Schéma synoptique général d’un contrôleur flou

### 1. Fuzzification

Elle présente la première étape de traitement flou, son objectif est de transformer les variables déterministes d'entrée en variables linguistiques, en définissant des fonctions d'appartenance pour différentes variables d'entrée [61-62]. Cette étape consiste à définir les fonctions d'appartenance (ce qui est appelé fonction caractéristique pour un sous-ensemble ordinaire) pour les différentes variables, en particulier les variables d'entrées, on réalise ainsi le passage des grandeurs physiques en variables linguistiques (variables floues) qui peuvent être traitées par les inférences.

En général on utilise, dans la commande, des fonctions d'appartenances triangulaire, trapézoïdale, gaussienne au nombre de (3, 5, 7,...).

### 2. Inférence

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adaptées qui relient les grandeurs mesurées, (les variables d'entrées) transformées en variables linguistiques à l'aide de la fuzzification, à la variable de sortie [62-63].

On peut décrire l'inférence de manière explicite par la description linguistique à l'aide d'un certain nombre de règles où chaque règle à la forme suivante :

**Si** l'erreur est grande **alors** la commande est moyenne.

Pour le réglage par logique floue, on utilise généralement les méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence max-min (Méthode de Mamdani).
- Méthode d'inférence max-prod .
- Méthode d'inférence somme-prod.

Le choix de la méthode dépend de l'utilisateur et du cas à traiter. Dans notre cas on a opté pour la méthode d'inférence max\_min (méthode de Mamdani).

La méthode de Mamdani consiste à prendre le minimum parmi les conditions lié par l'opérateur **et** et à prendre le maximum des conditions liées par l'opérateur **ou**, ensuite prendre en tout point de l'ensemble représentant la conclusion, le minimum entre la valeur de cet ensemble et celle du maximum des conditions. L'ensemble représentant la commande s'obtient en choisissant en tout point le maximum des ensembles flous résultants de l'exécution des règles.

### 3. Défuzzification

Elle convertit l'ensemble flou résultant de l'agrégation en une seule valeur réelle dans le but de donner plus de certitude à la sortie du système d'inférence flou [62-63]).

Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette opération, parmi lesquelles nous citons :

- La méthode du maximum: Elle consiste à ne prendre en compte que les valeurs possédant un degré maximum d'appartenance à l'ensemble flou agrégé. Cette technique est simple à appliquer,

mais peu employée, étant donné qu'elle est basée sur l'opérateur maximum qui privilégie une seule règle parmi celles qui sont présentes.

- La méthode de la moyenne pondérée (méthode des hauteurs pondérées ou méthode de la moyenne des maximums): Celle-ci considère comme valeur de sortie la moyenne des valeurs préconisées par chaque règle et pondérées par leur degré respectif de validité.

- La méthode du centre de gravité: Cette méthode, génère le centre de gravité de la surface engendrée par la fonction d'appartenance de l'ensemble flou agrégé.

### III.3.2.3.3 Application à la commande d'un filtre actif

Souvent, le régulateur flou possède deux entrées (l'erreur et sa dérivée) et une sortie représentant la commande floue elle-même.

La régulation floue consiste à transformer le régulateur classique en un régulateur flou avec un processus. La figure III-13, montre le schéma de principe d'un régulateur flou [64,65].

#### 1. Partitions floues

Les deux entrées ( $e$  et  $de/dt$ ) sont définies chacune par trois sous-ensembles: Négative 'N', Nulle 'ZE', Positive 'P', les fonctions d'appartenance sont du type Gaussienne. La sortie ( $cde$ ) est définie par cinq sous-ensembles: Grande Négative 'GN', Négative 'N', Nulle 'ZE', Positive 'P', Grande Positive 'GP', les fonctions d'appartenance sont du type triangulaire [53,54]. Les partitions floues de la  $cde$ ,  $e$  et  $de/dt$  sont représentées dans les figures (III-14,15,16)

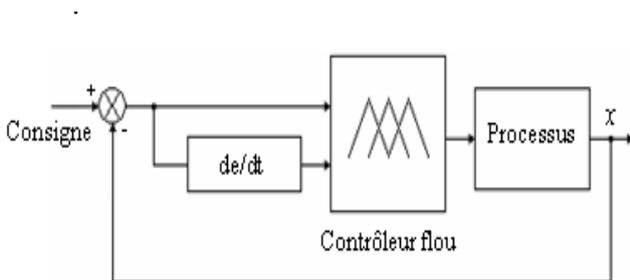


Fig. III.13 Schéma de principe d'un régulateur flou

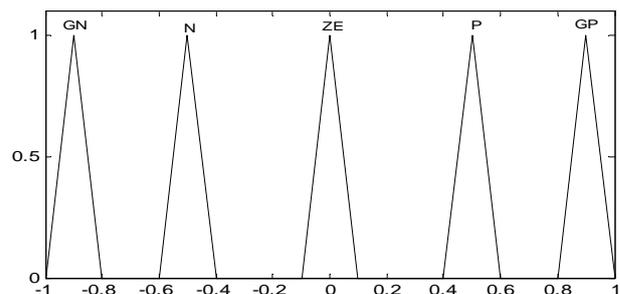


Fig. III.14. Partition floue de  $cde$

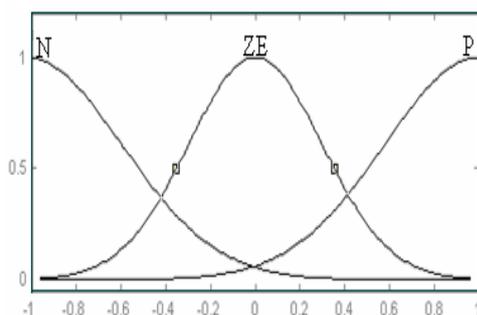


Fig. III.15. Partition floue de  $e$

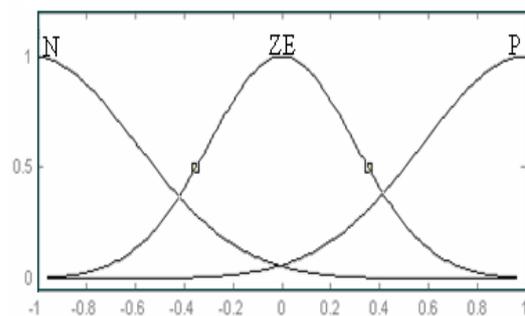


Fig. III.16. Partition floue de  $de/dt$

## 2. Base des règles

L'établissement des règles floues se base sur le sens de variation de l'erreur  $e$ , de son signe algébrique et de celui de sa dérivée  $de/dt$ . Comme illustrée dans la Figure III-17, et sachant que :

- $e$  est croissante si sa dérivée  $de/dt$  est positive,
- $e$  est constante si sa dérivée  $de/dt$  est nulle,
- $e$  est décroissante si sa dérivée  $de/dt$  est négative,
- $e$  est positive si la consigne est supérieure à la sortie  $x$  (consigne  $> x$ ),
- $e$  est nulle si la consigne est égale à la sortie  $x$  (consigne  $= x$ ),
- $e$  est négative si la consigne est inférieure à la sortie  $x$  (consigne  $< x$ ),

Alors la commande cde sera:

- Nulle (ZE) si  $e$  est nulle (ZE),
- Grande positive (GP) si  $e$  est positive dans les deux situations de croissance et décroissance,
- Grande négative (GN) si  $e$  est négative dans les deux situations de croissance et décroissance,
- Négative (N) si  $e$  est croissante vers zéro,
- Positive (P) si  $e$  est décroissante vers zéro.

Ainsi, les règles floues seront définies comme suit:

- SI  $e$  est ZE, ALORS cde est ZE,
- SI  $e$  est P, ALORS cde est GP,
- SI  $e$  est N, ALORS cde est GN,
- SI  $e$  est ZE ET  $de/dt$  est P, ALORS cde est N,
- SI  $e$  est ZE ET  $de/dt$  est N, ALORS cde est P.

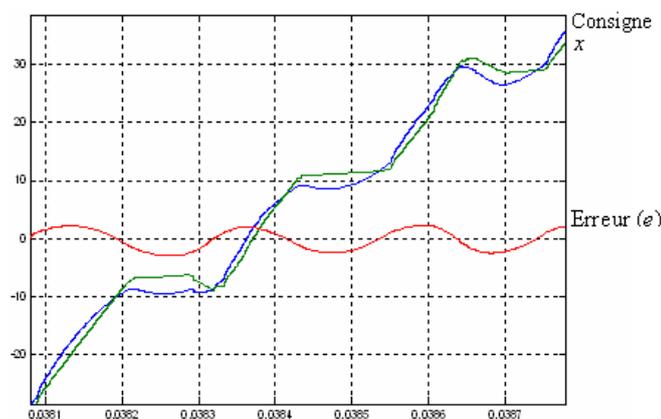


Fig. III.17. Établissement des règles floues en fonction du sens d'évolution et du signe algébrique de  $e$

### 3. Défuzzification

Pour la défuzzification de la sortie floue, on a utilisé la méthode du centre de gravité.

#### III.3.3 Régulation des filtres actifs

##### III.3.3.1 Régulation de la tension continue

La tension moyenne  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. La régulation de la tension aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur  $P_c$  s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice  $\tilde{P}$  et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi  $V_{dc}$ . La puissance  $P_c$  représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension  $V_{dc}$  égale à la valeur de la tension de référence souhaitée ( $V_{dc-ref}$ ) [66,62].

Le régulateur employé ici est un régulateur proportionnel simple ( $K_c$ ) avec une action de filtrage au préalable sur la tension mesurée  $V_{dc}$ , réalisée par un filtre passe-bas du premier ordre de manière à atténuer les fluctuations à 300 Hz.

En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (\text{III-20})$$

Notons que la relation (III-20) est non linéaire. Pour de faibles variations de la tension  $V_{dc}$  autour de sa référence  $V_{dc-ref}$ , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$P_c = C_{dc} \cdot V_{dc-ref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \quad (\text{III-21})$$

$$\Rightarrow V_{dc}(p) = \frac{P_c(p)}{V_{dc-ref} \cdot C_{dc} \cdot p} \quad (\text{III-22})$$

A partir de la relation (III-22), 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.18. Le choix du paramètre  $K_c$  aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal [66].

La fonction de transfert de l'ensemble régulateur – filtre passe bas est donnée par :

$$RF(p) = \frac{K_c}{1 + \tau_c \cdot p} \quad (\text{III-23})$$

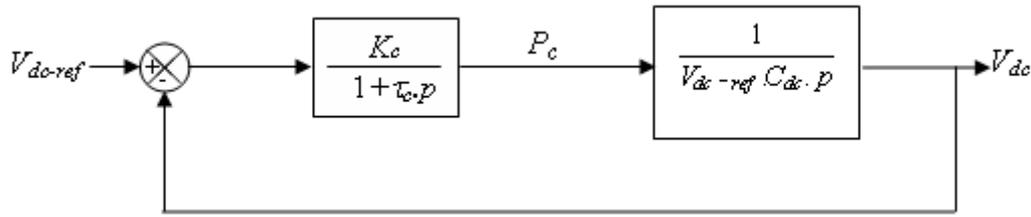


Fig. III.18. Boucle de régulation de la tension continue

La fonction de transfert en boucle fermée est alors :

$$F_c(p) = \frac{\omega_c^2}{p^2 + 2\xi_c \omega_c p + \omega_c^2} \quad (\text{III-24})$$

Avec :

$$\omega_c = \sqrt{\frac{K_c}{C_{dc} \cdot V_{dc-ref} \cdot \tau_c}} \quad \text{et} \quad \xi_c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_{dc} \cdot V_{dc-ref}}{K_c \tau_c}}$$

Pour réaliser un bon compromis entre les performances dynamique et statique nous choisirons une valeur de  $\xi_c$  comprise entre 0,4 et 0,8, soit 0,7 et  $2\pi \cdot 68$  (rad/s) pour  $\omega_c$ .

### III.3.3.2 Régulation du courant du filtre actif

En négligeant la résistance de l'inductance  $L_f$ , l'équation reliant la tension qui doit fournir l'onduleur, afin de créer des courants harmoniques en opposition de phase à ceux existant sur le réseau et la tension au point de raccordement est définie par :

$$V_f = V_s + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (\text{III-25})$$

La transformation de Laplace de l'équation (III-25) est donnée par :

$$V_f = V_s(p) + pL_f \cdot I_f(p) \quad (\text{III-26})$$

La relation (III-26) donne la grandeur asservie  $I_f$  en fonction de la grandeur de commande  $V_f$ .

On obtient :

$$I_f(p) = \frac{V_f(p) - V_s(p)}{L_f p} \quad (\text{III-27})$$

La tension  $V_f$  donnée par la relation (III-26) est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier terme est la tension du réseau qui est facilement mesurable. Le deuxième terme est égal à la tension aux bornes de l'inductance  $L_f$  lorsqu'elle est traversée par un courant égal à celui de la référence. Le courant de référence est composé des courants harmoniques avec des fréquences multiples de celle du réseau.

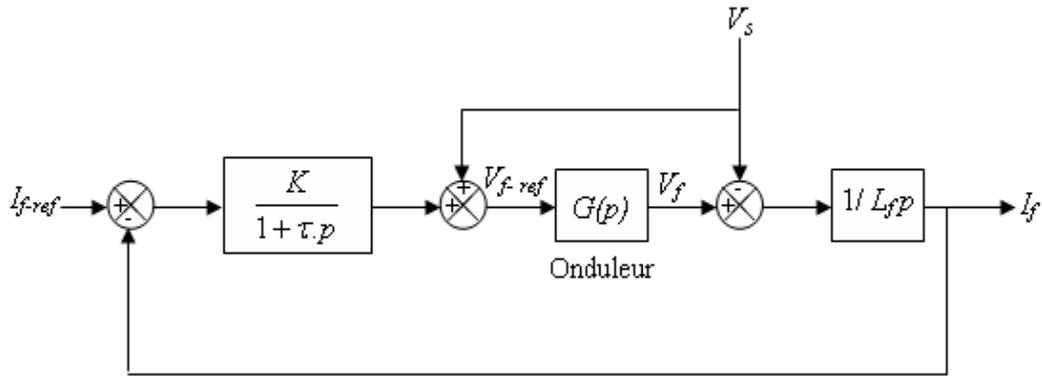


Fig. III.19. Schéma de la régulation des courants du filtre actif

Pour éviter l'action des harmoniques dus aux découpages sur le fonctionnement du régulateur, on peut ajouter un filtre passe-bas du premier ordre avant celui-ci. Le schéma de régulation du courant est décrit par la figure III.19. Dans la gamme des fréquences des courants harmoniques à compenser, l'onduleur de tension à commande MLI peut être grossièrement modélisé par un gain  $G_0$  :

$$G_0 = \frac{V_c}{2.U_p} \tag{III-28}$$

Avec :

$U_p$  : amplitude de la porteuse triangulaire.

$V_c$  : tension côté continu de l'onduleur.

Pour que  $V_f$  soit égale à  $V_f^*$ , nous choisissons  $G_0$  égal à 1. Le schéma de la régulation de ce courant peut alors se simplifier, comme le montre la figure III.20.

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F_i(s) = \frac{\omega_i^2}{p^2 + 2\zeta_i\omega_i p + \omega_i^2} \tag{III-29}$$

Avec :

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K}{L_f \cdot \tau}} \quad \text{et} \quad \zeta_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_f}{K \tau}}$$

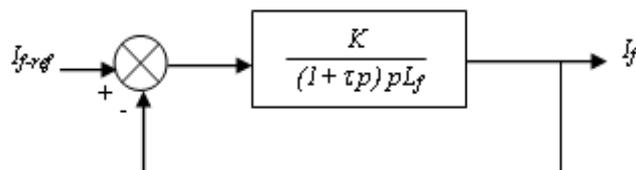


Fig. III.20. Schéma de régulation simplifié

### III.4 Calcul des paramètres du système (réseau -filtre actif -charge polluante).

Le réseau a pour puissance apparente nominale  $S_n$  et tension efficace simple  $V_n$  (la tension efficace composée  $U_n = \sqrt{3} V_n$ ).

Le courant nominal  $I_n$  est égal donc à :

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = \frac{S_n}{3 V_n} \quad (\text{III-30})$$

L'impédance nominale du réseau est donnée par :

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (\text{III-31})$$

L'impédance  $Z_{cc}$  de court-circuit du réseau est généralement égale à 4% de  $Z_n$ . Cette impédance exprimée en complexe nous donne [51] :

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}.\omega \quad (\text{III-32})$$

La résistance de court-circuit  $R_{cc}$  a pour valeur 10% de la réactance de court-circuit  $L_{cc}.\omega$ .

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}.\omega = R_{cc} + j10.R_{cc} = R_{cc} (1 + j10) \quad (\text{III-33})$$

En module:

$$|Z_{cc}| = \sqrt{101} R_{cc} \Rightarrow R_{cc} = \frac{1}{\sqrt{101}} |Z_{cc}| \quad (\text{III-34})$$

Et par la suite:

$$L_{cc} = 10 \frac{1}{\omega \sqrt{101}} |Z_{cc}| \quad (\text{III-35})$$

Avec:

$$\omega = 2.\pi.f$$

$f$ : est la fréquence du fondamental ( $f=50\text{Hz}$ ).

Les simulations montrent que pour obtenir un bon THD et une meilleure dynamique,  $Z_f$  doit varier entre 4 et 8 fois  $Z_{cc}$ .

$$Z_f = 4.Z_{cc} = R_f + jL_f.\omega \quad (\text{III-36})$$

De (III-32), (III-34), (III-35) et (III-36), on déduit les valeurs de  $R_f$  et  $L_f$ .

$$R_f = 4.R_{cc} = 4. \frac{1}{\sqrt{101}} |Z_{cc}| \quad (\text{III-37})$$

$$L_f = 4.L_{cc} = 4.10. \frac{1}{\omega \sqrt{101}} |Z_{cc}| \quad (\text{III-38})$$

La capacité du condensateur est donnée par [66]:

$$C_f = \frac{I_h}{\varepsilon \cdot V_{dc} \cdot \omega_h} \quad (\text{III-39})$$

Où:

$I_h$ : l'amplitude du courant harmonique du rang le plus faible.

$\varepsilon$ : le taux d'ondulation de la tension  $V_{dc}$ , généralement égal à 5%.

$\omega_h$ : la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

La tension redressée par le redresseur constituée des diodes mises en antiparallèle avec les IGBTs est donnée par :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6} \cdot V_{eff}}{\pi} \quad (\text{III-40})$$

La tension de référence doit être légèrement supérieure à  $V_{dc}$  pour que le filtre puisse débiter sur le réseau.

### III.5 Résultats de simulation du système étudié

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus pour les 3 types de commandes présentés auparavant, à savoir la MLI, l'hystérésis conventionnelle et la commande par logique floue. Ces résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel Matlab/Simulink en utilisant également la Toolbox « SimPowerSystem ».

Le système simulé comporte un réseau électrique triphasé à trois fils, une charge non linéaire triphasée (pont redresseur à diodes) alimentant une charge de type RL et un filtre actif parallèle triphasé à structure de tension.

Pour la commande du filtre actif, nous avons utilisé la variante proposée à la figure III.6, de la méthode des puissances instantanées pour identifier les courants de référence, le FMV ayant été introduit dans l'algorithme de commande au lieu des filtres d'extraction classiques.

La structure générale du système étudié est décrite à la figure III.2, les valeurs des éléments caractérisant cette structure ont été regroupées dans le Tableau III-2.

<b>Réseau électrique</b>
$V_s = 220 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}, (R_s = 0.25 \text{ m}\Omega, L_s = 19.4 \text{ }\mu\text{H})$
<b>Charge polluante</b>
$R_{ch} = 0.5 \text{ }\Omega, L_{ch} = 3 \text{ mH}, R_c = 1.2 \text{ m}\Omega, L_c = 50 \text{ }\mu\text{H}$
<b>Filtre parallèle</b>
$V_{dc} = 870 \text{ V}, C_{dc} = 7.8 \text{ mF}, (R_f = 5 \text{ m}\Omega, L_f = 150 \text{ }\mu\text{H})$

Tableau III-2: Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée

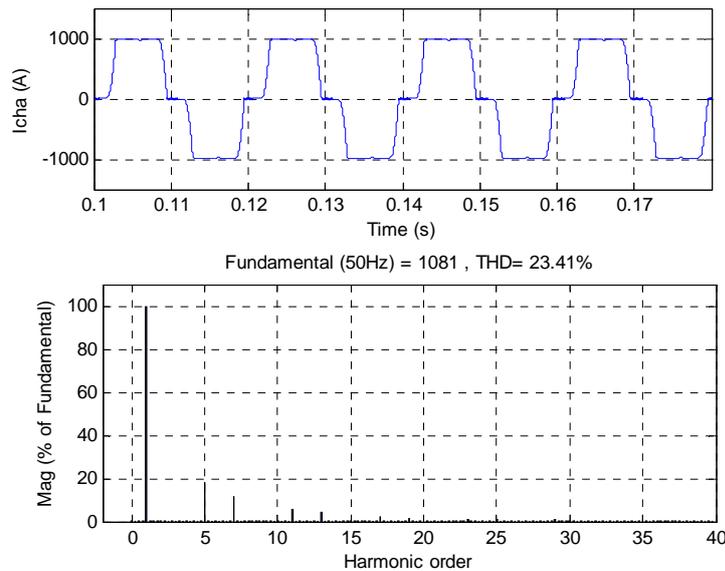


Fig. III.21. Courant de la charge non linéaire  $I_{cha}$  (A) et son spectre harmonique.

Puisque tous les courants de phase ( $I_{cha}$ ,  $I_{chb}$ ,  $I_{chc}$ ) sont d'allures identiques, nous présentons les résultats de simulation pour une seule phase, en l'occurrence la phase a.

La figure III.21, présente le courant de la charge  $I_{cha}$  de la première phase et son spectre harmonique. Le THD en courant pour cette charge est de 23,41 %, il est calculé pour les quarante premières harmoniques selon la norme C.E.I [56]. Le but du filtrage actif est de ramener ce THD à une valeur inférieure à 5 %, comme l'impose la norme CEI.

Maintenant, nous allons présenter les résultats de simulation avec le filtre actif et pour les trois méthodes de contrôle présentées auparavant.

### III.5.1 Résultats de simulation dans le cas du contrôle par MLI

Les résultats de simulation dans le cas du contrôle par MLI sont illustrés par les figures III.22 et III.23. Le courant de source  $I_{sa}$ , son spectre harmonique et le courant  $I_{fa}$  injecté par le filtre y sont présentés. La fréquence de commutation est fixée à 10 KHz. La valeur du THD est réduite à 2,36 % après filtrage.

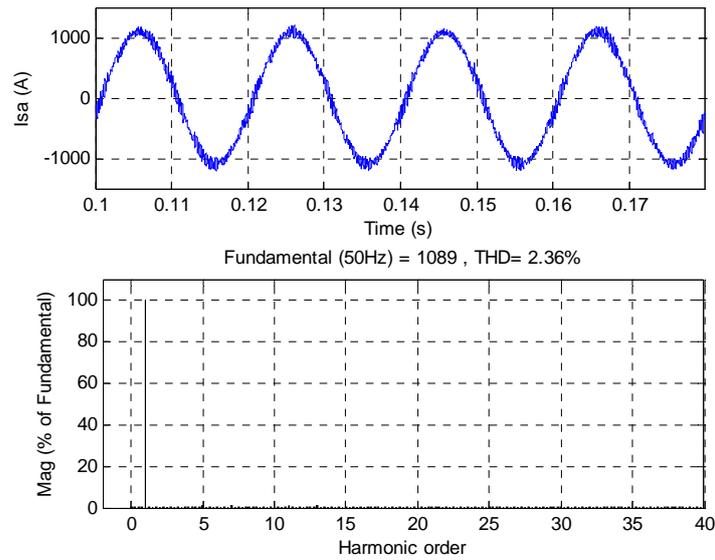


Fig. III.22. Courant de source  $I_{sa}$  (A) et son spectre harmonique (commande MLI).

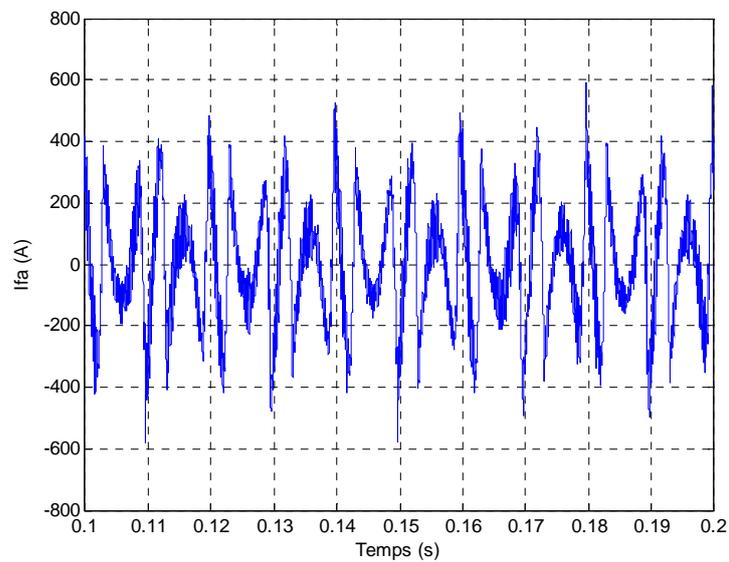
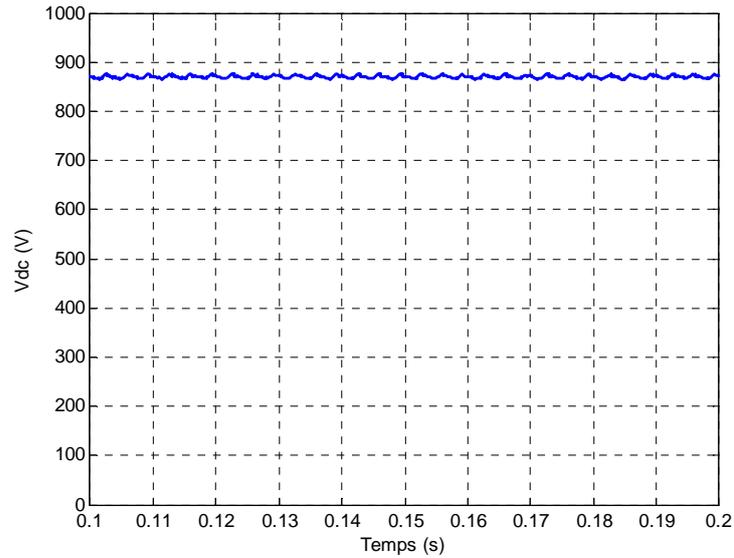
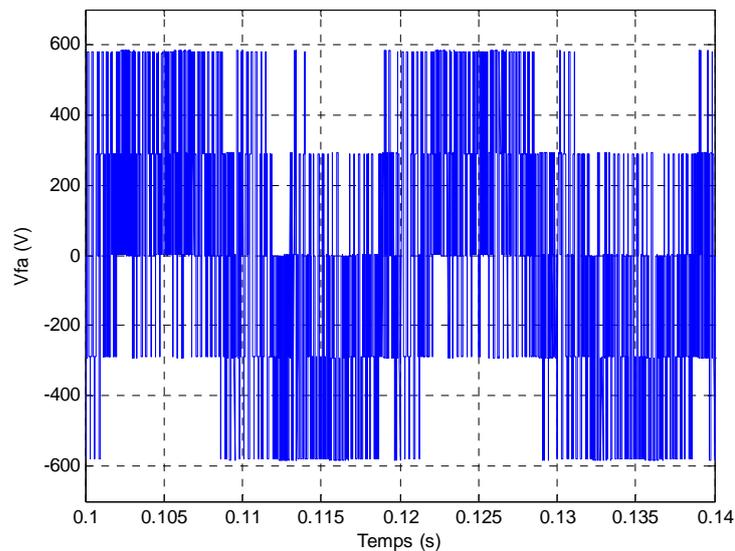


Fig. III.23. Courant  $I_{fa}$  (A) injecté par le filtre.

La figure III.24, présente la tension du bus continu  $V_{dc}$ , la figure III.25, présente la tension générée par le filtre actif  $V_{fa}$  à deux niveaux,  $2 \cdot V_{dc} / 3$  et  $V_{dc} / 3$  correspondant respectivement à 580 V, 290 V.

Fig. III.24. Tension du bus continu  $V_{dc}$  (V) .Fig. III.25. Tension  $V_{fa}$  (V) à la sortie de l'onduleur de tension .

### III.5.2 Résultats de simulation dans le cas du contrôle par hystérésis :

Les figures III.26 et III.27 illustrent les résultats de simulation obtenus pour cette commande : le courant de source  $I_{sa}$ , son spectre harmonique et le courant  $I_{fa}$  injecté par le filtre. Le THD du courant de source est réduit à 2,16 % après filtrage. Cependant, pour cette commande, la fréquence de commutation est variable.

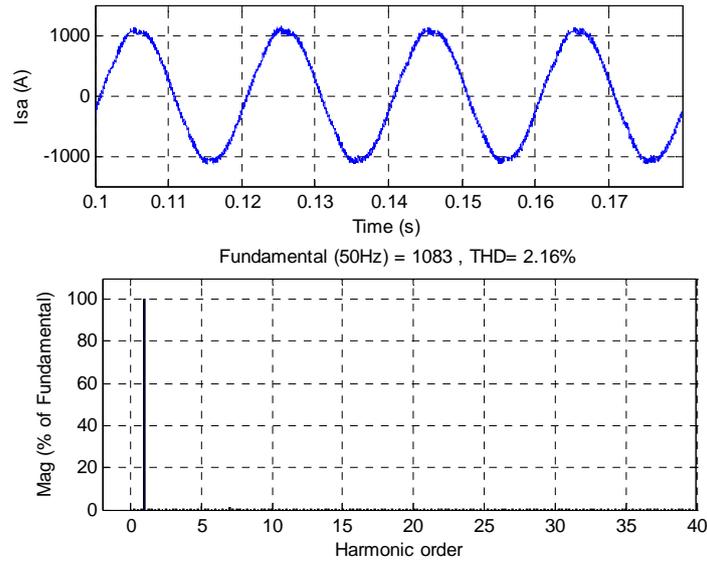


Fig. III.26. Courant de source  $I_{sa}$  (A) et son spectre harmonique .

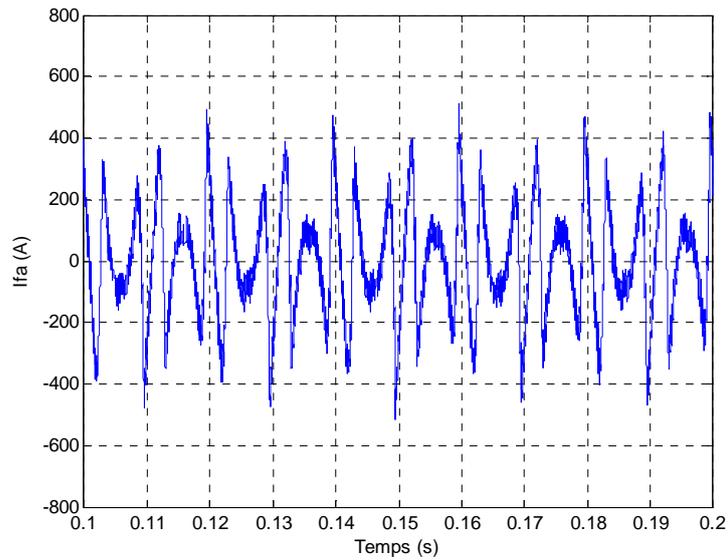
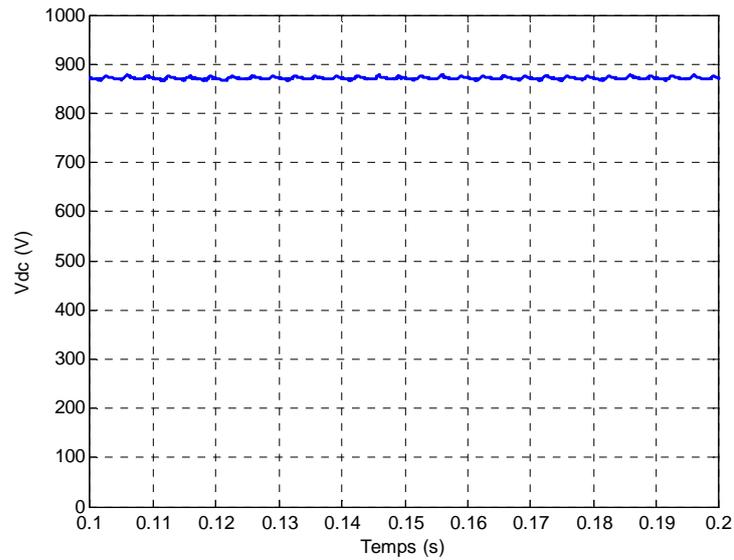
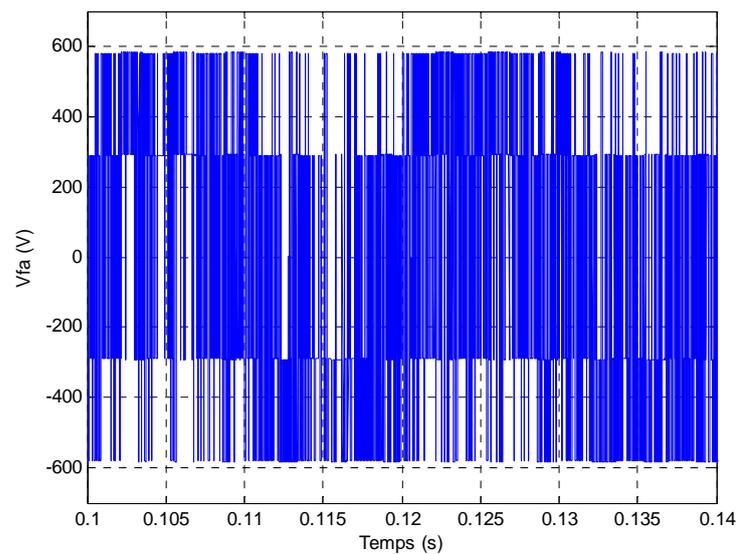


Fig. III.27. Courant  $I_{fa}$  (A) injecté par le filtre.

La figure III.28, présente la tension du bus continu  $V_{dc}$ , la figure III.29, présente la tension générée par le filtre actif  $V_{fa}$  à deux niveaux,  $2 \cdot V_{dc} / 3$  et  $V_{dc} / 3$  correspondant respectivement à 580 V, 290 V.

Fig. III.28. Tension du bus continu  $V_{dc}$  (V) .Fig. III.29. Tension  $V_{fa}$  (V) à la sortie de l'onduleur de tension.

### III.5.3 Résultats de simulation dans le cas du contrôle par logique floue :

Les figures III.30 et III.31 illustrent les résultats de simulation obtenus pour cette commande : le courant de source  $I_{sa}$ , son spectre harmonique et le courant  $I_{fa}$  injecté par le filtre. Le THD du courant de source est réduit à 1,78 % après filtrage.

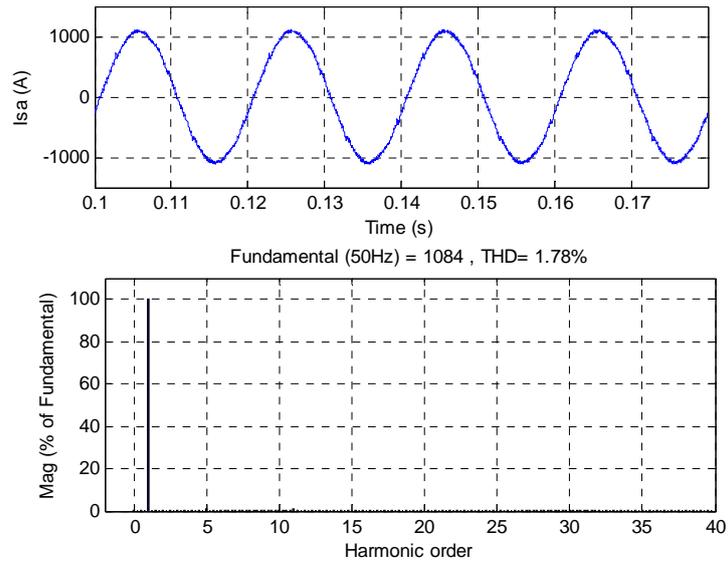


Fig. III.30. Courant de source  $I_{sa}$  (A) et son spectre harmonique.

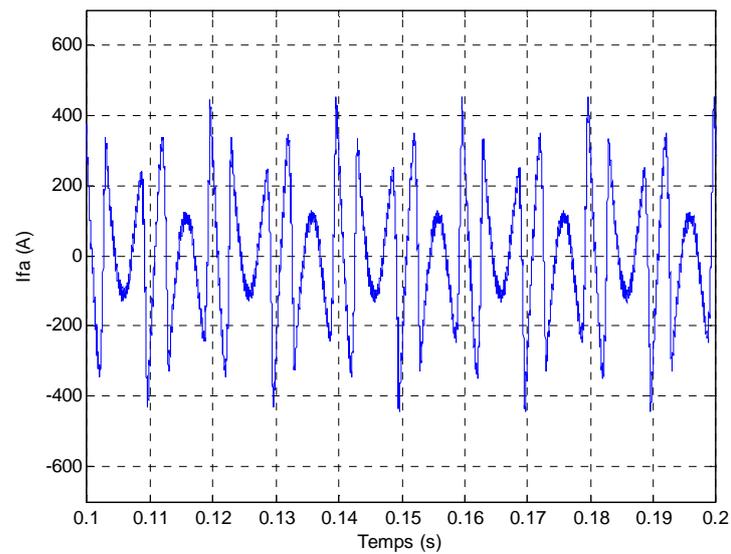
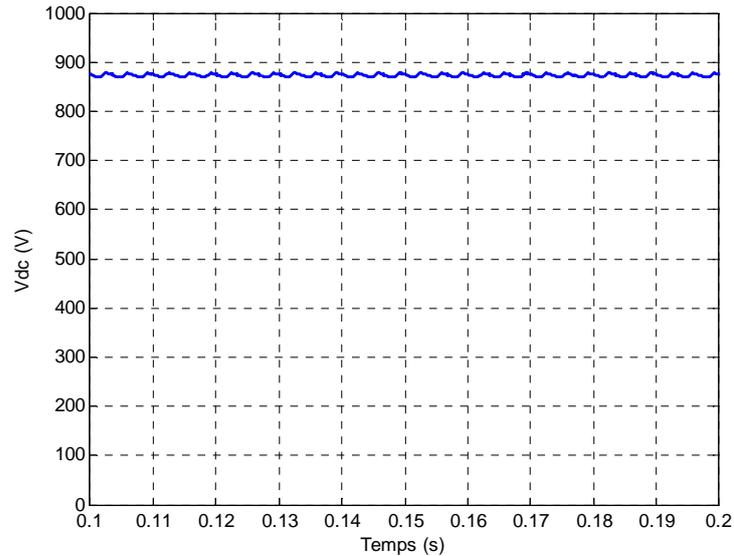
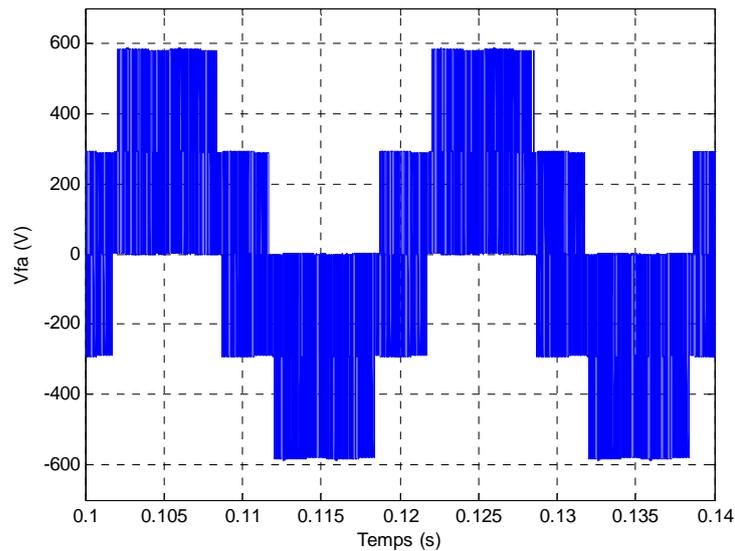


Fig. III.31. Courant  $I_{fa}$  (A) injecté par le filtre.

La figure III.32, présente la tension du bus continu  $V_{dc}$ , la figure III.33, présente la tension générée par le filtre actif  $V_{fa}$  à deux niveaux,  $2 \cdot V_{dc} / 3$  et  $V_{dc} / 3$  correspondant respectivement à 580 V, 290 V.

Fig. III.32. Tension du bus continu  $V_{dc}$  (V).Fig. III.33. Tension  $V_{fa}$  (V) à la sortie de l'onduleur de tension.

Les résultats obtenus avec les trois commandes montrent que la mise en œuvre du filtre actif permet de réduire considérablement le contenu harmonique du courant de source, ce qui se traduit par la diminution du THD après filtrage bien en dessous de 5%.

On constate que les THDs obtenus avec les commandes dites hystérésis sont inférieurs à celui obtenu avec la MLI. Par contre, l'hystérésis conventionnelle, malgré sa simplicité, présente l'inconvénient d'une fréquence de commutation variable. La technique MLI, facile d'utilisation, assure alors un fonctionnement à fréquence fixe, un contenu harmonique parfaitement identifié mais possède aussi de par sa structure, des propriétés dynamiques limitées [66].

Pour toutes ces raisons, nous avons retenu la commande par logique floue pour les applications FAP à :

- Trois bras, cinq niveaux
- Association PEMFC-FAP trois bras, cinq niveaux

### III.5.4 Etude du comportement du filtre actif en régime transitoire

Nous allons étudier dans ce paragraphe les performances et le comportement du filtre actif parallèle à structure tension lors d'un régime transitoire de la charge polluante. Pour cela nous avons modifié à l'instant  $t = 0,2$  s la charge alimentée par le pont redresseur qui est passé de ( $R_L = 0,5 \Omega$ ,  $L_L = 3$  mH), à ( $R_L = 1 \Omega$ ,  $L_L = 3$  mH).

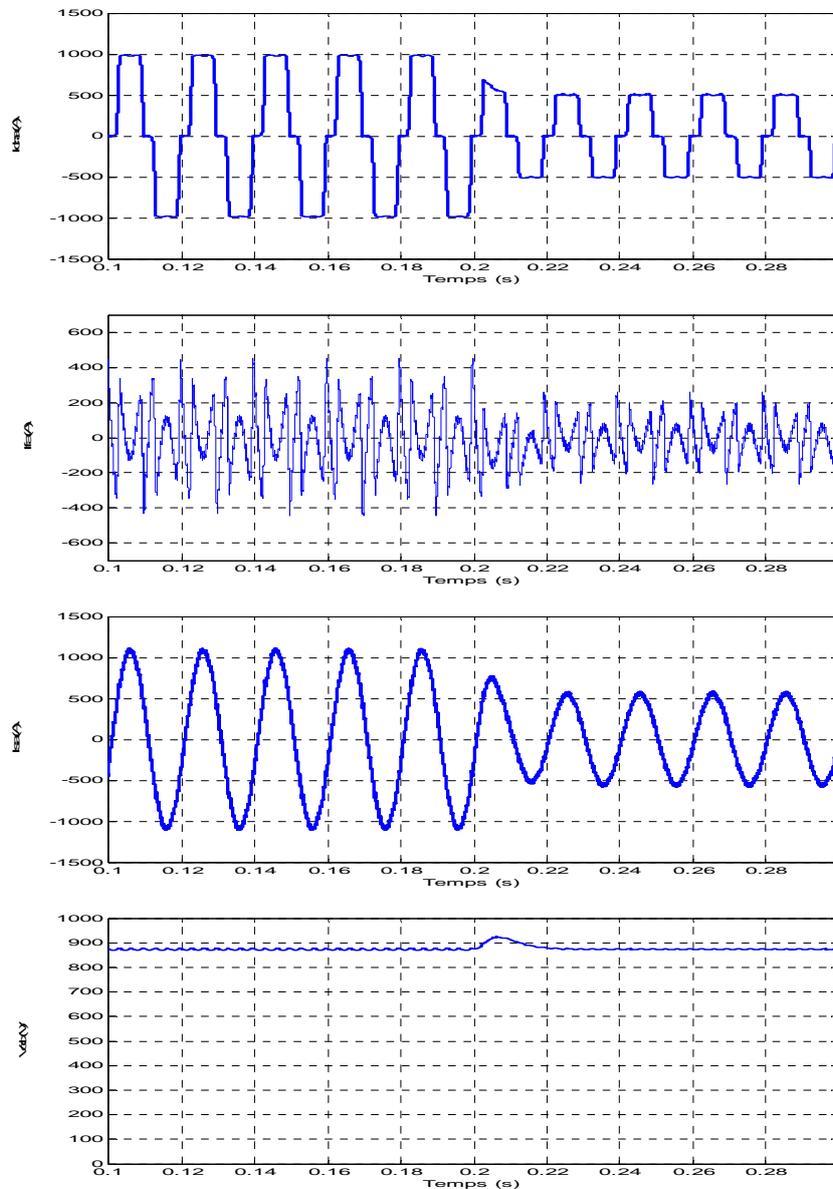


Fig. III.34. Résultats de simulation du système pour un régime transitoire de la charge polluante. De haut en bas : courant de charge  $I_{cha}$ (A), courant fourni par le filtre  $I_{fa}$ (A), courant de source  $I_{sa}$ (A) et tension du bus continu  $V_{dc}$ (V).

La figure III.34 présente les résultats de simulation obtenus dans le cas de la commande par logique floue. On peut noter que lors de ce régime transitoire que la tension  $V_{dc}$  du bus continu, subit une légère augmentation avant de décroître et de se stabiliser. Ces résultats montrent que le filtre actif est influencé instantanément par le changement de la charge mais il est capable de retrouver rapidement son efficacité.

### **III.5.5 Filtre actif parallèle trois bras cinq niveaux :**

#### **III.5.5.1 Introduction :**

Les filtres actifs à deux niveaux ont été largement étudiés et utilisés pour éliminer les harmoniques et compenser l'énergie réactive [67]. En raison de la tenue en puissance des semi-conducteurs, ces filtres sont limités dans les applications de moyenne puissance.

Récemment, l'intérêt d'utilisation des onduleurs multi-niveaux pour les applications de grande puissances, dans la compensation de la puissance réactive et des harmoniques a augmenté [68].

L'utilisation de l'onduleur (NPC) permet un découpage à tension égale en raison de la mise en série des semi-conducteurs reliés à chaque phase.

Les performances des différentes stratégies de génération des courants de référence dans des conditions de tension équilibrés, sinusoïdales, sont pratiquement similaires. La différence apparaît lorsqu'on travaille sous des conditions de tensions distordues et déséquilibrées, ce qui détériore les performances du filtrage [69].

Dans ce travail, la génération des courants de référence pour le contrôle du filtre actif parallèle dans les conditions de tension distordues est basée sur l'utilisation du filtre multi variables (FMV). Il est utilisé pour extraire la composante fondamentale directement à partir de signaux électriques (tension et courant déformée) dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  [70].

Les principaux avantages du FMV sont :

- Fonctionnement efficace en régimes stables et transitoires;
- Un gain unitaire et sans retard de phase à la fréquence fondamentale;
- Pas de PLL requis;
- Facile à mettre en œuvre dans le système de commande numérique ou analogique.

Le contrôleur constitue la partie principale du FAP [71,72]. Les régulateurs classiques PI de tension et de courant ont été largement utilisés pour contrôler le bus continu de la tension, et les courants harmoniques du FAP. Cependant, cela nécessite une connaissance précise du modèle mathématique du système, ce qui est difficile à réaliser en cas de variations des paramètres, de non linéarité et des perturbations de charge. Ces limitations ont été surmontées par les techniques de contrôle utilisant la logique floue.

**III.5.5.2 Schéma de la structure étudiée :**

La figure III.35, présente la topologie du filtre actif parallèle à cinq niveaux ; à base d'un onduleur de tension triphasé, à l'aide des interrupteurs IGBT, connecté en parallèle à travers trois inductances sur un système triphasé à trois fils.

Pour produire un onduleur de tension de N niveaux, N-1 condensateurs sont nécessaires. La tension aux bornes de chaque capacité est égale à  $v_{dc} / (N-1)$ , ou  $v_{dc}$  est la tension totale du bus continu. Chaque couple d'interrupteurs ( $T_{11}, T_{15}$ ) est commandé de façon complémentaire et forme une cellule de commutation.

L'onduleur produit cinq niveaux de tension définis par :

$$v_{io} = k_i \frac{v_{dc}}{2} \tag{III-41}$$

Où  $v_{io}$  est la tension entre phase-point milieu fictif "o";  $k_i$  définit l'état de commutation ( $k_i = 1, 1/2, 0, -1/2, -1$ ) et  $i$ , est l'index de phase ( $i = a, b$  et  $c$ ). Les cinq niveaux de tension ( $v_{dc}/2, v_{dc}/4, 0, -v_{dc}/4, -v_{dc}/2$ ), sont présentés dans le tableau III.3 :

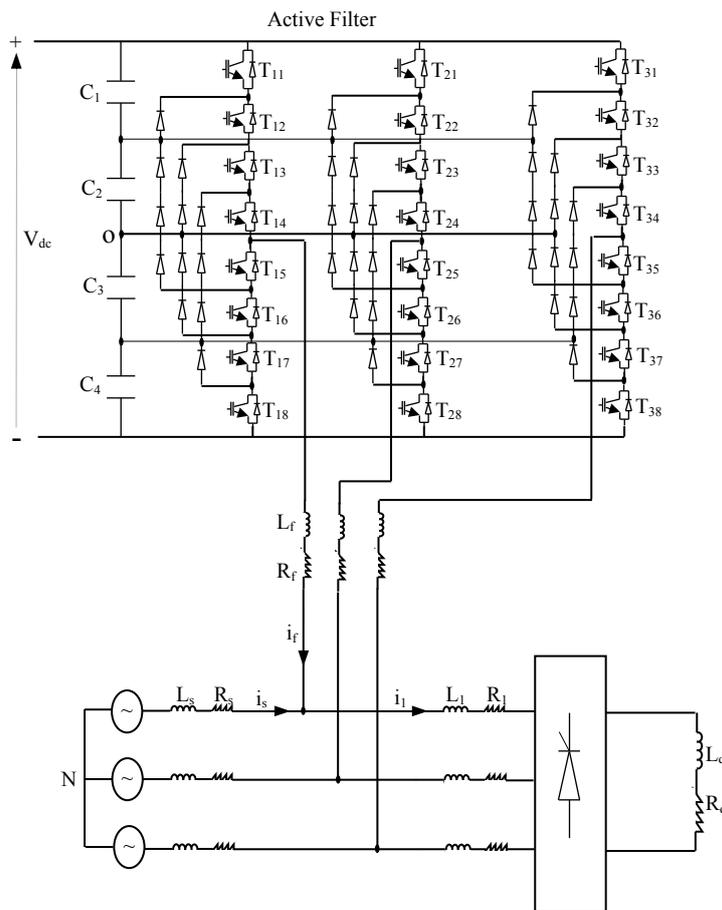


Fig. III.35. Topologie du FAP trois bras cinq niveaux.

$k_i$	$T_{i1}$	$T_{i2}$	$T_{i3}$	$T_{i4}$	$T_{i5}$	$T_{i6}$	$T_{i7}$	$T_{i8}$	$v_{io}$
1	1	1	1	1	0	0	0	0	$v_{dc}/2$
1/2	0	1	1	1	1	0	0	0	$v_{dc}/4$
0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
-1/2	0	0	0	1	1	1	1	0	$-v_{dc}/4$
-1	0	0	0	0	1	1	1	1	$-v_{dc}/2$

Tableau III.3 les cinq niveaux de tension

**III.5.5.3 Calcul des courants de références :**

**III.5.5.3.1 Filtre Multi-variable FMV :**

La figure III.7, montre la réponse en fréquence pour différentes valeurs de k. On peut remarquer qu'aucun déplacement n'est introduit par ce filtre à la pulsation du système.

On peut voir que la faible valeur de k augmente la sélectivité du filtre. Ainsi, en utilisant un FMV, la composante fondamentale peut être extraite en cas de distorsion de (tension ou courant) sans aucun retard de phase. La figure III.36, présente le schéma de principe pour l'isolation d'harmoniques

**III.5.5.4 Contrôle de l'onduleur de tension :**

La commande est basée sur la mise en oeuvre d'un contrôleur à logique floue qui détermine la tension de référence du convertisseur (onde de modulation) et ce suite à la comparaison des courants injectés (courants du filtre actif) et les courants de références précédemment calculés. Cette tension de référence standard est comparée avec quatre porteuses triangulaires identiques.

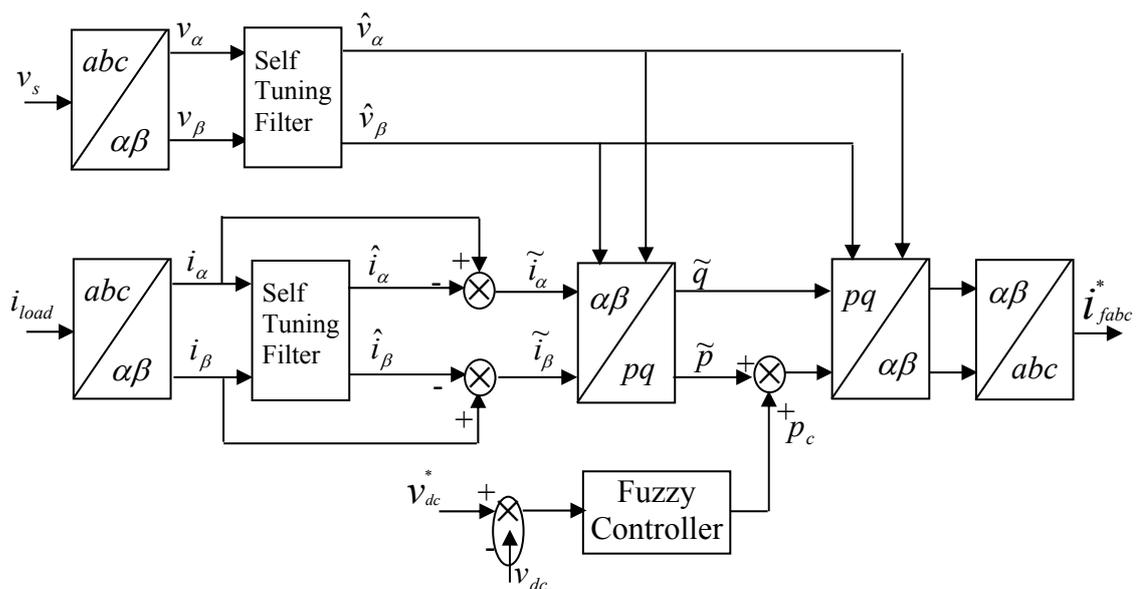


Fig. III.36. Diagramme en bloc d'isolation d'harmoniques.

Ces ondes porteuses ont la même fréquence et sont disposés les uns sur les autres, sans déphasage, de sorte qu'elles couvrent ensemble la tension de référence [72,73]. Le schéma général de la commande des courants est illustré à la figure III.37

**III.5.5.5 Stabilisation de la tension continue des condensateurs**

Un système de stabilisation des tensions continues est introduit pour balancer les quatre tensions continues ( $u_{c1}$ ,  $u_{c2}$ ,  $u_{c3}$  et  $u_{c4}$ ), éviter le déplacement du point neutre et par la suite améliorer les performances du FAP. La figure III.38 montre la structure de stabilisation des tensions continues.

**III.5.5.6 Résultats et discussion**

La simulation est effectuée à l'aide des paramètres du système présentés dans le tableau III.4

La figure III.39 illustre un processus de commutation à basse fréquence montrant ainsi les avantages de l'onduleur multi-niveau.

Le THD du courant de charge (courant de source avant filtrage) est de 22.30% dépassant ainsi la norme CEI soit 5%, comme le montre la figure III.40.

La figure III.41, montre que la tension de source n'est pas sinusoïdale, elle fait introduire l'harmonique cinq soit un THD de 11.11%.

Le THD du courant de source sous ces conditions est de 1.29%, témoignant ainsi de l'atteinte de l'objectif de filtrage (un THD <5%) comme le montre la figure III.42.

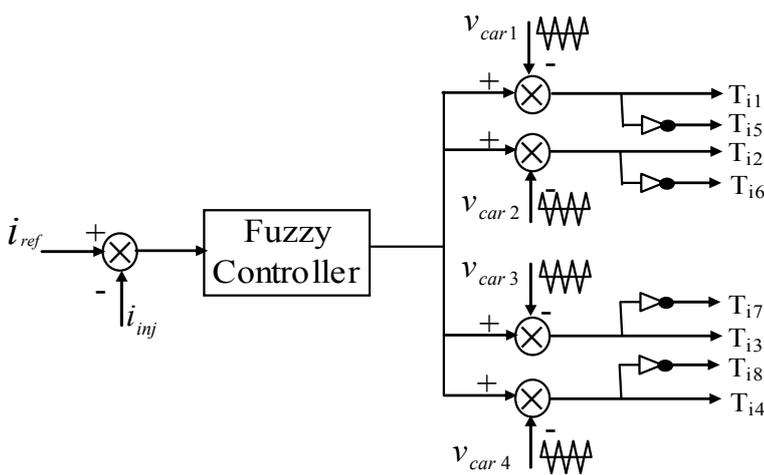


Fig. III.37 Diagramme en bloc du contrôle de courant.

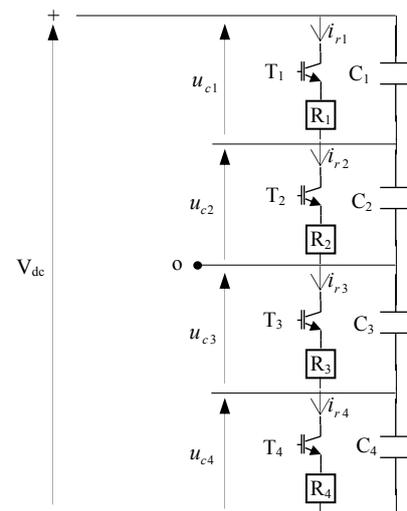


Fig. III.38 Structure de stabilisation des tensions continues

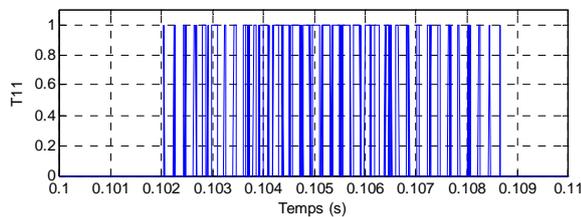
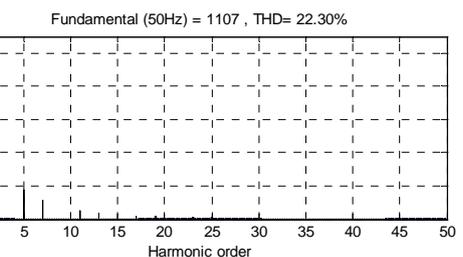
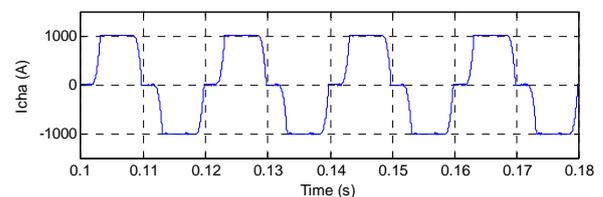
La méthode d'identification des courants harmoniques utilisant le filtre FMV et le contrôleur flou du courant ont permis la compensation des courants harmoniques et la puissance réactive simultanément. Une différence notable pourra être remarquée entre la fondamentale du courant de charge et celle du courant de source, cela justifie l'énergie soutirée du réseau pour la régulation du bus continu du FAP.

La forme d'onde du courant et de la tension sont en phase comme le montre la figure III.43. Les performances du FAP cinq niveaux sont liées aussi à la qualité des courants de référence, le filtre FMV est utilisé pour le calcul et l'identification des courants de référence comme le montre la figure III.44. Les figures III.45, 46 montrent respectivement, la tension de sortie du FAP  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$ . La figure III.47, montre la tension du bus continu  $V_{dc}$ .

Les figures III (48-51) ; montrent les différentes tensions obtenues en utilisant le système de stabilisation du point neutre. Nous pouvons voir que les tensions ( $u_{c1}$ ,  $u_{c2}$ ,  $u_{c3}$ ,  $u_{c4}$ ) se stabilisent autour de 200V.

Source	
Fréquence du réseau	50Hz
Tension réseau	$230 \sqrt{2} V_{max}$
Impédance ( $R_s, L_s$ )	$0.5 \text{ m } \Omega, 0.015 \text{ m H}$
3-bras FAP	
Tension du bus continue $V_{dc}$	800 V
Condensateurs $C_1, C_2, C_3, C_4$	60 mF
Fréquence de commutation	5 KHz
Impédances ( $R_f, L_f$ )	$(5 \text{ m } \Omega, 0.068 \text{ m H})$
Charge	
Pont triphasé à thyristor	
$(R_L, L_L), (R_d, L_d)$	$(1.2 \text{ m}\Omega, 0.05 \text{ m H}), (0.5 \Omega, 2 \text{ m H})$
Angle d'amorçage	$30^\circ$

Tableau III.4: Paramètres de simulation

Fig.III.39. Impulsions de commutations ( $T_{11}, T_{15}$ )Fig.III.40 Courant de charge  $I_{cha}$  (A)

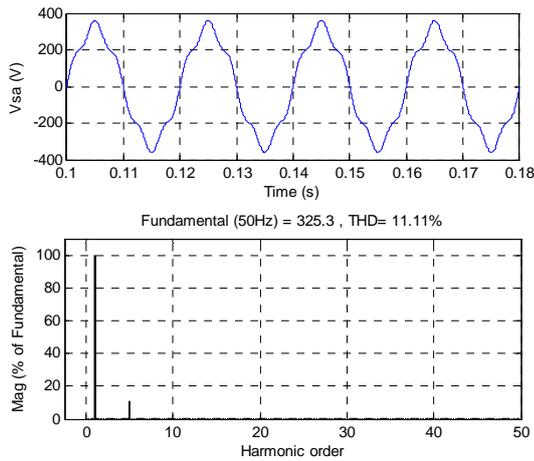


Fig.II.41 Tension de source  $V_{sa}$  (V)

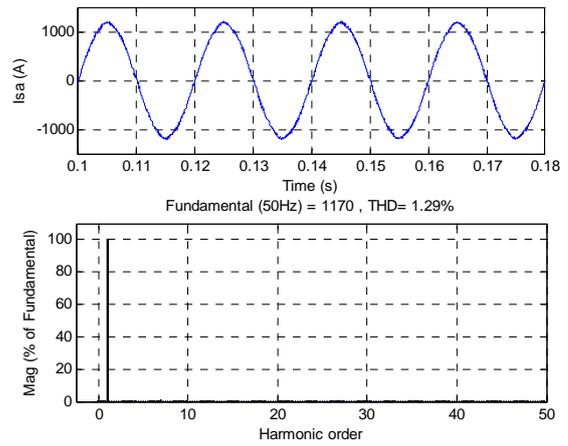


Fig.III.42 Courant de source  $I_{sa}$  (A)

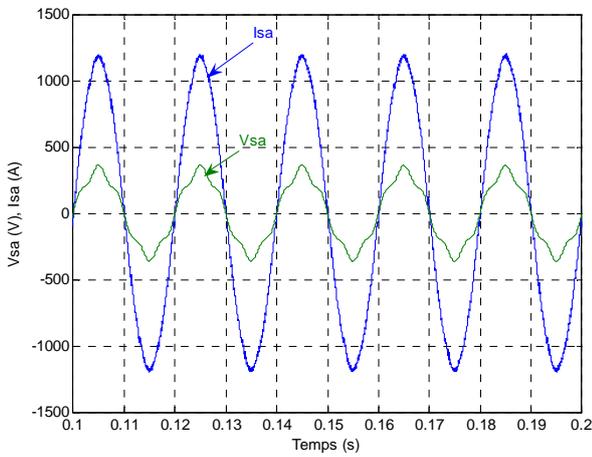


Fig.III.43 Correction du facteur de puissance  $V_{sa}$ ,  $I_{sa}$

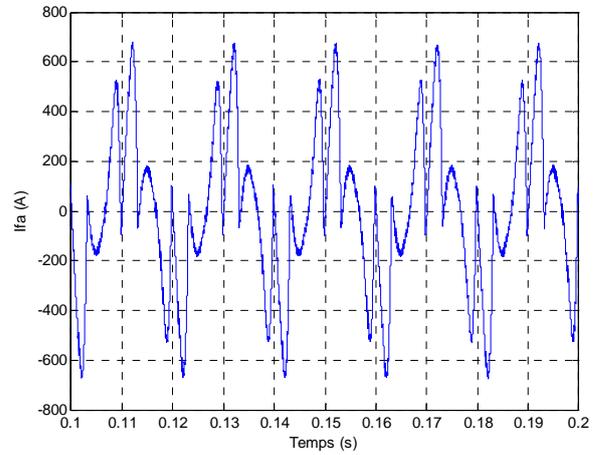


Fig.III.44 Courant injecté du FAP  $I_{fa}$

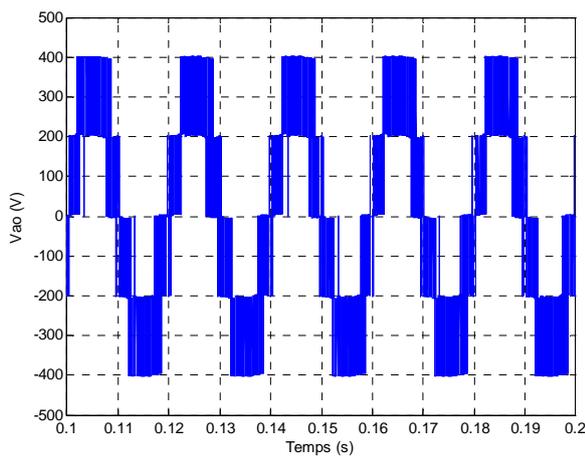


Fig.III.45 Tension de sortie du FAP  $V_{ao}$

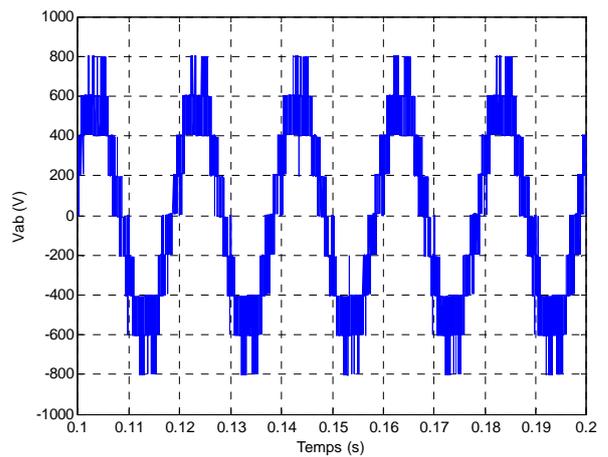


Fig.III.46 Tension de sortie du FAP  $V_{ab}$

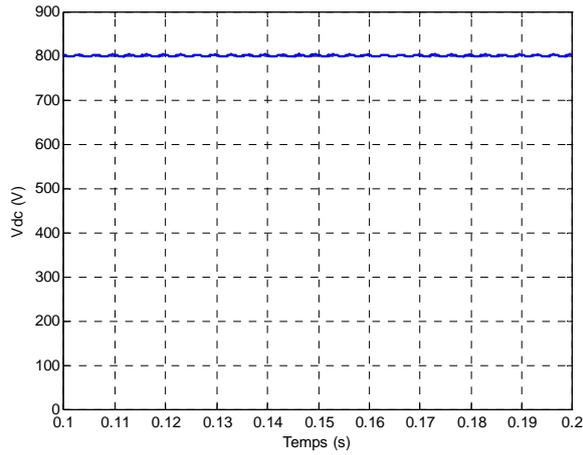


Fig.III.47 Tension de bus continue  $V_{dc}$  .

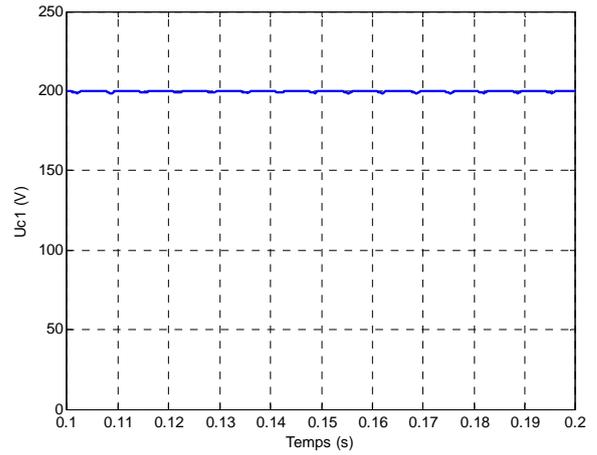


Fig.III.48 Tension  $U_{c1}$  .

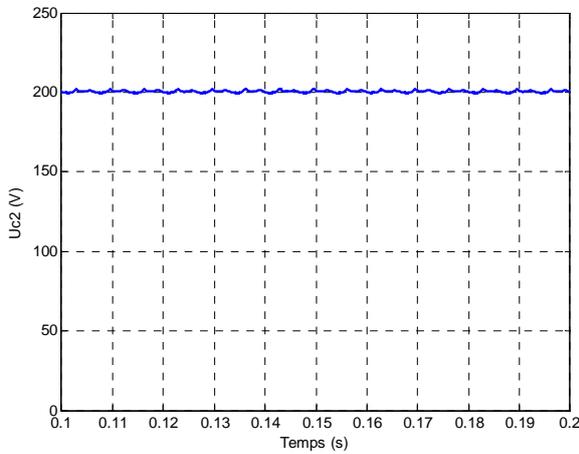


Fig.III.49 Tension  $U_{c2}$  .

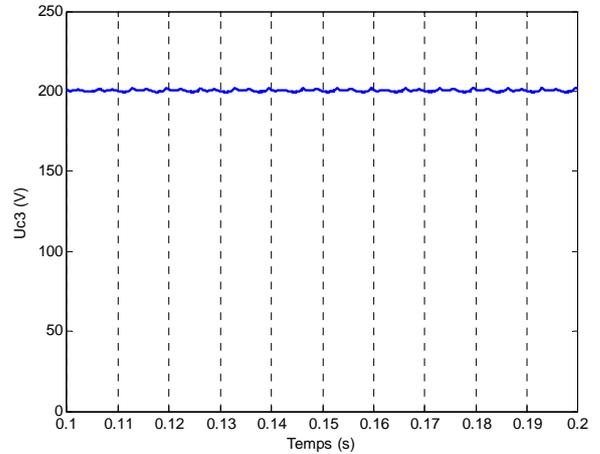


Fig.III.50 Tension  $U_{c3}$  .

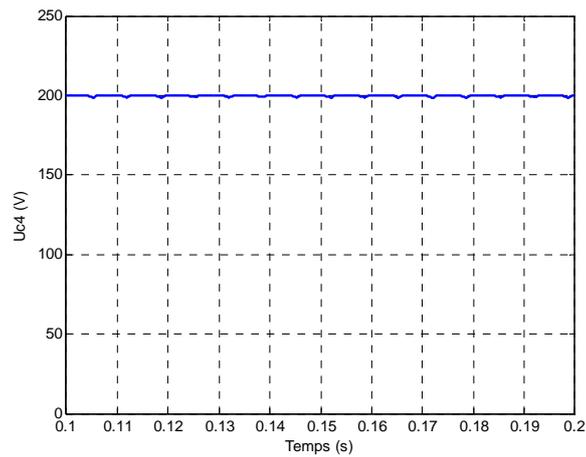


Fig.III.51 Tension  $U_{c4}$  .

### III.5.6 Association PEMFC-FAP :

Dans ce paragraphe nous allons présenter l'association de PEMFC au FAP 3-bras 5-niveaux, et l'étude sera articulée comme suit :

- Schéma de la structure étudiée
- Calcul des courants de références
- Hacheur élévateur CC/CC
- Résultats et discussion

#### III.5.6.1 Schéma de la structure étudiée :

La Figure.III.52, présente la topologie du système proposé, le filtre actif parallèle à cinq niveaux est connecté en parallèle sur un système triphasé à trois fils. Le bus continu du FAP est alimenté par une PEMFC via un hacheur élévateur CC/CC. Le FAP réalise la compensation simultanée de l'énergie réactive, des courants harmoniques et contribue avec le réseau en lui dispensant de l'énergie nécessaire à la régulation du bus continu du FAP (fournie par la PEMFC).

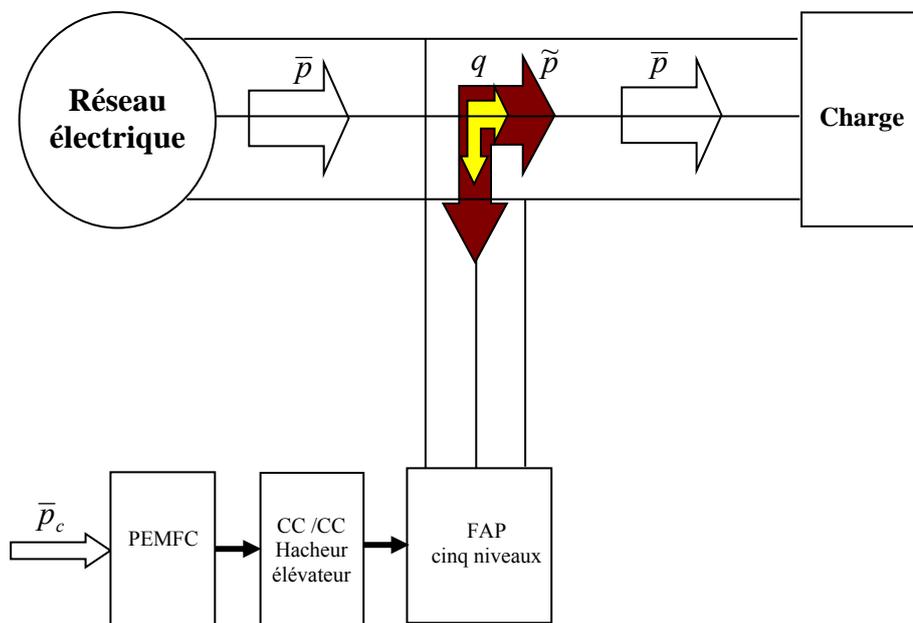


Fig. III.52 Topologie du système proposé.

### III.5.6.2 Calcul des courants de référence :

La figure III.36, présente le schéma de principe pour le calcul des courants de référence.

Les courants de charge,  $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$  et  $i_{Lc}$  du système triphasé sont donnés dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  (Fig. III.36) par :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (\text{III-42})$$

Les courants dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  peuvent être décomposés en composantes fondamentale et harmonique :

$$i_\alpha = \hat{i}_\alpha + \tilde{i}_\alpha \quad (\text{III-43})$$

$$i_\beta = \hat{i}_\beta + \tilde{i}_\beta \quad (\text{III-44})$$

Le filtre FMV extrait les composantes fondamentales à la pulsation  $\omega_c$  directement à partir des axes  $\alpha$ - $\beta$  des courants de charge. Les courants harmoniques de la charge sont calculés par la soustraction des courants fondamentaux des grandeurs d'entrées du FMV (courants de charge). Ainsi les courants harmoniques  $\tilde{i}_\alpha$  et  $\tilde{i}_\beta$  sont obtenus.

Les tensions de source,  $v_{sa}$ ,  $v_{sb}$  et  $v_{sc}$  du système triphasé sont données dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  par :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III-45})$$

Le filtre FMV est aussi appelé à la suppression des composantes harmoniques du système de tension distordues en améliorant ainsi les performances de l'isolation des harmoniques.

La puissance active  $P$  et la puissance réactive  $q$  sont données par :

$$p = i_\alpha \hat{v}_\alpha + i_\beta \hat{v}_\beta \quad (\text{III-46})$$

$$q = i_\beta \hat{v}_\alpha - i_\alpha \hat{v}_\beta \quad (\text{III-47})$$

Où

$$p = \hat{p} + \tilde{p} \quad (\text{III-48})$$

$$q = \hat{q} + \tilde{q} \quad (\text{III-49})$$

$\hat{p}$ ,  $\hat{q}$  présentent les composantes fondamentales et  $\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$  les composantes harmoniques .

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha & \hat{v}_\beta \\ -\hat{v}_\beta & \hat{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III-50})$$

Dans le but de compenser la puissance réactive, les courants harmoniques et de réaliser une interface entre la PEMFC et le réseau électrique en lui dispensant de l'énergie nécessaire à la régulation du bus continu du FAP (fournie par la PEMFC) les courants de référence  $i_{\alpha\beta}^*$ , sont donnés par :

$$i_{\alpha}^* = \frac{\hat{v}_{\alpha}}{\hat{v}_{\alpha}^2 + \hat{v}_{\beta}^2} (\tilde{p} + p_c) - \frac{\hat{v}_{\beta}}{\hat{v}_{\alpha}^2 + \hat{v}_{\beta}^2} q \tag{III-51}$$

$$i_{\beta}^* = \frac{\hat{v}_{\beta}}{\hat{v}_{\alpha}^2 + \hat{v}_{\beta}^2} (\tilde{p} + p_c) + \frac{\hat{v}_{\alpha}}{\hat{v}_{\alpha}^2 + \hat{v}_{\beta}^2} q \tag{III-52}$$

Les courants de référence, sont calculés à partir de la transformation  $(\alpha-\beta)$  inverse donnée par les relations (III-51) et (III-52) :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} \tag{III-53}$$

### III.5.6.3 Hacheur élévateur CC/CC

La tension de sortie de la PAC s'écrase avec l'augmentation du courant de charge comme le valide le modèle dynamique de la PAC, un hacheur élévateur CC/CC s'inscrit à la topologie générale du système pour réduire les dimensions de la PAC d'une part et de maintenir une tension continue de 800V d'autre part. La figure III-53 montre la topologie du hacheur élévateur CC/CC, sa commande est assurée par un contrôleur à hystérésis.

### III.5.6.4 Résultats et discussion

La simulation est effectuée à l'aide des paramètres du système présentés dans le tableau A.3 (voir Annexe).

Le THD du courant de charge (courant de source avant filtrage) est de 22.30% dépassant ainsi les normes CEI (5%), comme le montre la figure III.54.

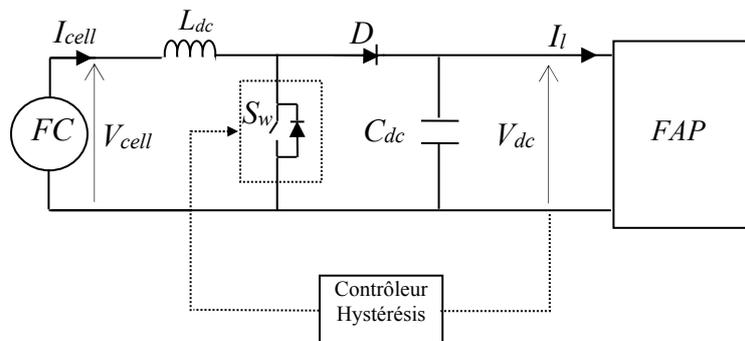


Fig.III.53 Topologie du hacheur elevateur CC/CC

La figure III.55, montre que la tension de source n'est pas sinusoïdale, elle fait introduire l'harmonique cinq soit un THD de 11.11%. Le THD du courant de source sous ces conditions est de 1.02%, témoignant ainsi de l'atteinte de l'objectif de filtrage (un THD <5%) comme le montre la figure III.56.

Une différence pourra être notée entre le courant de source avec et sans l'association de la PEMFC soit un courant de pic de 1107 A avec l'association de la PEMFC et de 1170 A sans l'association de la pile, cela revient à l'énergie soutirée du réseau pour la régulation du bus continu du FAP comme le montre les figures III.56, 57.

La forme d'onde du courant et de la tension sont en phase comme le montre la figure III.58. Les figures III.59, 60 montrent respectivement, la tension de sortie du FAP  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$ . La figure III.61, montre la tension du bus continu  $V_{dc}$ . Les figures III 62-65 ; montrent les différentes tensions obtenues en utilisant le système de stabilisation du point neutre. Nous pouvons voir que les tensions ( $u_{c1}$ ,  $u_{c2}$ ,  $u_{c3}$ ,  $u_{c4}$ ) se stabilisent autour de 200V.

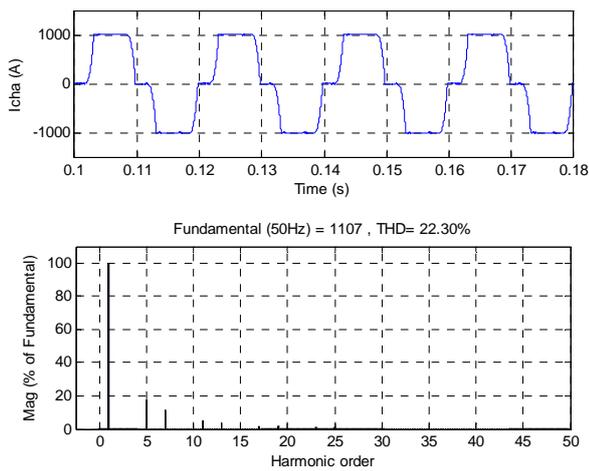


Fig.III.54 Courant de charge  $I_{cha}$  (A)

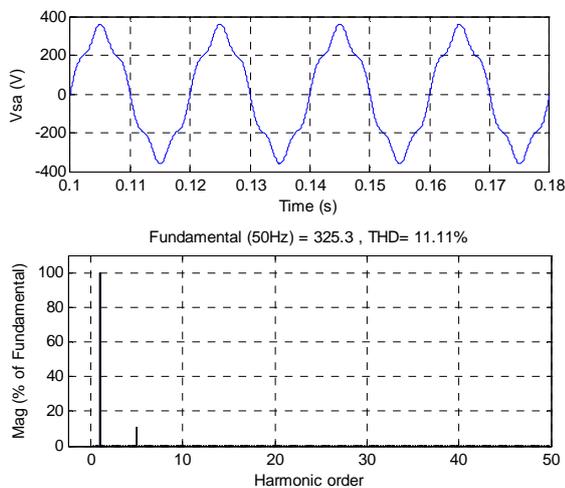


Fig.III.55 Tension de source  $V_{sa}$  (V)

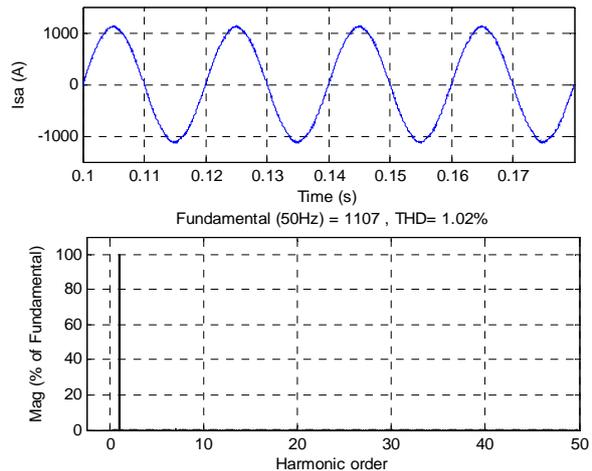


Fig.III.56 Courant de source  $I_{sa}$  (A), avec Association de la PEMFC

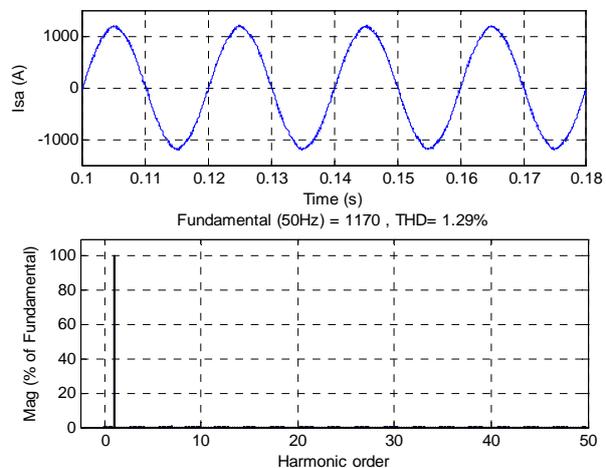


Fig.III.57 Courant de source  $I_{sa}$  (A), sans Association de la PEMFC

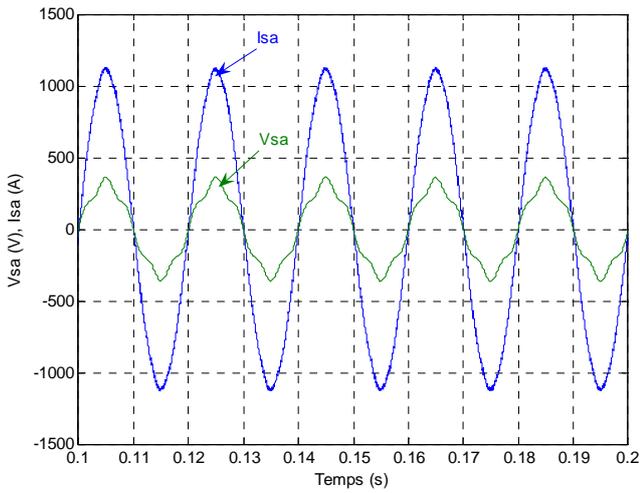


Fig.III.58 Correction du facteur de puissance  $V_{sa}$ ,  $I_{sa}$

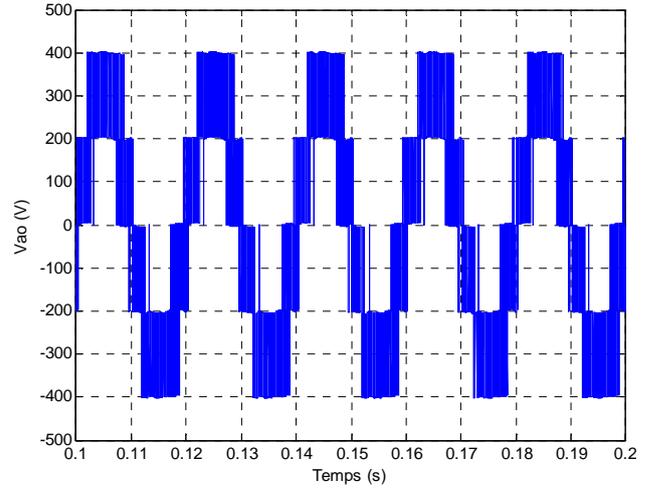


Fig.III.59 Tension de sortie du FAP  $V_{ao}$

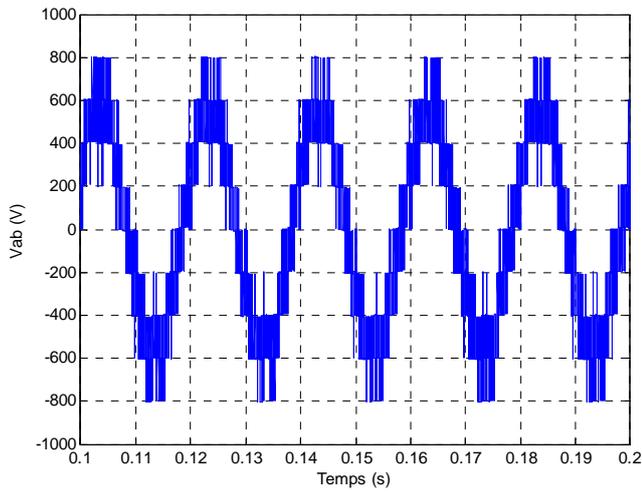


Fig.III.60 Tension de sortie du FAP  $V_{ab}$

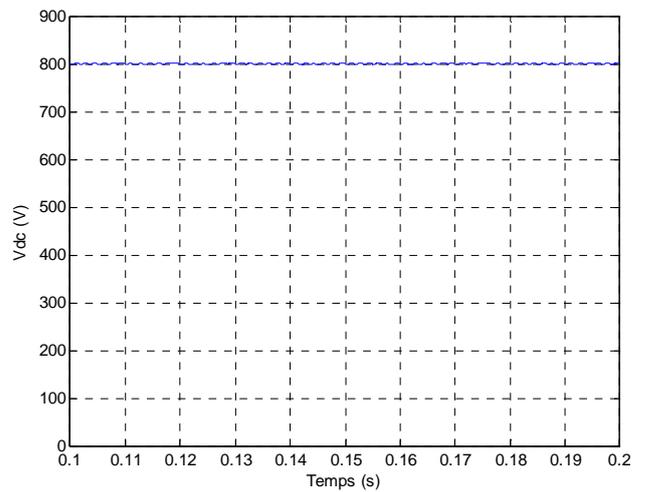


Fig.III.61 Tension du bus continu  $V_{dc}$

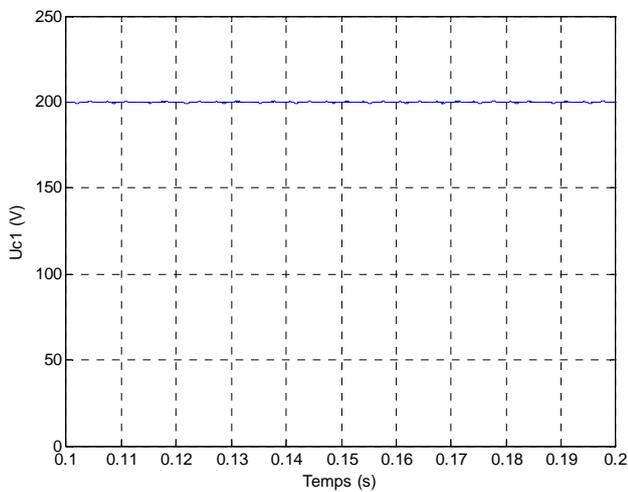


Fig.III.62 Tension  $U_{c1}$

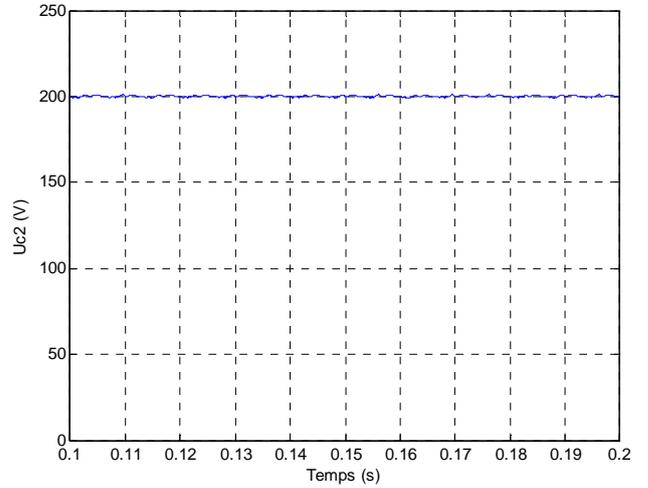


Fig.III.63 Tension  $U_{c2}$

La figure III.66 montre les puissances active et réactive absorbées par la charge. La figure III.67 montre les puissances active et réactive fournies par la source, il est à noter que le réseau fournit uniquement la puissance active demandée par la charge par contre il reçoit une petite puissance réactive fournie le FAP.

La figure III.68 montre que le FAP n'absorbe aucune puissance active du réseau cela traduit que la puissance nécessaire à la régulation du bus continu est assurée par la PEMFC.

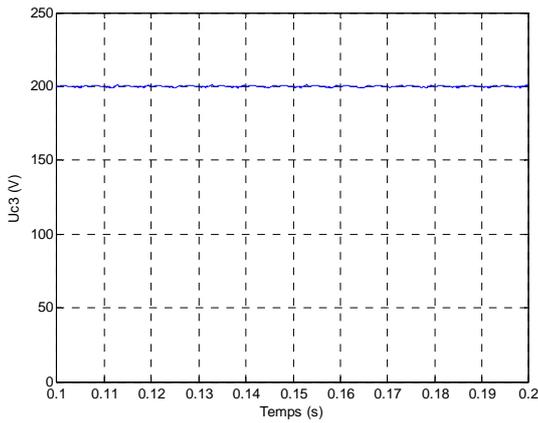


Fig.III.64 Tension  $U_{c3}$

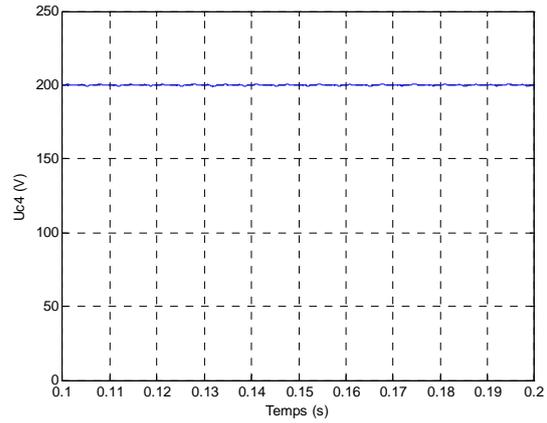


Fig.III.65 Tension  $U_{c4}$

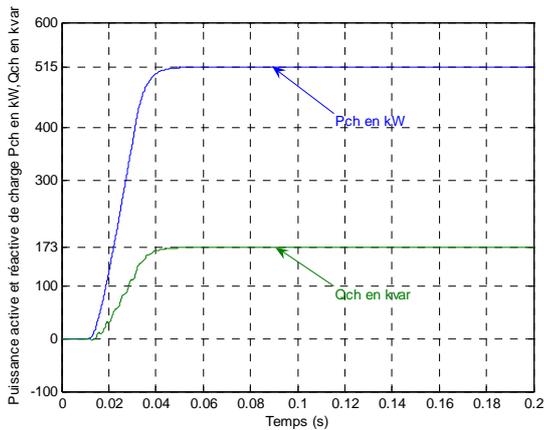


Fig.III. 66 Puissance active et réactive de la charge

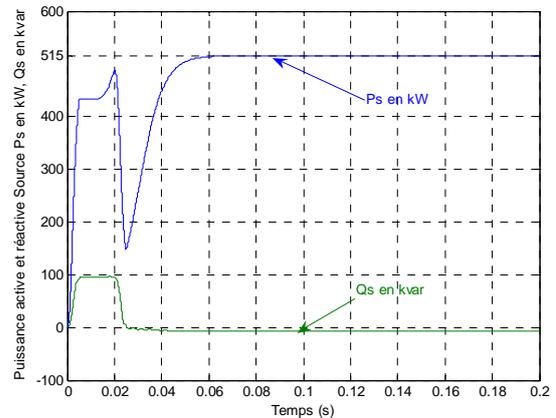


Fig.III.67 Puissance active et réactive de la source

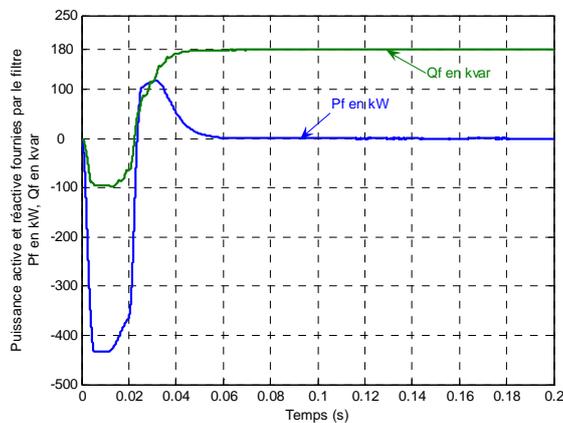


Fig.III.68 Puissance active et réactive du FAP

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord étudié le filtre actif shunt à structure de tension, connecté en parallèle sur le réseau afin d'injecter les courants permettant d'éliminer la pollution en harmoniques des charges non linéaires. Ensuite, nous avons présenté trois types de contrôle du courant du filtre actif : le contrôle par modulation de largeurs d'impulsions ou MLI, le contrôle par hystérésis conventionnelle et finalement le contrôle par logique floue.

Pour l'identification des courants harmoniques, nous avons modifié la méthode classique des puissances instantanées en remplaçant notamment les filtres classiques par des FMVs. Nous avons également présenté l'étude par simulation des avantages du FMV qui extrait directement les harmoniques des courants de charge selon les axes  $\alpha$ - $\beta$ . Les résultats de simulation du FMV ont été présentés et nous avons noté que ce filtre permet d'obtenir de bonnes performances même si la tension du réseau est distordue.

Les résultats de simulation du système étudié sont résumés dans le tableau III-5

Type de commande	Après filtrage
MLI	THD=2.36
hystérésis conventionnelle	THD=2.16
Logique floue	THD=1.78

Tableau. III-5. THD des courants de source après filtrage.

Les performances du filtre actif dans le cas d'un régime transitoire de la charge polluante ont été étudiées. Les résultats obtenus dans ce cas montrent que le courant de source reste sinusoïdale après le régime transitoire avec un THD similaire. Concernant la tension du bus continu, on a noté qu'elle augmente légèrement puis se stabilise à sa valeur initiale.

Finalement nous avons présenté deux applications d'importance particulière :

- FAP à trois bras, cinq niveaux qui pourrait être étendue à quatre bras-cinq niveaux [49,74,75]
- Association PEMFC-FAP à trois bras, cinq niveaux

L'importance provient du fait que les deux applications présentent les avantages des onduleurs multiniveaux dans les applications de grande puissance (résolvant ainsi les problèmes de limitation des éléments de commutation), d'autre part l'association de la PEMFC au FAP en vue de remplacer l'élément de stockage de l'énergie à montrer son intérêt à travers la fourniture de l'énergie nécessaire à la régulation du bus continu du FAP comme premier pas et qui pourra être étendue à la contribution de la PEMFC avec le réseau à l'alimentation des charge critiques comme on va le voir dans le chapitre suivant. Les résultats de simulation ont montré des performances appréciables pour les deux applications.

**Chapitre IV**  
**Intégration d'une UPS dans un système**  
**de compensation des perturbations**  
**harmoniques**

### IV.1 Introduction

L'insertion des systèmes de production non conventionnels, la nécessité d'une fourniture d'électricité non seulement disponible mais aussi de qualité, sont autant de corollaires de l'évolution technique et réglementaires dans le domaine énergétique [76].

Dans ce chapitre nous proposons une topologie qui consiste à l'intégration d'une UPS dans un système de compensation de perturbation harmonique pour une charge critique et ce à travers l'utilisation d'un filtre actif parallèle capable non seulement à la compensation simultanées des problèmes comme le facteur de puissance, et courants harmoniques mais aussi d'injecter de l'énergie produite par une pile à combustible.

### IV.2 Configuration du système

La PAC peut être intégrée de plusieurs manières en fonction de l'application :

- En cas de présence du réseau, la PAC contribue à la fourniture de la puissance active tout en améliorant la qualité d'énergie figure IV.1.
- dans le cas de défaillance du réseau la PAC alimente la charge critique, ici la PAC alimente une charge isolée indépendamment du réseau comme nous l'avons présenté dans le chapitre II.

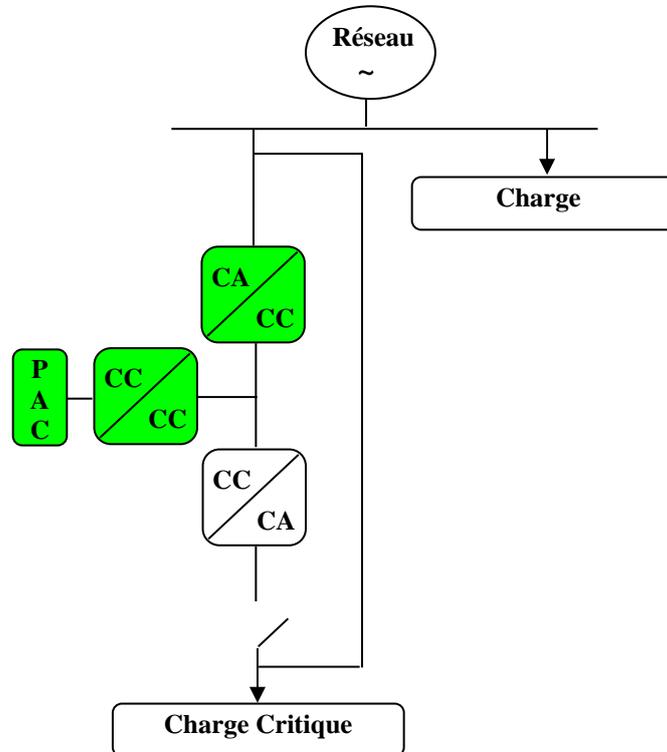


Fig. IV.1 Intégration d'une PAC dans un système ASI.

### IV.3 Schéma de la structure étudiée :

La Figure.IV.2, présente la topologie du système proposé, le filtre actif parallèle à cinq niveaux est connecté en parallèle sur un système triphasé à trois fils. Le bus continu du FAP est alimenté par une PEMFC via un hacheur élévateur CC/CC. Le FAP réalise la compensation simultanée de l'énergie réactive, des courants harmoniques et contribue avec le réseau en lui injectant l'énergie produite par la PEMFC.

### IV.4 Calcul des courants de références :

Dans le but de compenser la puissance réactive, les courants harmoniques et de réaliser une interface entre la PEMFC et le réseau électrique en injectant une partie de la puissance active ( $k * \hat{p}$ ) nécessaire à la charge, produite par la PEMFC les courants de référence  $i_{\alpha\beta}^*$ , sont donnés par :

$$i_{\alpha}^* = \frac{\hat{v}_{\alpha}}{\hat{v}_{\alpha}^2 + \hat{v}_{\beta}^2} (\tilde{p} + k * \hat{p} + p_c) - \frac{\hat{v}_{\beta}}{\hat{v}_{\alpha}^2 + \hat{v}_{\beta}^2} q \quad (VI-1)$$

$$i_{\beta}^* = \frac{\hat{v}_{\beta}}{\hat{v}_{\alpha}^2 + \hat{v}_{\beta}^2} (\tilde{p} + k * \hat{p} + p_c) + \frac{\hat{v}_{\alpha}}{\hat{v}_{\alpha}^2 + \hat{v}_{\beta}^2} q \quad (VI-2)$$

Les courants de référence, sont calculés à partir de la transformation ( $\alpha$ - $\beta$ ) inverse donnée par les relations (VI-1) et (VI-2) :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} \quad (VI-3)$$

La figure IV.3, présente le schéma de principe pour le calcul des courants de référence.

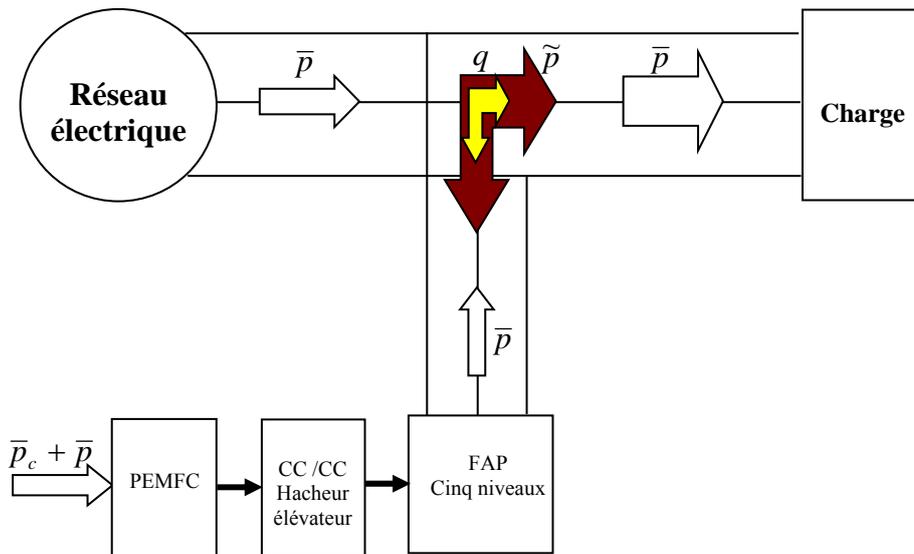


Fig. IV.2 Topologie du système proposé.

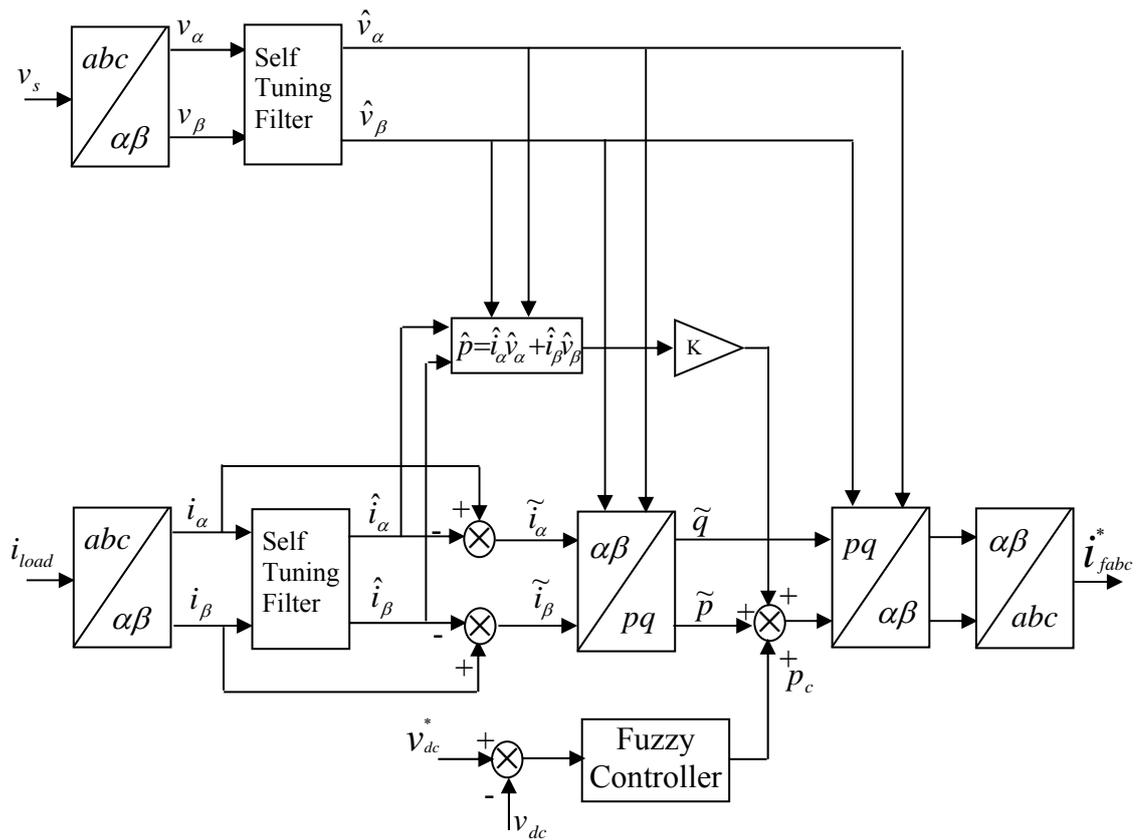


Fig. IV.3. Diagramme en bloc de calcul des courants de références.

#### IV.5 Contrôle de l'onduleur de tension :

La tension de référence est comparée avec quatre porteuses triangulaires identiques. Ces porteuses ont la même fréquence et sont disposées les unes sur les autres, sans déphasage, de sorte qu'elles couvrent ensemble la tension de référence [72,73]. La figure III.37 montre le schéma général de la commande des courants.

#### IV.6 Stabilisation de la tension continue des condensateurs

Pour balancer les quatre tensions continues ( $u_{c1}$ ,  $u_{c2}$ ,  $u_{c3}$  et  $u_{c4}$ ), en évitant ainsi le déplacement du point neutre, un système de stabilisation des tensions a été utilisé. La figure III.38 montre la structure de stabilisation des tensions continues.

#### IV.7 Hacheur élévateur CC/CC

La Figure III.53 montre la topologie du hacheur élévateur CC/CC, sa commande est assurée par un contrôleur à hystérésis

### IV.8 Résultats et discussion

La simulation est effectuée à l'aide des paramètres du système présentés dans le tableau A.3 (voir Annexe). La figure IV.4 illustre un processus de commutation à basse fréquence montrant ainsi les avantages de l'onduleur multiniveaux. Le THD du courant de charge (courant de source avant filtrage) est de 22.30% dépassant ainsi les normes C.E.I (5%), comme le montre la figure IV.5. La figure IV.6, montre que la tension de source n'est pas sinusoïdale, elle fait introduire l'harmonique cinq soit un THD de 11.11%. Le THD du courant de source sous ces conditions est de 1.07%, témoignant ainsi l'atteinte de l'objectif de filtrage (un THD <5%) comme le montre la figure IV.7. La méthode d'identification des courants harmoniques utilisant le filtre FMV et le contrôleur flou de courant ont permis la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive simultanément. La forme d'onde du courant et de la tension sont en phase comme le montre la figure IV.8. Les performances du FAP cinq niveaux sont liées aussi à la qualité des courants de référence, le filtre FMV est utilisé pour le calcul et l'identification des courants de références comme le montre la figure IV.9.

Les figures IV.10-11 montrent respectivement, les tensions de sortie du FAP  $V_{ao}$  et  $V_{ab}$ . La figure IV.12, présente la tension du bus continu  $V_{dc}$ . Les figure IV (13-16) ; montrent les différentes tensions obtenues aux bornes des capacités en utilisant le système de stabilisation du point neutre. Nous pouvons voir que les tensions ( $u_{c1}$ ,  $u_{c2}$ ,  $u_{c3}$ ,  $u_{c4}$ ) se stabilisent autour de 200V. La figure IV.17, montre les puissances active et réactive de la charge.

La figure IV.18 montre les puissances, active et réactive fournies par la PEMFC. La figure IV.19 montre les puissances, active et réactive fournies par la source. Il est remarquable qu'environ 20% de puissance active de la charge est fournie par la PEMFC. Ainsi que la totalité de la puissance réactive de la charge est compensée par le FAP.

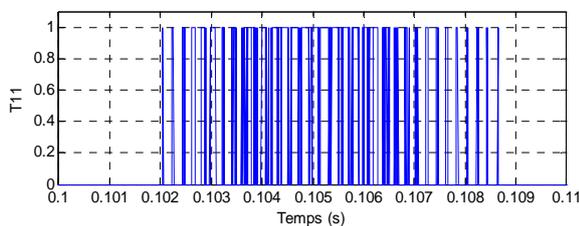


Fig.IV.4. Impulsions de commutations ( $T_{11}, T_{15}$ )

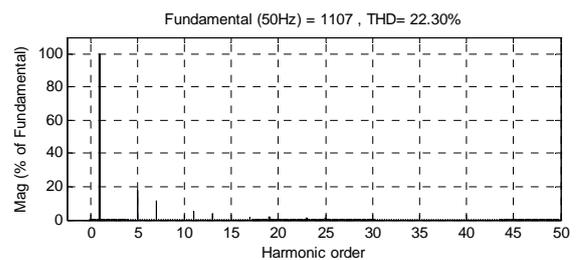
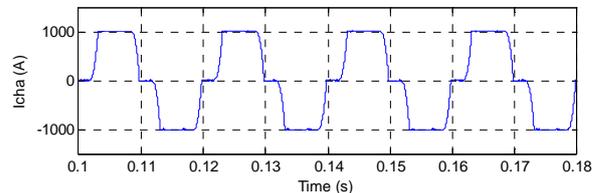


Fig.IV.5 Courant de charge  $I_{cha}$  (A)

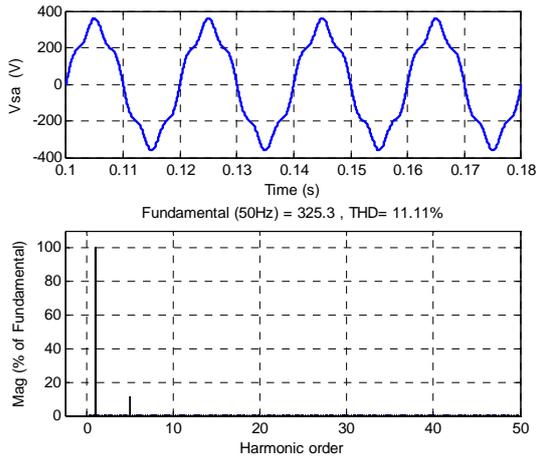


Fig.IV.6 Tension de source  $V_{sa}$  (V)

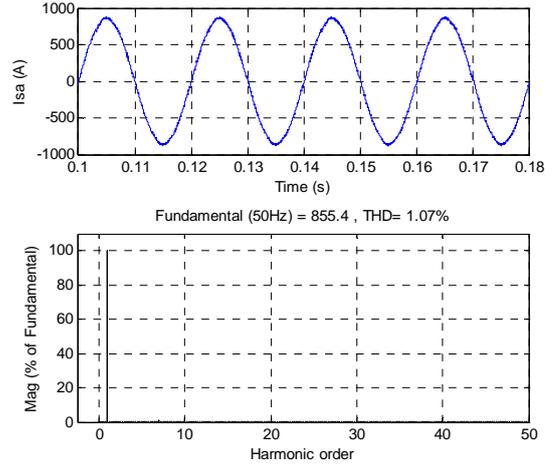


Fig.IV.7 Courant de source  $I_{sa}$  (A)

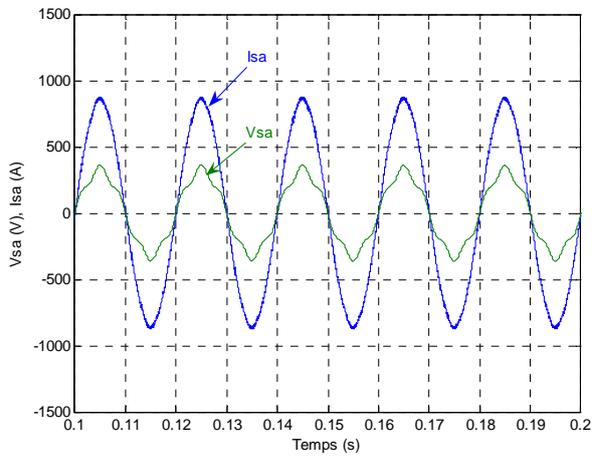


Fig.IV.8 Correction du facteur de puissance  $V_{sa}$ ,  $I_{sa}$

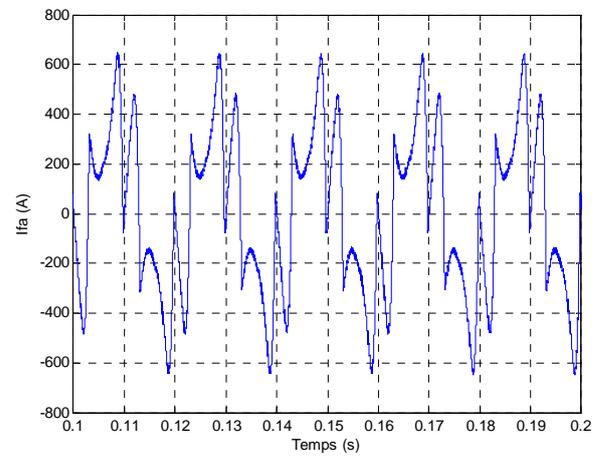


Fig.IV.9 Courant injecté du FAP  $I_{fa}$  .

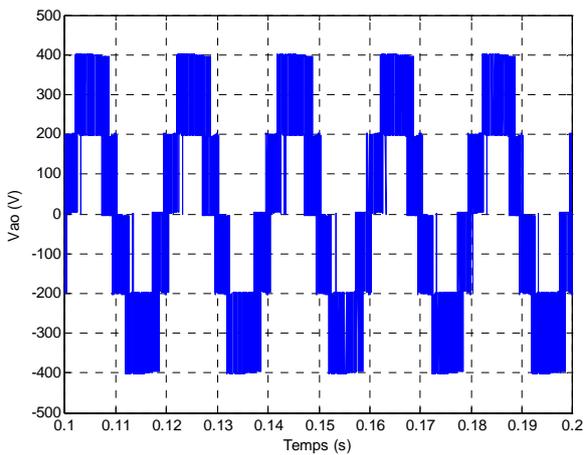


Fig.IV.10 Tension de sortie du FAP  $V_{ao}$  .

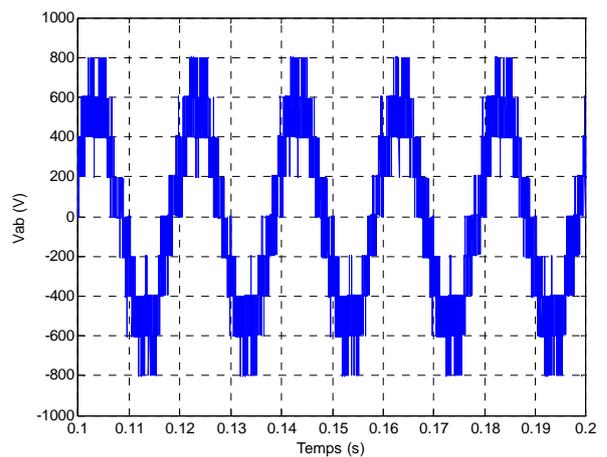


Fig.IV.11 Tension de sortie du FAP  $V_{ab}$  .

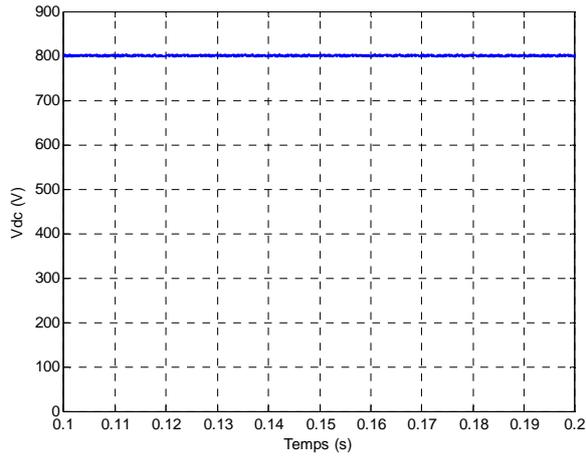


Fig.IV.12 Tension de bus continue  $V_{dc}$  .

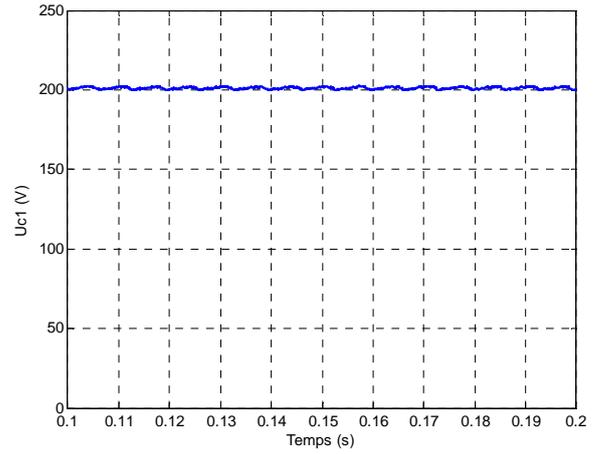


Fig.IV.13 Tension  $U_{c1}$  .

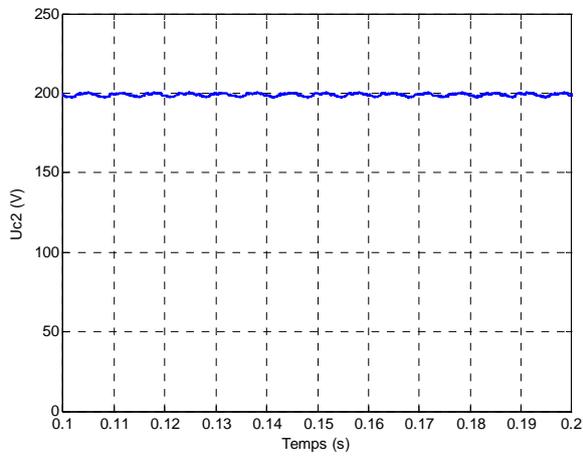


Fig.IV.14 Tension  $U_{c2}$  .

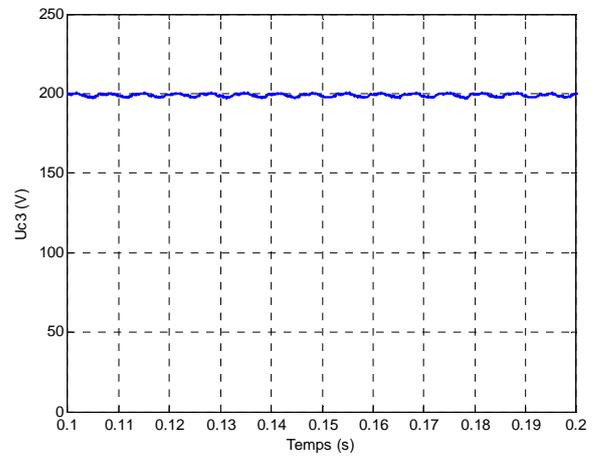


Fig.IV.15 Tension  $U_{c3}$  .

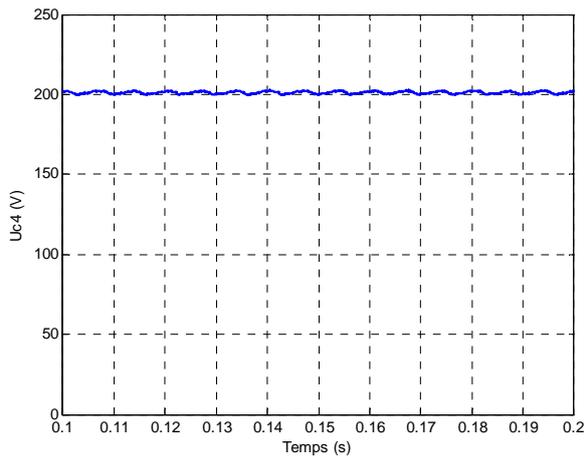


Fig.IV.16 Tension  $U_{c4}$  .

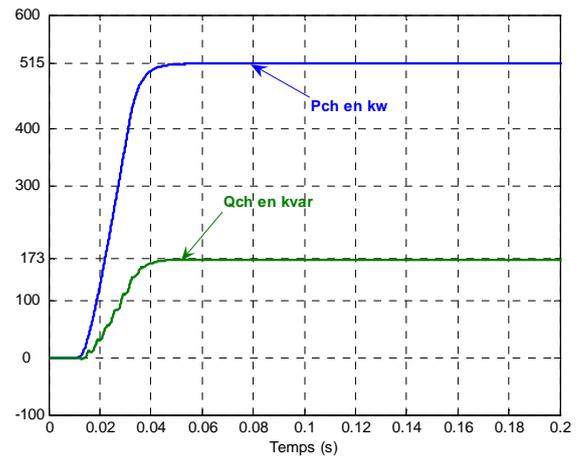


Fig.IV.17 Puissances Active et réactive de la charge.

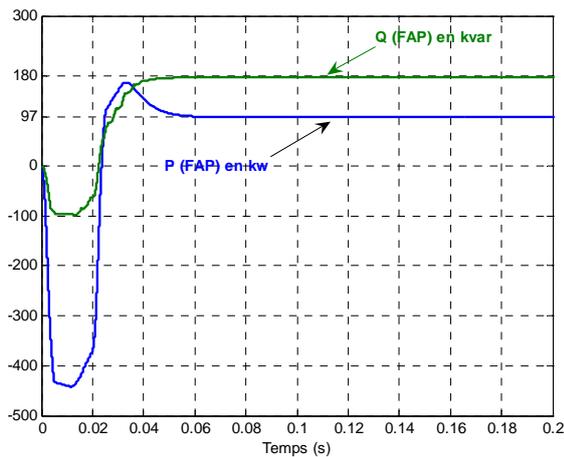


Fig.IV.18 Puissances Active et réactive du FAP.

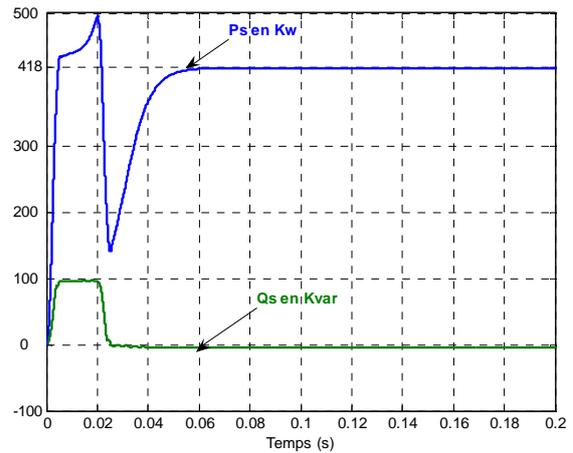


Fig.IV.19 Puissances Active et réactive de la source.

### IV.9 Conclusion

L'intégration d'une UPS dans un système de compensation des perturbations harmoniques a été étudiée et simulée sous MALAB SIMULINK.

Dans ce chapitre la PEMFC remplace l'élément de stockage de l'énergie dans les systèmes UPS et le FAP cinq niveaux assure la compensation simultanée du facteur de puissance et de l'énergie réactive tout en permettant le passage de puissance active fournie par la PEMFC à la charge.

Les résultats de simulation ont montré l'efficacité du filtre actif à la compensation des courants harmoniques et du facteur de puissance d'une part et à la contribution de la PEMFC avec le réseau à la production d'environ 20% de la puissance active demandée par la charge.

## Conclusion Générale

Ce travail de recherche a été consacré à l'étude de l'intégration des alimentations sans interruption UPS dans les systèmes de compensation des perturbations harmoniques. Il porte sur l'intégration d'une PEMFC en vue de remplacer l'élément de stockage dans les systèmes UPS d'une part, et à la contribution avec le réseau électrique à l'alimentation des charges critiques tout en assurant la dépollution en harmonique et la compensation du facteur de puissance d'autre part.

Le premier chapitre a été consacré à l'étude des topologies des systèmes UPS. L'étude des différentes topologies utilisées dans les UPS notamment les structures on-line, off-line, interactives et de ses éléments constitutifs ont été présentés. L'inconvénient de leurs raccordements au réseau électrique (source d'harmonique), les échecs et les problèmes des batteries UPS et leurs effets néfastes sur l'environnement ont aussi fait l'objet de ce premier chapitre. La stratégie de contrôle des convertisseurs CC/CA utilisées dans les UPS est aussi considérée comme étant un facteur de performance. Dans ce sens le second chapitre a été dédié à la présentation d'une commande optimale LQR du convertisseur CC/CA. Il est évident à partir des résultats de simulation que les réponses dynamiques obtenues sont satisfaisantes. La stratégie de contrôle proposée offre de bonnes performances par rapport aux variations de charge avec un faible THD, même à basses fréquences de commutation (2 kHz) qui la rende très utile pour les applications de grande puissance. La PEMFC s'intègre dans le système UPS en vue de remplacer l'élément de stockage de l'énergie (batteries) à travers l'alimentation d'une charge isolée (cas d'absence du réseau principal). Cela est clairement présenté à la fin de ce deuxième chapitre et ce à travers une application qui consiste à l'alimentation d'un groupe d'habitat assurée par une PEMFC de 45 kW.

Le troisième chapitre a été consacré à l'association du FAP au PEMFC. L'étude des techniques d'identification des courants harmoniques notamment la méthode des puissances instantanée et sa variante en utilisant les FMV (filtres multi-variable), suivi de la présentation de trois techniques de contrôle de courant du filtre actif : le contrôle par modulation de largeurs d'impulsions ou MLI, le contrôle par hystérésis conventionnelle et finalement le contrôle par logique floue. Le tableau suivant résume les résultats de

simulation pour les trois techniques de commande :

Type de commande	Après filtrage
MLI	THD=2.36
hystérésis conventionnelle	THD=2.16
Logique floue	THD=1.78

Finalement nous avons présenté deux applications d'importance particulière :

- FAP à trois bras, cinq niveaux qui pourrait être étendue à quatre bras-cinq niveaux
- Association PEMFC-FAP à trois bras, cinq niveaux

L'importance provient du fait que les deux applications présentent les avantages des onduleurs multi-niveaux dans les applications de grande puissance (résolvant ainsi les problèmes de limitation des éléments de commutation), d'autre part l'association de la PEMFC au FAP en vue de remplacer l'élément de stockage de l'énergie a montré son intérêt à travers la prise en charge de l'énergie nécessaire à la régulation du bus continu du FAP par la pile à combustible.

L'objectif de recherche fixé dans cette thèse a été atteint à travers l'intégration d'une UPS dans un système de compensation de perturbations harmoniques pour une charge critique. la PEMFC dans cette application remplace l'élément de stockage de l'énergie dans les systèmes UPS et l'onduleur de tension assure la dépollution du réseau en harmoniques de courant tout en contribuant avec le réseau à l'alimentation de la charge critique injectant ainsi de la puissance active. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité du filtre actif à la compensation des courants harmoniques soit un THD du courant de source de 1.07% et un facteur de puissance unitaire d'une part, et à la contribution de la PEMFC avec le réseau à la production d'environ 20% de la puissance actif demandée par la charge.

Ce travail nous permet d'envisager de nombreuses orientations futures. Ces perspectives de recherche peuvent se décliner en trois thèmes principaux. L'un concerne davantage la validation expérimentale des résultats de simulation. Le second aspect concerne l'émulation d'une PEMFC et ce pour permettre la reproduction de son comportement réel. Le troisième thème traite de la continuité de service des filtres actifs « Onduleur triphasé de tension tolérant les défauts » en cas de défaillance d'un des semi-conducteurs de puissance, ou d'un des capteurs (courant ou tension).

## ANNEXE

Tableau A.1

## Paramètres du modèle de la PEMFC

Température de stack, $T$ (K)	343
Constante de Faraday, $F$ (C/kmol)	96484600
Constante de gaz universelle, $R$ (J/kmol K)	8314.47
Tension à vide, $E_0$ (V)	0.8
Nombre de cellule, $N_0$	340
Constante, $K_r = N_0/4F$ (kmol/s A)	$0.881 \times 10^{-6}$
Facteur d'utilisation, $U$	0.85
Constante molaire de valve d'hydrogene, $K_{H_2}$ (kmol/s atm)	$4.22 \times 10^{-5}$
Constante molaire de valve d'eau, $K_{H_2O}$ (kmol/s atm)	$7.716 \times 10^{-6}$
Constante molaire de valve d'oxygene, $K_{O_2}$ (kmol/s atm)	$2.11 \times 10^{-5}$
Constante de temps d'hydrogène, $\tau_{H_2}$ (s)	3.37
Constante de temps d'eau, $\tau_{H_2O}$ (s)	18.418
Constante de temps d'oxygène, $\tau_{O_2}$ (s)	6.74
Constante tension d'activation, $B$ (A <sup>-1</sup> )	0.04777
Constante tension d'activation, $C$ (V)	0.0136
Résistance interne du stack, $R^{int}$ ( $\Omega$ )	0.2778

Tableau A.2

## Paramètres du contrôleur LQR

Tension de référence	$V_{ref} = 230\sqrt{2}$ V (peak), 50Hz
Temps de discrétisation	$T_s = (1/18000)$ s
Matrice de pondération d'état	$Q = \text{diag} [50 \ 100 \ 150 \ 1 \ 1]$
Matrice de pondération d'entrée	$R_u = 100$
Inductance du filtre	$L = 10\mu\text{H}$
Capacité du Filtre	$C = 55$ mF
Fréquence du triangulaire	$f_c = 2$ khz
Réactance de ligne [38]	$X = 0.05\Omega$

Tableau A.3: Paramètres de simulation du système

<b>Réseau électrique</b>	
Tension	$230 \sqrt{2} V_{\max}$
Fréquence	50Hz
$R_s, L_s$	0.5 m $\Omega$ , 0.015 m H
<b>paramètres</b>	
Constante d'activation de courant (B)	0.04777 [A-1]
Constante d'activation de tension (C)	0.0136 [V]
Constant de Faraday (F)	96484600 [C kmol-1]
Constante de temps d'hydrogène ( $\tau_{H_2}$ )	3.37[s]
Constante molaire de valve d'hydrogène ( $K_{H_2}$ )	$4.22 \times 10^{-5}$ [kmol (s atm)-1]
Hydrogen-oxygen flow ratio ( $r_{H-O}$ )	1.168
Constante $K_r = N_0 / 4F$	$1.4251 \times 10^{-6}$ [kmol (s A)-1]
Tension à vide ( $E_0$ )	0.8 [V]
Nombre de cellule ( $N_0$ )	550
Constante de temps d'oxygène ( $\tau_{O_2}$ )	6.74[s]
Constante molaire de valve d'oxygène ( $K_{O_2}$ )	$2.11 \times 10^{-5}$ [kmol (s atm)-1]
Résistance interne du stack ( $R_{int}$ )	0.2778 $\Omega$
Température du stack (T)	343[K]
Constante de gaz universelle (R)	8314.47 [J (kmol K)-1]
Facteur d'utilisation (U)	0.8
Constante de temps d'eau ( $\tau_{H_2O}$ )	18.418 [s]
Constante molaire de valve d'eau ( $K_{H_2O}$ )	$7.716 \times 10^{-6}$ [kmol (s atm)-1]
<b>Paramètres du FAP</b>	
Tension du bus continue	800 V
Condensateurs $C_1, C_2, C_3, C_4$	60 mF
Fréquence de commutation	5 KHz
$R_f, L_f$	5 m $\Omega$ , 0.068 m H
<b>Charge (Pont a thyristors)</b>	
$L_d$	2 m H
$R_d$	0.5 $\Omega$
Angle d'amorçage	30°

## Bibliographies

- [1] A. Emadi, A.Nasiri and S.B. Bekiarov, "Uninterruptible power supplies and active filters," CRC Press LLC, Washington, 2005.
- [2] M.C. Chandorkar, D.M. Divan, Y.Hu, and B. Banerjee, "Novel architecture and control for distributed UPS systems," Proceedings of the 9th IEEE Applied Power Electronics Conference, Feb. 1994, pp. 683-689.
- [3] R. Krishnan and S. Srinivasan, "Topologies for uninterruptible power supplies," Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Hungary, June 1993, pp. 122-127.
- [4] R.P.T. Bascope, D.S. Oliveira, C.O.C. Branco, F.L.M. Antunes and C.M. Cruz, "A high frequency transformer isolation 110V/220V input voltage UPS system," Proceedings of the 19th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006.
- [5] W.J. Ho, J.B. Lio and W.S. Feng, "Economic UPS structure with phase-controlled battery charger and input-power-factor improvement," IEE Proceedings of Electric Power Applications, 144 (4), 221-226, 1997.
- [6] B. Rabhi " Contribution à l'amélioration des performances des alimentations de secours (UPS), " thèse de doctorat université de Biskra 2008.
- [7] T. Uematsu, , T. Ikeda, , N. Hirao, S. Totsuka, T. Ninomiya and H. Kawamoto, "A study of the high performance single-phase UPS," Proceedings of 29th Power Electronics Specialists Conference, May 1998, pp. 1872-1878.
- [8] W.J. Ho, M.S. Lin and W.S. Feng, " Common-neutral-type AC/DC/AC topologies with PFC pre-regulator," Proceedings of the 29th Power Electronics and Drive Systems International Conference, May 1997, pp. 53-58.
- [9] H. Pinheiro, R. Blume and P. Jain, "Comparison of SV modulation methods for single-phase on-line three-leg UPS," Proceedings of the 26th Industrial Electronics Society Conference, 2000, pp. 1328-1333.
- [10] C.B. Jacobina, R.M.B. Correa, R.L.A. Ribeiro, T.M. Oliveira, E.R.C. da Silva, and A.M.N. Lima, "AC/AC converters with a reduced number of switches," Proceedings of the 36th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2001, pp. 1755-1762.
- [11] Prasad P, et al., "Topologies of Uninterruptible Power Supplies used in Critical Power Systems," GE Digital Energy Report No. 11, 2001).
- [12] M. Mohamed Karim ABDENNADHER" Etude et élaboration d'un système de maintenance prédictive pour les condensateurs et les batteries utilisées dans les alimentations sans interruptions (ASI), " thèse de doctorat université de Lyon 1, 2010.
- [13] American Power Conversion, Notes Techniques.
- [14] B. Essig, and G. Braun, "Selecting batteries for uninterruptible power supply systems," Proceedings of the 6th IEEE Applied Power Electronics Conference, March 1991, pp. 642-646.
- [15] R.F. Nelson and M.A. Kepros, "AC ripple effects on VRLA batteries in float applications," Proceedings of the 14th IEEE Batten/ Conference on Applications Advances, Jan. 1999, pp. 281-289.
- [16] A. King, W.Knight, "Uninterruptible power supplies and standby power systems," McGraw-Hill, New York, 2003.
- [17] P. Waltari, and T. Suntio, "Survey and evaluation of battery monitoring methods and results from user's viewpoint," Proceedings of the 21st IEEE International Telecommunication Energy Conference, 1999.
- [18] Ianko Valero Exposito "Interfaçage et contrôle commande de pile à combustible pour application stationnaires et transport, " Thèse de doctorat Université Joseph Fourier, 2004

- [19] J.M. Guerrero, L.G. Vicuna, J. Matas, J. Miret and M. Castilla, "A wireless controller for parallel inverters in distributed online UPS systems," Proceedings of the 29th Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2003, pp.1637-1642.
- [20] F. Kamran and T.G. Habetler, "A novel on-line UPS with universal filtering capabilities," IEEE Transactions on Power Electronics, 13 (2), 366-371, 1998.
- [21] R.P.T. Bascope, D.S. Oliveira, C.O.C. Branco, F.L.M. Antunes and C.M. Cruz, "A high frequency transformer isolation 110V/220V input voltage UPS system," Proceedings of the 19th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006.
- [22] S. Rathmann, and H.A.Warner, "New generation UPS technology, the delta conversion principle," Proceedings of the 31st IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Oct. 1996, pp. 2389-2395.
- [23] C. Joos, Y. Lin, P.D. Ziogas and I.F. Lindsay, "An online UPS with improved input-output characteristics," Proceedings of the 7th IEEE Applied Power Electronics Conference, Feb. 1992, pp. 598-605.
- [24] S. Martinez, M. Castro, R. Antoranz, and F. Aldana, "Off-line uninterruptible power supply with zero transfer time using integrated magnetics," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 36 (3), 629-635, 1989.
- [25] J.C. Wu and H.I. Jou , "A new UPS scheme provides harmonic suppression and input power factor correction," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 42 (6), 216-226,1995.
- [26] A. Windhorn, "A hybrid static/rotary UPS system," IEEE Transactions on Industry Applications, 28 (3), 541-545, 1992.
- [27] H. Wu, D. Lin, D. Zhang, K. Yao and J. Zhang, "A current-mode control technique with instantaneous inductor-current feedback for UPS inverters," Proceedings of the 14th IEEE Applied Power Electronics Conference, March 1999, pp. 951-957.
- [28] N.M. Abdel-Rahim, and J.E. Quaicoe, "A single-phase delta-modulated inverter for UPS applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 40 (3), 347-354, 1993.
- [29] S. Sae-Sue, V. Kinnares, C. Tangsiriworakul and S. Potivejkul, "Comparative performance evaluation of fixed and adaptive hysteresis band delta modulation techniques for UPS," Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, July 1999, pp. 956-960.
- [30] N.M. Abdel-Rahim, and J.E. Quaicoe, "Multiple feedback loop control strategy for single-phase voltage-source UPS inverter," Proceedings of the 25th IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 1994, pp. 958-964.
- [31] K.S. Low, R.Cao, "Model Predictive Control of Parallel Connected Inverters for Uninterruptible Power Supplies" Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006, pp.1-6.
- [32] Michael W. Ellis, Michael R. Von Spakovsky, and Douglas J. Nelson, " Fuel Cell Systems: Efficient, Flexible Energy Conversion for the 21st Century, " Proceedings of the IEEE, Vol.89, No.12, Dec.2001, pp. 1808-1818.
- [33] M. Hashem Nehrir, Caisheng Wang, and Steven R. Shaw, "Fuel Cells: Promising Devices for Distributed Generation, " IEEE Trans. Power & Energy, Vol.4, Jan/Feb 2006, pp. 47-53.
- [34] J.E. Larminie and A. Dicks, " Fuel cell systems explained, " John Wiley and Sons, Chichester, England, 2000.
- [35] DANG Bang Viet, "Conception d'une interface d'électronique de puissance pour Pile à Combustible, " Thèse de doctorat Université Joseph Fourier, 2006
- [36] M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M.S. Alam, P.C Byrne A.A. Sakla and T. Thomas, "Analysis of active and reactive power control of a stand-alone PEM fuel cell power plant," IEEE Trans. Power Syst, 19, (4), (2004), pp. 2022-2028.
- [37] M.Y. El-Sharkh, A. Rahman, M. S. Alam, P.C. Byrne, A.A. Sakla, T. Thomas, "Proton

- exchange membrane fuel cell dynamic model for residential use under review," IEEE Trans. Energy Conversion, June 2003.
- [38] J. Padulles, G.W. Ault, J.R. McDonald, "An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation," J. POWER Sources 86 (2000), 495-500.
- [39] Caisheng Wang: "Modelling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems," Thèse de Doctorat, Montana State University Bozeman, Montana 2006.
- [40] Emanuel Florin Mogos, "Production décentralisée dans les réseaux de distribution. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources," Thèse de doctorat E.N.S d'Arts et Métiers Centre de Lille, 2005.
- [41] Ludovic LECLERQ : "Apport inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes," Thèse de doctorat UST Lille, 2004.
- [42] Xiaorui Wang, Biao Huang; Tongwen Chen, "Data-driven predictive control for Solid Oxide Fuel Cell," Journal of Power Sources Elsevier, 2006.
- [43] N. Mohan, T.M. Undeland, and W.P. Robbins, "Power Electronics Converters, Applications and Design," Jon Wiley & Sons, 2001.
- [44] K.Ogata, "Discrete-Time Control Systems," Prentice Hall, 1987.
- [45] B. Rabhi, **A. Benaïssa**, A. Moussi and L. Loron, "Parameters and states estimation with linear quadratic regulator applied to uninterruptible power supplies (UPS)," IEEE 32 th Annual Conf (IECON), Nov 2006, pp. 2055-2060.
- [46] **A.Benaïssa**, B.Rabhi, A.Moussi, A. Dahmani, "A linear quadratic regulator control of a stand-alone PEM fuel cell power plant", Springer Journal, Frontiers In Energy, 8(1), pp.62-72, (2014).
- [47] M. Tanrioven, and M. S. Alam, "Modeling, control, and power quality evaluation of PEM fuel cell-based power supply system for residential use," IEEE Trans. Indus Appl, Vol.42, No.6, Nov/Dec 2006, pp. 1582-1589.
- [48] S. NIA, "Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commandes analogique et numérique temps réel," Thèse de doctorat de l'I.N.P.L, Nancy, France, 1996.
- [49] **A.Benaïssa**, B.Rabhi, A.Moussi, "Power quality improvement using fuzzy logic controller for five-level shunt active power filter under distorted voltage conditions", Springer Journal, Frontiers In Energy, 8(2), pp.212-220, (2014).
- [50] J. Xu, "Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité," Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 20 Janvier 1994.
- [51] L. Zellouma, "Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif," Thèse de doctorat de l'université Badji Mokhtar Annaba, (2010).
- [52] L. Asiminoaei, S. Hansen, C. Lascu and F. Blaabjerg, "Selective harmonic current mitigation with shunt active power filter," EPE, Aalborg,(2007).
- [53] J. H. Kim and S. K. Sul, "Overmodulation strategy for a three-phase four-leg voltage source converter," IEEE, Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting, 2003.
- [54] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits," Proceeding International Power Electronics Conference. Tokyo, Japan, pp. 1375-1386, 1983.
- [55] M. Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales," Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, (2008).
- [56] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three phase circuits," IEEE transaction on industrial application.vol.5.no 1.pp 625.1994.

- [57] H. Akagi, Y. Kanazawa et A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components, " *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-20, No. 9, pp. 625–630, May/June 1984.
- [58] M. C. Benhabib, "Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filters actifs parallèles à structure tension, Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande," Thèse, Université Henri Poincaré, Nancy-France, 2004.
- [59] S. Hong-Scok, "Control scheme for PWM converter and phase angle estimation algorithm under voltage unbalanced and/or sag condition," Ph.D. in Electronic and Electrical Engineering, POSTECH University, South KOREA, 2001.
- [60] M. Abdusalam, P. Poure and S. Saadate, " Hardware Implementation of a Three-Phase Active Filter System with Harmonic Isolation Based on Self-Tuning-Filter," *PESC, 39th IEEE, Power Electronics Specialists Conference, Island of Rhodes, Greece, 2008.*
- [61] M. Abdusalam, P. Poure and S. Saadate, " Study and experimental validation of harmonic isolation based on Self-Tuning-Filter for three-phase active filte," *ISIE, IEEE, International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, UK, 2008.*
- [62] Abdelaziz Chaghi, "Contribution au contrôle du courant sur un réseau de distribution électrique Application d'un compensateur actif," Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, 2004.
- [63] H. Liahng Jou, H. Yung Chu, J. Chang Wu, " A novel active power filter for reactive power compensation and harmonic suppression, " *INT. J. Electronics, Vol.75, N°3,1993, PP.577-587.*
- [64] H. Djeghloud, "filtrage actif de puissance, " Thèse de doctorat, université de Mentouri Constantine, décembre 2005.
- [65] N. Zunga, A. Polio, "Shunt active power filter synthesizing resistive, " *IEEE Trans. On power Elec, Vol.17, N°2, 2002.*
- [66] M. A. Alali, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension, " Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, Septembre 2002.
- [67] O. Vodyakho, T. Kim, S. Kwak, "Three-level inverter based active power filter for the three-phase, four-wire system," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1874–1880, 2008.
- [68] T.C. Green, J.H. Marks, "Control techniques for active power filters," *IEE Electric Power Applications 152*, pp. 369–381, March 2005.
- [69] M. Abdusalama, P. Poureb, S. Karimi, and S. Saadate, "New digital reference current generation for shunt active power filter under distorted voltage conditions," *Electric Power Systems Research*, vol.79 pp.759–765, 2009.
- [70] A. Hamadi, K. El-Haddad, S. Rahmani, and H. Kankan, "Comparison of fuzzy logic and proportional integral controller of voltage source active filter compensating current harmonics and power factor," *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, vol.2, pp. 645–650, 2004.
- [71] A.H. Bhat, P. Agarwal, "A fuzzy logic controlled three-phase neutral point clamped bidirectional PFC rectifier," *International Conference on Information and Communication Technology in Electrical Sciences (ICTES )*, pp. 238–244, December 2007.
- [72] B.P. McGrath, D.G. Holmes, "Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.49, no.4, pp. 858- 867, Aug 2002.
- [73] Jouanne AV, Dai S, Zhang H, " A multilevel inverter approach providing DC-link balancing, ride-through enhancement, and common-mode voltage elimination", *IEEE Trans Ind Electron 49:739–745, 2002.*
- [74] **A.Benaissa**, B.Rabhi, A.Moussi, M.F. Benkhoris and J.C. Le Claire, "Fuzzy logic controller for five-level shunt active power filter under distorted voltage conditions ",

Proceedings of the 38th annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society IECON, pp. 4973-4978, October 2012. Montreal, QC, Canada

- [75] **A. Benaissa**, B. Rabhi, A. Moussi, M.F. Benkhoris, " Fuzzy logic controller for 3-phase 4-leg 5-level shunt active power filter under unbalanced non-linear load and distorted voltage conditions", Springer Journal, International Journal of Systems Assurance Engineering and Management, 5(3), pp.361-370, (2014).
- [76] A. L. Bermeo, "Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension," Thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.