République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. Yahia Farés de Médéa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département du Génie Électrique et de l'Informatique

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en Génie électrique

Option : Réseaux Electriques

Thème :

Etude de la contribution des filtres actifs série et parallèle dans l'amélioration de la qualité d'énergie

Proposé et dirigé par,
Dr. Nour eddin HENINI

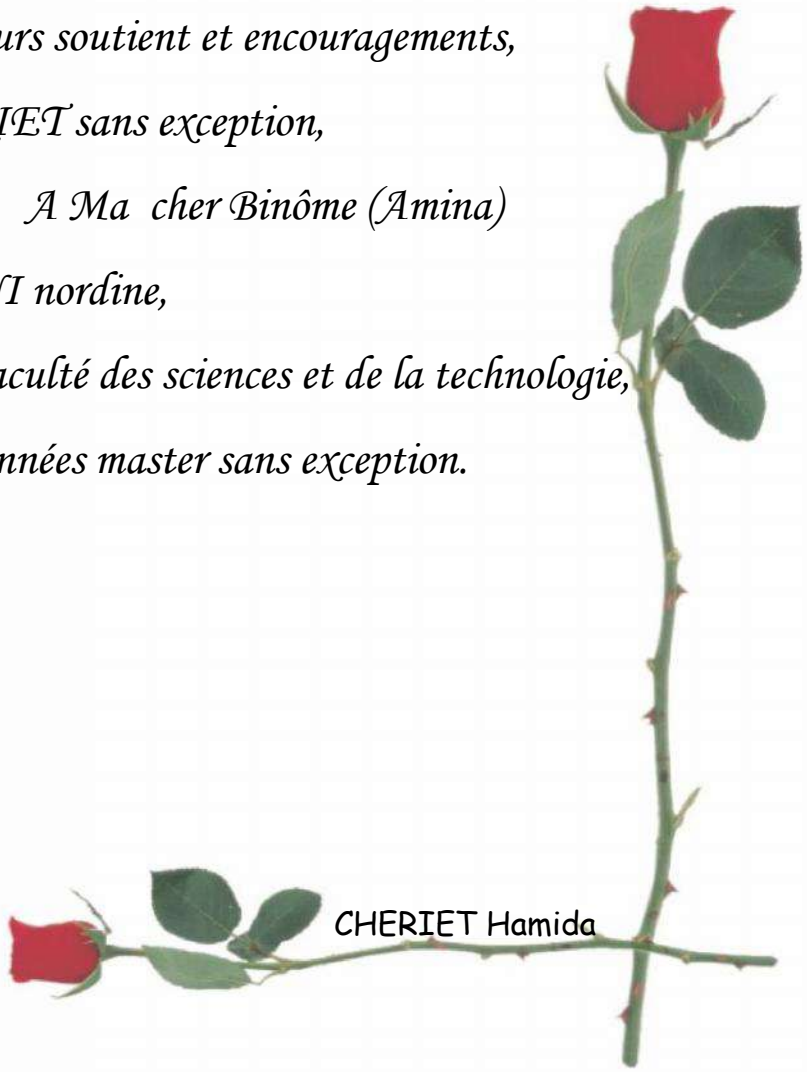
Préparé et présenté par,
Melle. Hamida CHERIET
Melle. Amina HAMDADOU

Année Universitaire 2014-2015

Dédicaces

Dédicaces

- *Je dédie cet humble travail,*
- *À mes très chers parents, pour leurs amour et sacrifices,*
- *À mes adorables frères, sœur (fatima.z et fozia) pour leur patience,*
- *À mes proches amis pour leurs soutient et encouragements,*
- *A toutes la famille CHERIET sans exception,*
- *A Ma cher Binôme (Amina)*
- *A mon promoteur HENINI nordine,*
- *A tous les enseignants de faculté des sciences et de la technologie,*
- *A toute la promotion 2ème années master sans exception.*



CHERIET Hamida

Je Dédie Ce Travail A :

A Mes Très Chers Parents Qui Etudiaient Pour Moi L'exemple De Sacrifie Et D'encouragement Et Qu'ils Demeurant Toujours Grave Dans Ma Mémoire Et J'espère Qu'ils Trouveront Ici L'expression De Ma Profonde Affection.

A mon grand parant uterusaria Allah

A Mes Chers Frère : Rabah, Yassine, Mahfoud et ton bourgeoise«R»

A Mes Chers Sœurs : Naima, Sabiha, Farida, Assia.

A Mes Chers Sœurs et mari leur

A bougie de Ma Famille : Mahmoud, ayoub, A.moemin, N. el yakune, Younes, Zakaria, Sabre, Idrus, Noh, nouvel, Rihab, Nor, Mahdi, Amina, W.chamce, Wissal, Mariam, A. El hake,

A Tout Ma Famille.

A Ma Cher Binôme «Hamida»

A Mes Amies : Z, H.B, I, M, H, S, D, K.

A Mes Tous Promotion 2015Réseau Electrique.

HAMDADOU Amina

Remerciements

Remerciements

Au tout début Nous louons le bon ***dieu*** *pour le courage et la volonté,*

L'espoir et la santé qu'il nous octroyé afin que soit réalisée ce Modeste travail

Nous remercions vivement notre en cadreur Mr .HENINI nor eddin

Pour son soutien moral et pédagogique pour son Orientation bienveillante.

Nos sincères remerciements vont également à tous les Membres du jury, qui font l'honneur de juger notre travail.

Un remerciement particulier à tous ceux qui ont contribué de près ou loin à la réalisation de notre travail

Grand Merci Ă TOUS…

Résumé

ملخص:

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة نظرية و محاكاة رقمية للمصافي الفعالة الطاقية باستعمال مختلف الاستراتيجيات و نظم التحكم التقليدية وهذا للقضاء على توافقيات التيار أو فرق الكمون.

في البداية قدمنا عرض لنوعية الطاقة الكهربائية ومختلف أنظمة التصفية الطاقية خاصة المصفاة الفعالة المتوازية(FAP) ، المصفاة الفعالة المتسلسلة(FAS) ومضبط الطاقة المتكامل(UPQC)، بعد هذا تركزت الدراسة على نمذجة رياضية للمصفاة الفعالة المتوازية المخصصة للقضاء على توافقيات التيار باستعمال مختلف الاستراتيجيات في مختلف ظروف فرق الكمون، بعدها قمنا بدراسة المصفاة الفعالة المتسلسلة المخصصة للقضاء على توافقيات فرق الكمون و معظم الاضطرابات الأخرى مثل نقص فرق الكمون ، زيادة فرق الكمون،أولا تزامن فرق الكمون.

تم تطوير نماذج المحاكاة العددية باستخدام برنامج MATLAB-Simulink و Sim Power System نتائج المحاكاة المتحصل عليها ، أثبتت فعالية النماذج المقترحة.

كلمات مفتاحية: مصفاة فعالة متوازية توافقية، مصفاة فعالة متسلسلة،تقنية الكشف المتزا من للتيارات المرجعية ،تقنيةالطاقات الفعالة والغير فعالة اللحظية، القضاء على توافقيات التيار و فرق الكمون.

Résumé :

L’objectif de ce mémoire est l’étude par simulation numérique des systèmes de filtrage active de puissance en utilisant différentes stratégies de contrôle à base de contrôleurs conventionnels en vue de réduire les harmoniques de courant et/ou de tension.

Dans un premier temps nous avons présentés la qualité d’énergie électrique ainsi que l’ensemble de systèmes de filtrage de puissance moderne en particulier le Filtre Actif Parallèle (FAP), le Filtre Actif Série (FAS). Dans un deuxième temps, l’étude à été focalisé sur le FAP dédié à la compensation des harmoniques de la courante source. Afin de protéger les charges sensibles l’étude à porté ensuite sur le FAS dédié à la compensation des harmoniques de tension et des différentes autres perturbations liés à la tension en particulier les creux de tension, surtension, déséquilibre, etc.….

Le modèle de simulation est développé en utilisant le logiciel **MATLAB-Simulink** et le Toolbox SimPowerSystem .L’évaluation des performances de chaque système de filtrage étudié tient compte de son comportement en régime permanent. Les résultats de simulation obtenus montrent l’efficacité des modèles proposés

Mots-clés :

Filtre actif parallèle(FAP), Filtre actif série (FAS), Méthode du référentiel lié au synchronisme, Méthode des puissances active et réactive instantanées PQ, compensation des harmoniques courant et tension.

Abstract:

The objective of this memory is the theoretical and numerical simulation study of the active power filter systems using different control strategies based on conventional controllers to reduce the current and/or voltage harmonics to standards values In the first part we presented the electrical power quality and the different power system filtering particularly Shunt Active Filter (Shunt AF), Series Active Filter (Series AF) .In a second part the study was focused on Shunt AF dedicated to the harmonic currents source compensation, the study is focused on the Series AF used to compensate voltage harmonics and all other voltage disturbances such us voltage sags, flickers and unbalances. The simulation models are developed using MATLAB-Simulink software and Sim Power Systems Toolbox. The performances evaluation of each configuration studied is based on their comportment in steady state. The obtained simulations results demonstrate the effectiveness of the proposed models particularly.

Keywords:

Shunt active filter (Shunt AF), Series active filter (Series AF), Synchronous reference frame method, Method of active power and reactive instantaneous Harmonics current and voltage compensation.

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Les harmoniques……..….3

Figure I.2 : filtre passif parallèle…….....9

Figure I-3 : Filtre passif série…….…..…9

Figure I.4 : Filtre passif amorti ou passe-haut……...10

Figure 1.5 : Filtre passif résonnant……11

Figure. I-6 : Filtre actif parallèle……...…14

Figure. I-7 Filtre actif série……...…14

Figure. I-8-Conditionneur actif de puissance UPQC……...….15

Figure. I.9 : Filtre actif série et filtre passif parallèle……...….16

Figure. I-10- : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle……..... 16

Figure. I-11 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle…….…17

Figure. II-1: Structure générale d'un filtre actif parallèle…….20

Figure. II-2. Schéma de principe d'un FAP à structure tension…….....21

Figure. II.3- Méthode d'identification des puissances active et réactive instantanées.....24

Figure .II.4- Méthode du référentiel lié au synchronisme…….……27

Figure .II. 5- Commande par hystérésis……29

Figure. II-6- Représentation schématique d'un onduleur triphasé……...….29

Figure. II-7. Schéma bloc du FAP-SRF-Contrôleur à hystérésis …… 30

Figure. II-8. Courant de charge avant la compensationi_{ch}(A), Courant harmonique fournit par le filtre i_{fabc}(A), Courant harmonique fournit par le filtre i_{fa} (A) …….....31

Figure. II-9. Courants de source i_{sa}(A) avant et après compensation……..31

a)Spectre harmonique du courant de source $\overline{i_{sa}}$(A) avant compensation (THDi=29.8……..…….32

b) Spectre harmonique du courant de source isa(A) avant compensation (THDi=4.36)…….……32

Figure III.1 Principe du filtre actif série …….. .35

Figure III.2 Structure générale du filtre actif série……..……. 36

Figure III.3 Partie puissance du filtre actif série……...…37

Figure III.4- Schéma du filtre de sortie pour un FAS…….…..38

Figure- III- 5- Principe de la commande MLI……..40

Figure- III-6 - Principe de commande par hystérésis……...41

Fig. III-7- Idification des tensions perturbatrices……..46

Fig. III-8- Diagramme vectoriel des tenions et des courants……....47

Fig. III-9- Tension de référence de compensation utilisant la méthode PQ……..……...48

Fig. III-10- Schéma de principe d'un filtre actif série-convertisseur de tension deux niveaux ……...49

Fig. III-11- Bloc diagramme du FAS utilisant une stratégie de contrôle PQ(I) associé à un contrôleur à hystérésis à base d'un convertisseur de tension deux niveaux……..…52

Fig. III-12-a) Tension de source……..53

-b) Spectre harmonique de la tension de source……..53

-c) Tensions de la charge après compensation…….. …….. .53

-d) Spectre harmonique de la tension de compensation……54

LISTE DES ACRONYME

Notations

i_{ch} (t) : Courant instantané absorbé par la charge

v_{ch}(t) Tension instantanée aux bornes de la charge

v_s(t) : Tension instantanée simple de source

V_s : Valeur efficace du fondamental de la tension source

i_s(t) : Courant instantané fourni par la source

I_s : Valeur efficace du courant fournit par source

P : Puissance active

Q : Puissance réactive

U_{dc} : Tension continue aux bornes du condensateur de stockage

$U_{dc\text{-}ref}$: Tension de référence du condensateur de stockage

L_f : Valeur de l'inductance du filtre actif parallèle

R_f : Valeur de la résistance interne du filtre actif parallèle

R : Valeur de la résistance interne du filtre actif parallèle

V_f : Tension simple en sortie du convertisseur du filtre actif parallèle

U_d : Tension redressée coté charge

I_d : Courant redressée coté charge

R_s : Résistance de la source d'alimentation

L_s : Inductance de la source d'alimentation

R_{ch} : Résistance de charge du convertisseur AC/DC

L_{ch} : Inductance de charge du convertisseur AC/DC

f : Fréquence de commutation du convertisseur

L_{fs}, C_{fs} : Inductance et capacité du filtre actif série

tv : Taux de déséquilibre de tension

V_d : Amplitude de la tension directe

V_i : Amplitude de la tension directe

V_d : Amplitude de la tension directe

V_i : Amplitude de la tension directe

C_{dc}1, 2 : Valeur des deux condensateurs stockage

z_S i_{dh} : chute de tension harmonique

V_{sf} : la tension de sortie de l'onduleur ;

i_l : courant de la charge à protéger

Vsf : La tension de sortie de l'onduleur

V_p : la valeur crête de la tension de la porteuse

V_{dc} : la valeur crête de la tension continue à l'entrée de l'onduleur.

Abbreviations

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

FAP : Filtre actif parallèle

FAS : Filtre actif série

UPQC : Conditionneur universel d'énergie électrique

SRF : Méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF)

PQ : Méthode des puissances active et réactive instantanées (PQ)

HB : Bande d'hystérésis

α,ß : Axe du plan stationnaire (α,ß)

d,q : Axe direct, axe en quadrature du plan tournant synchrone (d,q)

THDv : Voltage Total Harmonics Distorsion (Taux de distorsion harmonique en tension)

THD_i : Current Total Harmonics Distorsion (Taux de distorsion harmonique en courant)

1, 2,3 : Axe du plan 123

C_{pq}: transformation matricielle des tensions de phase $(u_p \; et \; u_\beta)$ en$(u_p \; et \; u_q)$

C32 : Transformation de Concordia 3-2

C23 : Transformation inverse de Concordia 2-3

MLI : Modulation en largeur d'impulsions

DC : Courant continus

$\bar{p}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant

$\bar{q}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant

$\tilde{p}$: Puissance harmonique active

$\tilde{q}$: Puissances réactive harmonique

P_{in} : Puissance fournie par la source d'alimentation

Pin_ pcc : Puissance écoulée au point de raccordement (PCC)

$P_{séries}$: Puissance active absorbée par le filtre série émanant du bus continu

Table des matières

LISTE DES FIGURES
LISTE DES ACRONYMES
INTRODUCTION GENERALE
CHAPITRE I: QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE
I.1.Introduction……1
I.2.Qualité de la tension……....1
I.2.1.Amplitude……1
I.2.2. Fréquence ……...2
I.2.3 Forme d'onde ……..2
I.2.4.Symétrie ……..……2
I.3.Qualité du courant…….. 3
I.4. Harmoniques et inter harmoniques …… 3
I.4.1. Définition et origine des harmoniques……....3
I.4.1.1. Distorsion harmoniques……4
I.4.2.conséquences des harmoniques …….……4
II.4.3. : Les sources des harmonique……....5
I.4.4.Inter harmoniques …….……..6
I-4-5-Les Séries Fourier des harmoniques …….……6
I.4.5.1. Transformée de Fourier…….……7
I.5.Solutions traditionnelles de dépollution……....7
I.5.1. Dépollution des courants perturbateur…….……....7
I.5.2.Filtre passive parallèle……..……..9

I.5.3. Filtre passif série…….9
I.5.4. Filtre passif amorti ou passe-haut……..…..9
I.5.5. Filtre résonant……...…10
I.6.Solutions modernes ……..…..…11
I.6.1. Dépollution des tensions perturbatrices……11
I.6.2. Solutions de dépollution modernes……...…11
I.6.2.1. Dépollution des courants perturbateurs…….....12
I.6.2.2. Dépollution des tensions perturbatrices…….12
I.6.2.3.Solution de dépollution adoptée…….12
I.7.Filtres actifs ……..……...…..13
I.7.1.Filtre actif parallèle ……...13
I.7.2. Filtre actif série…….14
I.7.3. Combinaison parallèle-sérié actifs (UPQC) ……...….15
I.8.Combinaison hybride active et passive ……...15
I.8.1. Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles ……...16
I.8.2. Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles ……..16
I.8.3.Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle……....17
I.9.Conclusion …….17
CHAPITRE II : FILTRE ACTIVE PARALLELE
II.1 .Introduction ……...….19
II.2.Structure d'un filtre actif parallèle ……...…19
II.3.Mode de fonctionnement…….20
II.4.Principe de fonctionnent d'un filtre actif parallèle à structure tension…….….20
II.5.Stratégies de fonctionnement d'un filtre actif parallèle à structure tension……..20
II.5.1.Identification des courants harmonique……23
II.5.1.1.Méthode des puissances active et réactive instantané…….23
II.5.1.2.Méthode du référentiel lié au synchronisme……...25

II.5.2.Contrôleur des courants de référence……..….27
II.5.2.1.Contrôle par hystérésis fixe……..…28
II.6.La modélisation du filtre actif parallèle…….29
II.7.Filtre actif parallèle à base d'un convertisseur de tension deux niveaux……..…….30
II.7.1. Commande d'un FAP en utilisant la stratégie SRF à base d'un contrôleur à hystérésis……...30
II.8.Résulta de simulation ……..30
II.9.Les avantages et les inconvénients des filtre active parallèle……...…32
II.10.Conclusion…….….33
CHAPITREIII:FILTRE ACTIVE SERIE
III.1.Introduction……35
III.2.Filtre actif série…….……..35
III.3. Structure générale du filtre actif série……...……..36
III.3.1. Partie puissance……..……36
III.3.1.1. Onduleur de tension……..……36
III.3.1.2.Système de stockage de l'énergie…….…….37
III.3.1.3. filtre de sortie……37
III.3.2. Modélisation du filtre de sortie……..38
III.3.2.1. Transformateurs d'injection…….…....39
III 3.2.2. Partie contrôle commande……...…..…….39
III 3.2.2.1. Commande de l'onduleur……...…..40
III.4 Stratégies de contrôle d'un Filtre Actif Série à structure Tension……...…….40
III.4.1.Méthode basée sur le calcul des composantes symétriques……41
III.4.2.Méthode basée sur le calcul des perturbations dans le repère (d-q)……43
III.4.3. Méthodes des puissances active et réactive instantanées (PQ)……..……44
III.5. Filtre actif série à structure tension deux niveaux……48
III.5.1. Modèle mathématique du FAS à structure tension deux niveaux ……....49
III.6.Simulation du fonctionnement d'un filtre actif série-charge non linéaire

inductive……..…..51

III.6.1. Filtre actif série à base d'un convertisseur de tension deux niveaux…….....51

III.6.1.1. Compensation des harmoniques de tension……...…52

III.7.Conclusion……...…54

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

Introduction Générale

Introduction General

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans l'industrie a entraîné ces dernières années d'énormes problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels utilisant des charges non-linéaires comme les redresseurs, les variateurs de vitesse, et tous les autres équipements à base d'électronique de puissance.

Les harmoniques engendrées par ces charges non-linéaires circulent dans les réseaux électriques et peuvent perturber le fonctionnement normal voir même engendrer la destruction de certains équipements électriques; ces effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé. Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et améliorer la qualité de l'énergie électrique différents systèmes de filtrage ont été développés et utilisés, parmi eux les filtres passifs, ils permettent d'éliminer les harmoniques de courant et compenser aussi la puissance réactive sauf que ces systèmes de filtrage traditionnel présentent certains inconvénients, en effet ils sont figés sur des fréquences fixées au départ, apparition de phénomène de résonance, etc...

Pour contourner ces inconvénients, les chercheurs activant dans le domaine du filtrage de Puissance ont développés ces dernières années des systèmes de filtrage moderne communément appelés Active Power Filters, parmi ces systèmes on trouve le filtre actif parallèle qui doit être connecté en parallèle à la source et permet de compenser les harmoniques de courant et la puissance réactive. Le filtre actif série qui doit être connecté en série avec la source de tension à pour fonction la compensation à la fois des tensions harmoniques et des différentes autres perturbations liées à la tension.

La problématique de travail à traiter dans ce mémoire consiste donc en :

- L'étude de l'ensemble de ces systèmes de filtrage actifs (FAP, FAS) en utilisant diverses stratégies de contrôle à base de topologie de convertisseur type tension deux niveaux
- Développement de modèles de simulation numérique reflétant le fonctionnement de ces systèmes de filtrage en utilisant le Logiciel MATLAB-Simulink

Le travail présenté dans ce mémoire est divisé en trio chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons La qualité de l'énergie électrique et Harmoniques et inter harmoniques ainsi Solutions traditionnelles de dépollution, Solution modern.

Le deuxième chapitre porte sur l'étude du filtre actif parallèle (FAP) à structure tension deux niveaux. Nous présentons dans un premier temps les différentes stratégies de contrôle permettant l'identification des courants de référence en particulier la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées (PQ).

… Le troisième chapitre est consacré au filtre actif série à structure tension deux niveaux, pouvant protéger les charges sensibles contre les harmoniques de tension, les creux de tension, les surtensions, etc. Différentes stratégies de contrôle pour l'identification des tensions de compensation ont été présentées et discutés. La méthode PQ, et vue ces avantages, a été adoptée pour le développement des modèles du FAS en utilisant deux approches différentes. Les travaux de simulation ont été élaborés on utilisant le logiciel MATLAB/Simulink

Enfin, nous concluons le manuscrit de ce mémoire par la présentation des principaux résultats obtenus en particulier, l'influence de la topologie du convertisseur, la stratégie de contrôle adoptée, la technique de pilotage du convertisseur de puissance dans la simplification et l'amélioration des performances de ces systèmes de filtrage dédiés à la compensation des harmoniques courant et/ou tension.

Chapitre I :

QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

I-1-Introduction

La qualité de l'énergie électrique est un terme très répandu dans le domaine scientifique et industriel. Ce concept détermine les paramètres qui définissent les propriétés du produit électricité en conditions normales, en termes de continuité de la fourniture et des caractéristiques de la tension (symétrie, fréquence, amplitude, forme d'onde). Cette vision a pour but de déterminer les caractéristiques de la fourniture électrique afin de limiter son influence sur les différentes charges connectées au réseau, les principales perturbations électriques ainsi que leurs origines, caractéristiques et conséquences.

Selon l'IEEE, on appelle "power quality problem" toute variation dans l'alimentation en puissance électrique, ayant pour conséquence le dysfonctionnement ou l'avarie d'équipements des utilisateurs, telle que : creux de tension, surtension, transitoire, fluctuations de tension, harmoniques, déséquilibre... Cependant, tous ces phénomènes affectent essentiellement la tension qui est fournie à l'utilisateur. Si ce dernier n'utilise pas de charge perturbatrice, le courant sera peut-être déformé, mais uniquement d'une manière qui résulte des caractéristiques de la tension fournie. C'est pourquoi on dit parfois que la qualité de l'énergie se réduit à la qualité de la tension ("power quality = voltage quality").

I-2-Qualité de la tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. [1]

I.2.1.Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de ± 10 % autour de la valeur nominale.

Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations : les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations

importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.

- Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau. [1]

I.2.2. Fréquence :

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge.

Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle 50 *HZ* ± 1% pendant 99,5 % de l'année, et -6%÷4% durant 100% du temps. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes. [2]

I.2.3 Forme d'onde :

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non périodiques (bruits). [1]

I-2- 4 -Symétrie :

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. Les dissymétries du réseau ne provoquent que de faibles niveaux de déséquilibre de la tension (généralement limités à quelques dixièmes de pour-cent).

Par contre, certaines charges monophasées (en particulier la traction ferroviaire en courant alternatif) sont la cause de courants déséquilibrés importants et dès lors d'un déséquilibre significatif de la tension. [1]

I-3- Qualité du courant :

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante, déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension. [2]

I-4- Harmoniques et inter harmoniques

I.4.1. Définition et origine des harmoniques

La distorsion harmonique est un phénomène périodique qui désigne la superposition, sur l'onde fondamentale de fréquence f, des ondes également sinusoïdales et de fréquences multiples de celle de la fondamentale. La décomposition en série de Fourier d'une onde quelconque permet l'obtention de ses composantes harmoniques comme l'illustre la figure I.1. Néanmoins, des Inter-harmoniques ayant des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale peuvent parfois exister. Le rang d'une harmonique est défini comme :

$$\text{rang} = \frac{f_h}{\text{f}} \qquad \text{(I.1)}$$

Où f_h et f désignent la fréquence de l'harmonique et la fréquence fondamentale, respectivement. [3]

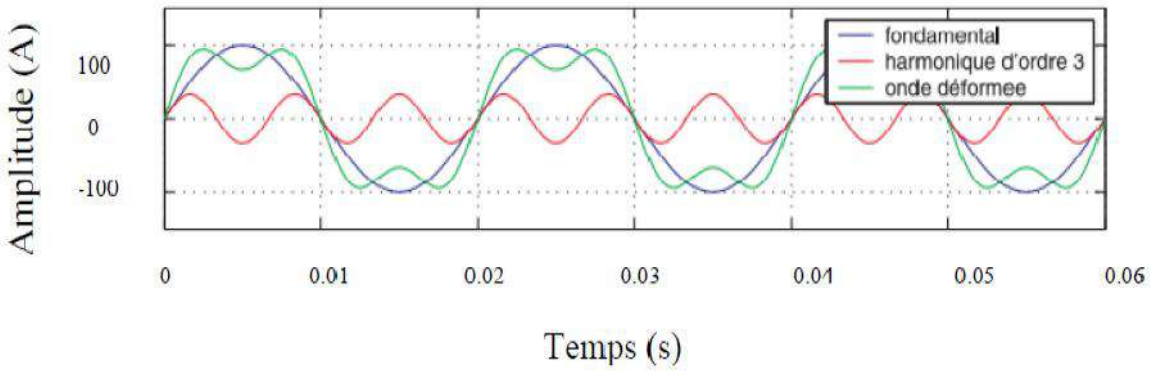


Figure I-1: Les harmoniques

I-4-1-1- Distorsion harmoniques :

Afin de pouvoir quantifier le contenu harmonique dans un signal Y(t)périodique, la Distorsion Harmonique Totale (THD) est le facteur le plus souvent utilisé. Le THD peut être calculé pour un courant ou une tension comme suit:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} Y_n^2}}{Y_1} \qquad (I..2)$$

Où Y_n désigne la valeur efficace de l'harmonique de rang n dans le signal y(t)et n_{max} est le rang maximal considéré pour le calcul (généralement n_{max} = 40 ou 50).

La valeur efficace y du signal Y(t)est reliée au THD par la relation suivante:

$$Y = \sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} Y_n{}^2} = Y_1 \sqrt{1 + THD^2} \qquad (I.3)$$

Le taux individuel τ_n de l'harmonique de rang n est définit par:

$$\tau_n = \frac{Y_n}{Y_1} \qquad (I.4)$$

Pour une même valeur efficace, les formes d'ondes peuvent être différentes. Par conséquent, un facteur permettant de caractériser la forme d'onde est le facteur de crête, et il est défini comme le rapport de la valeur crête du signal sur sa valeur efficace : [3]

$$Fcr = \frac{\hat{Y}}{Y} \qquad (I.5)$$

.I-4-2- conséquences des harmoniques :

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, de forme l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentes par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donnent lieu à des surcoûts de production d'énergie importante. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux type : les effets instantanés et les effets à terme. [4]

- ***Les effets quasi instantanés****:* sur certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de control et régulation, etc., la présence d'harmoniques sur les signaux provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur de Crète de l'onde [4]
- ***Les effets à terme*** *:* Dans les machines tournantes, les transformateurs et les condensateurs, ils se manifestent par des échauffements supplémentaires ; ce qui entraine la destruction du matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique [4].

II-4-3- : Les sources des harmoniques:

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques.

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non-linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques (les harmoniques les plus importants étant les harmoniques 5, 7, 11 et 13). Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les utilisateurs alimentés par le même réseau électrique La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme par exemple .[5]

- ✓ L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires,
- ✓ L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunication qui peut induire dans ces derniers des bruits importants, Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation,

- En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés,
- Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles ci peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique ; dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.
- La dégradation de la précision des appareils de mesure.
- Des perturbations induites sur les lignes de communication, rayonnement électromagnétique notamment.

I-4-4-Inter harmoniques

Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inters harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande. [4]

I-4-5-Les Séries Fourier des harmoniques :

Par définition, une fonction f (t) est dite périodique si elle vérifie la relation

$$f(t) = f(t + T_0)$$

(I.6)

OùT_0 sa période fond mentale

. Un signal x(t) périodique de période fondamentaleT_0 peut, sous les conditions de Dirichlet (x(t) borné, continu par morceaux, monotone par morceaux), se décomposer en une série convergente de la forme :

$$X(t) = a_{0+\sum_{K=1}^{\infty}[a_K cos(Kw_0 t) - b_K sin(Kw_0 t)]} \quad (I.7)$$

Ou

$w_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ est la pulsation fondamentale du signal.

On définit également la fréquence fondamentale du signal par

$$f_{0=\frac{2}{T_0}} \quad (I.8)$$

Ce signal peut de la même manière être représenté par une série de signaux exponentiels complexes :

$$X(t)=\sum_{K=-\infty}^{\infty} X_K = \sum_{K=-\infty}^{\infty} \langle X\rangle_K \, e^{jKW_0 t} \quad (I.9)$$

Où

$X_K = \langle X\rangle_K e^{jKw_0 t}$ est l'harmonique de rang k de fréquence Kf_0 et d'amplitude complexe

$$\langle X\rangle K = |X_K| e\langle X_K \quad (I.10)$$

Obtenue par l'équation :

$$\langle X\rangle k = \frac{1}{T_0}\int X(t)\, e^{-jkwt} dt \quad (I.11)$$

T_0 Dans le cas de signaux à valeurs réelles, les coefficients X_K vérifient la propriété $X_{-K} = \overline{X_K}$, où $\overline{X_K}$ est le complexe conjugué de X_{-K}. Ceci montre que pour de tels signaux, les harmoniques de fréquence positive $(K > 0)$ contiennent la même information que ceux de fréquence négative $(K < 0)$ et suffisent pour définir entièrement le signal analysé. Cette propriété n'est plus vraie pour les signaux à valeurs complexes [6]

II.4.5.1 Transformée de Fourier

L'outil série de Fourier se rapporte aux signaux purement périodiques. Les signaux non périodiques peuvent aussi, sous certaines conditions, se décomposer en une somme d'exponentielles complexes : [5]

$$X(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} X(w)\, exp^{jwt} dw$$

(I.12)

Où

$$X(w) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)\, exp^{-jwt} dt \quad (I.13)$$

I-5- Solutions traditionnelles de dépollution

I.5.1. Dépollution des courants perturbateurs

L'existence de perturbations dans un réseau électrique conduit à prendre impérativement des dispositifs afin d'atténuer ou d'éliminer leurs conséquences sur les équipements électriques et sur les réseaux électriques. Sur cette base on va décrire de manière sommaire les principaux dispositifs existants utilisés pour le traitement des perturbations : [7]

- ***Rééquilibrage des courants perturbateurs***

Répartition égale des charges sur les trois phases quand les charges monophasées et biphasées sont mal réparties à cause des courants déséquilibrés dans le réseau électrique basse tension.

Compensateur passif, ex : Montage de Steinmetz qui provoque un fort déséquilibre pour les fréquences différentes de 50Hz avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmonique. **[7]**

❖ ***Compensation de la puissance réactive***

La compensation d'énergie réactive-consommée en générale par les charges non linéaires provoque des pertes, réduit la capacité de transport des lignes électriques et cause des chutes de tension par suite du caractère inductif du réseau d'où la nécessité de prévoir des moyens de compensation. Elle est utilisée pour relever le facteur de puissance.

La plus simple méthode de compensation consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau pour relever le facteur de puissance du réseau d'alimentation, à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance pour la compensation locale ou près d'un transformateur d'alimentation pour la compensation globale .

Afin d'augmenter la performance dynamique et réaliser une compensation variable en fonction de la consommation d'énergie réactive de la charge, il est nécessaire d'utiliser des convertisseurs statiques de puissance réactive avancée, utilisés plus particulièrement pour injecter de la puissance réactive en un point du réseau, de façon à augmenter la puissance maximale transmissible et la stabilité du réseau; les machines synchrones triphasées sont également utilisées pour compenser la puissance réactive.

Autant que le principale défaut de ce genre de compensation, est qu'elle fournie une puissance réactive fixe et ne peut pas s'adapter aux besoins des installations (variation de l'énergie réactive). Pour éviter ce problème, on utilise un stator-compensateur qui au moyen dégradeurs et de grosses inductances permet de consommer une partie de la puissance réactive qui s'adapte aux variations de celle-ci, mais ces dispositifs sont très encombrants et mêmes générateurs d'harmoniques, on les trouve souvent sur les réseaux haute tension. [7]

❖ ***Compensation des courants harmoniques :***

L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.

Disposition de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par décharges non-linéaires.

Parmi les dispositifs de filtrage les plus répondus, les filtres passifs ; cette solution est la plus ancienne et la plus répandue aux problèmes d'harmoniques. Il s'agit d'utiliser un condensateur en série avec une inductance de façon à obtenir l'accord sur un harmonique de fréquence donné. Cet ensemble présente une impédance très faible pour sa fréquence d'accord et se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré. Donc le principe est de piéger les harmoniques, et de les empêcher de se propager dans le réseau et conserver le fondamental tel qu'il est.

L'absorption des harmoniques peut être obtenue par la mise en place des filtres harmoniques dont l'impédance est faible pour les harmoniques concernés et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau.

Il est possible d'utiliser simultanément plusieurs ensembles accordés sur des fréquences différentes afin d'éliminer plusieurs rangs d'harmoniques. Les filtres passifs contribuent à la compensation d'énergie réactive.

Parmi les filtres passifs, on peut citer : [7]

I.5.2 filtre passive parallèle

On place en parallèle avec le réseau d'alimentation une impédance très faible accordée à la fréquence d'harmonique à piéger.

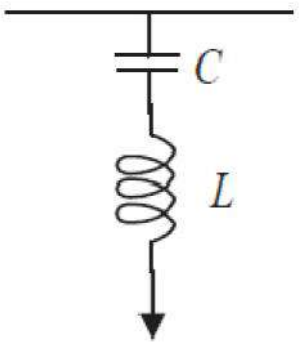


Figure I.2 : filtre passif parallèle

I-5.3. Filtre passif série

Le principe est le même que le précédent, mais au lieu de piéger les harmoniques, on les empêche de remonter à la source. Un exemple de filtre passif série est le circuit bouchon.

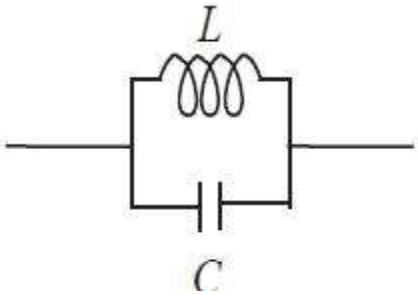


Figure I-3 : Filtre passif série

I.5-4- Filtre passif amorti ou passe-haut

Le filtre passif amorti ou passe-haut (Figure I.4) compense les harmoniques supérieurs ou égales à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres résonants. Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques, et pour compenser la puissance réactive. [8]

Leurs inconvénients sont les suivants :

• Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.

• Equipements volumineux.

Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau, ce principe demande une étude soignée, car si le filtre se comporte bien comme un court-circuit pour une fréquence désirée, il peut présenter des risques de résonance avec les autres inductances du réseau sur d'autres fréquences et ainsi fait augmenter des niveaux d'harmoniques non gênants avant sa mise en place.

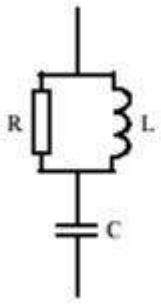


Figure I.4 : Filtre passif amorti ou passe-haut.

I-5-4- Filtre résonant

C'est un filtre très sélectif constitué d'un ensemble RLC en série voir la figure (I.5) et il est accordé sur une fréquence déterminée. Sa performance est caractérisée par la réduction de

la tension harmonique entre ses bornes .Cette solution consiste aussi à offrir au courant harmonique que l'on désire éliminer, un chemin moins résistant que la ligne. Elle exploite la résonance série des circuits formés par l'association d'éléments inductifs et capacitifs, ces circuits, pour chaque paire (L, C) une fréquence dite de résonance où l'impédance de circuit est très basse. [8]

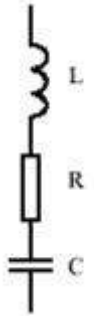


Figure 1.5 : Filtre passif résonnant

De même, leurs inconvénients se résument comme suit :

Le filtrage passif se limite à l'atténuation d'harmoniques d'un rang bien déterminé; ce qui limite son effet, donc cette solution s'avère parfois inactive, à cause de la dérivation de la fréquence de résonance qui est due soit au changement de la structure du réseau ou bien au vieillissement des composants du filtre passif, puis encore cela peut engendrer l'effet inverse à savoir l'amplification des harmoniques, cela peut se traduire par une surintensité ou une surtension; son inadaptabilité nous contraint à concevoir un filtre spécifique pour chaque catégorie de charge selon les harmoniques qu'elles produisent .[8]

I-6-Solutions modernes :

I-6-1- Dépollution des tensions perturbatrices

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension, les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrés. Ces deux dernières sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés. Pour dépolluer les réseaux électriques de ces deux types de perturbation, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de courant.

Quant aux creux de tension, la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux,

sites industriels…etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique.

Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème. [8]

I-6-2- Solutions de dépollution modernes

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées. [8]

I-6-2-1- Dépollution des courants perturbateurs

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive. Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de ***filtres actifs parallèles*** a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courant. [8]

I-6-2-2- Dépollution des tensions perturbatrices

D'autres solutions modernes pour la compensation des creux de tension se basent sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les **ASIs** (Alimentation Sans Interruption) .Ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est la limitation en puissance de ces dispositifs et leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves.

Afin de réaliser une solution flexible universelle de dépollution de toutes les perturbations de tension des réseaux électriques, une famille de ***filtres actifs séries*** a été proposée [8].

I-6-2-3- Solution de dépollution adoptée

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur. [8]

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles que présentent les filtres passifs (non adaptabilité aux variations de la charge et du réseau, apparition des résonances). Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en parallèle (FAP), soit en série (FAS) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les courants ou les tensions harmoniques, soit associé à des filtres passifs pour constituer ce qu'on appel les filtres hybrides. [6]

Les avantages les plus importants des filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants :

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

Pourtant, ils ont aussi quelques inconvénients :

- Leur coût élevé (ce qui a limité leur implantation),
- Les pertes sont plus élevées (puissance fournie pour la compensation).

I-7-1-Filtre actif parallèle :

Un FAP se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant déformé fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal. L'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif .Le schéma de principe d'un FAP est donné par la Fig. I-6. [6]

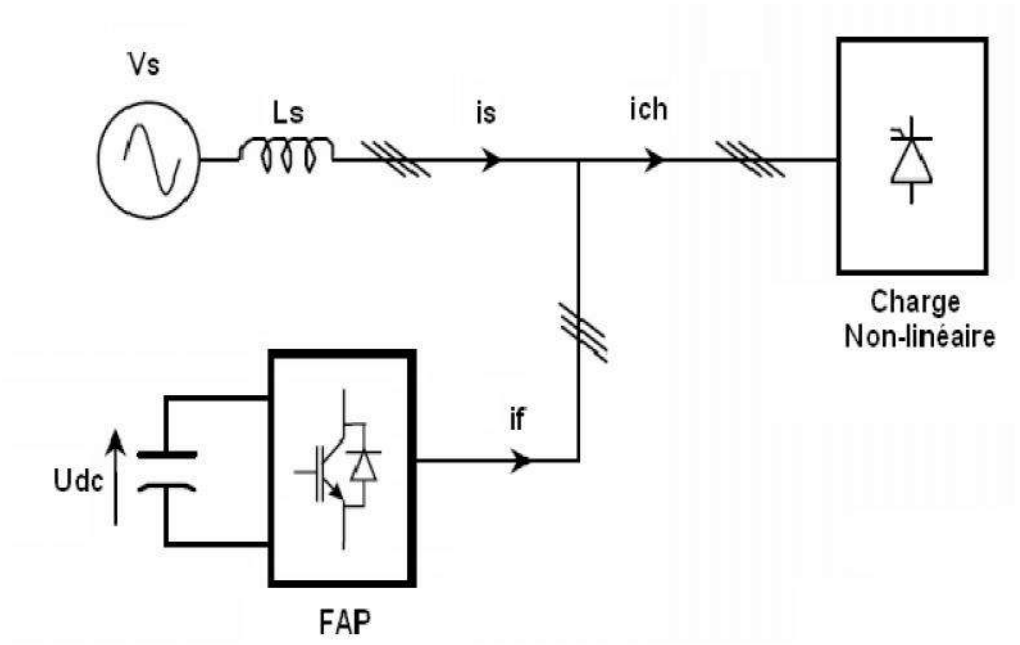


Fig. I-6 : Filtre actif parallèle

.I-7-2- Filtre actif série

La solution moderne la plus flexible qui permet la dépollution des réseaux électriques des perturbations de tension est l'utilisation des filtres actifs séries il se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibre, etc.…) venant de la source et également à celle provoquée par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge (sensible) à protéger est purement sinusoïdale [6]. Le schéma de principe d'un FAS est donné par la Fig. I-7

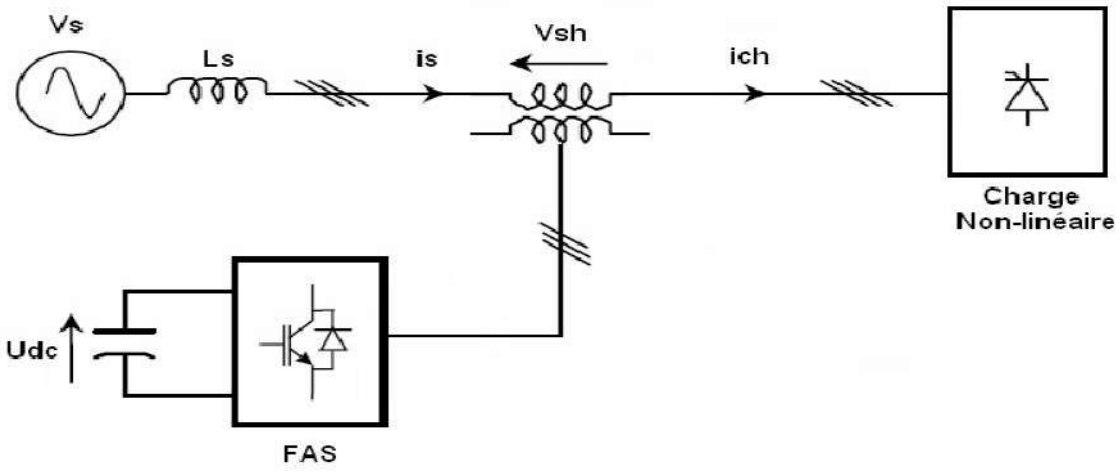


Fig. I-7 Filtre actif série

I-7-3- Combinaison parallèle-série actifs (UPQC) :

D'après ce qui précède, ni le FAP, ni le FAS de puissance ne sont capables d'effectuer un filtrage total, donnant une tension sinusoïdale du côté de la charge et un courant sans harmoniques du côté du réseau. Cet objectif peut être atteint en utilisant un conditionneur d'énergie électrique de puissance communément appelé (Unified Power Quality Conditionner : UPQC) composé de ces deux filtres actifs de puissance comme le montre la Fig. I-8, l'un connecté en série et l'autre en parallèle avec la charge. L'UPQC permet de réaliser simultanément l'isolation harmonique, tension ou courant, entre la source et la charge et la compensation des différents types de perturbations : [8]

Harmoniques de courant et de tension, creux tension, surtension et déséquilibre de tension [6]

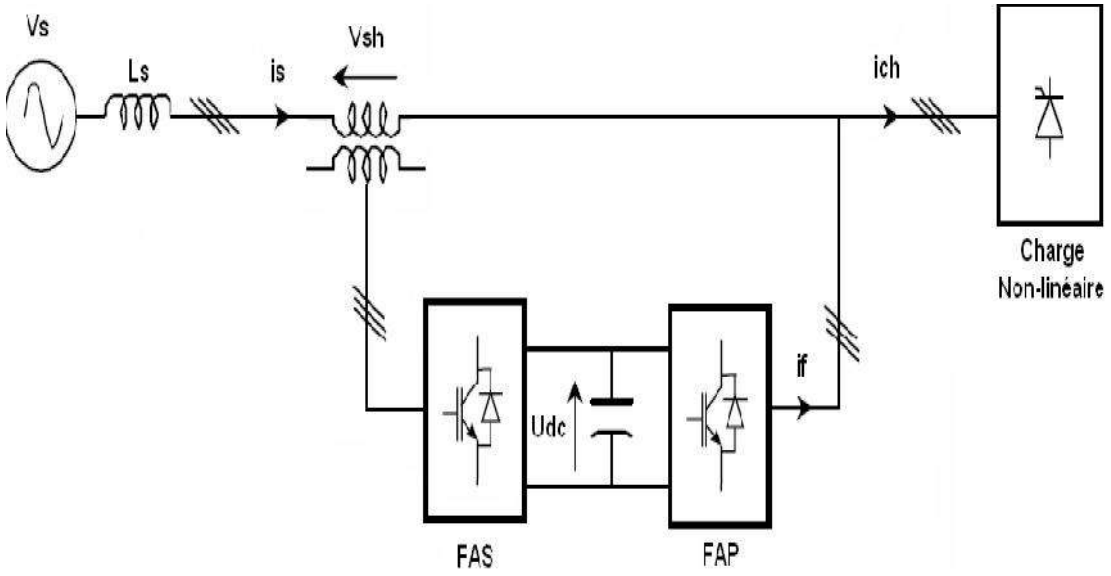


Fig. I-8-Conditionneur actif de puissance UPQC

I-8-Combinaison hybride active et passive :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

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

I-8-1- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles :

Le rôle du ***filtre actif série*** dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la Fig. I.9 [8]

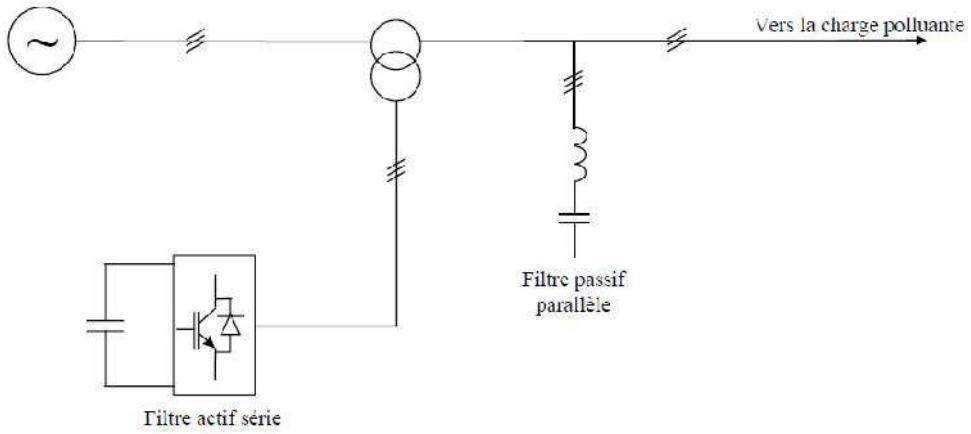


Fig. I.9 : Filtre actif série et filtre passif parallèle

I-8-2- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles :

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en Fig. I.10, est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du ***filtre actif série*** car le courant qui le traverse est plus faible .De plus, le ***filtre actif série*** est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge. [8]

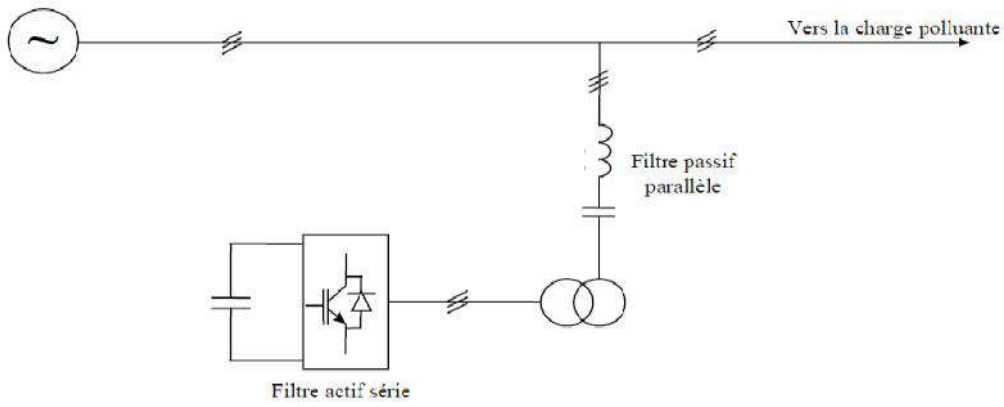


Fig. I-10- : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

I-8-3-Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en Fig. I.11, est la Compensation de courantes harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le ***filtre actif parallèle***.

Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cycloconvertisseur de forte puissance [8].

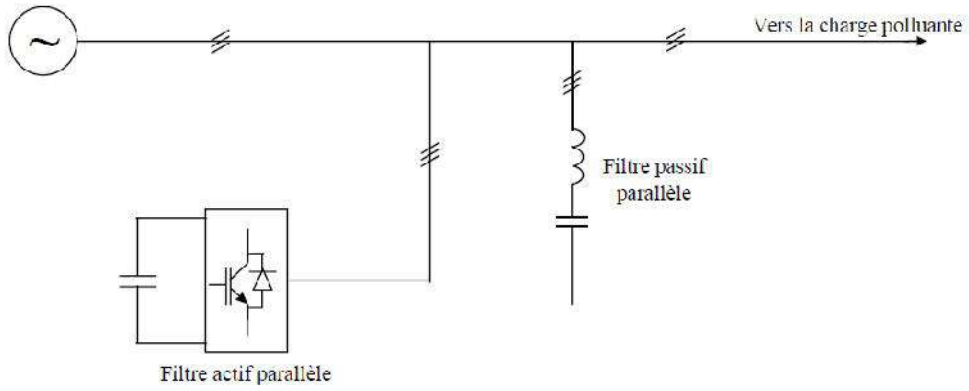


Fig. I-11 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

I-9.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté Qualité de la tension, Qualité du courant harmoniques et inter harmoniques en plus conséquences des harmoniques ensuit les sources, sont étudié Les Séries Fourier des harmoniques et les Solutions traditionnelles de dépollution, Filtre passif parallèle, Filtre passif série, Filtre passif amorti ou passe-haut

Filtre résonant en plus les Solutions modern, Filtres actifs, Filtre actif parallèle et Filtre actif série Combinaison parallèle-sérié actifs (UPQC)

Combinaison hybride active et passive, Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles, Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles, Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle seules les solutions actives de filtrage seront analysées dans ce mémoire.

C'est ainsi que dans l'objectif d'améliorer la qualité de l'énergie électrique qui doit être conforme aux nouvelles contraintes normatives, nous étudierons, dans les chapitres suivants,

des méthodes de régulation avancées que nous appliquerons dans le cas des structures de filtres actifs parallèle, série et combiné.

Chapitre II :

Filtre actif parallèle

II-1 –Introduction :

Pour réduire les harmoniques au niveau de la source nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle, vu ses avantages, tel que l'adaptation aux variations de la charge.
Le filtre actif est un onduleur de tension à MLI qui traité l'élimination des harmoniques. Il doit donc, absorber des courants éliminant les harmoniques crée par le pont redresseur. Cette structure à pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant, l'utilisation des onduleurs pour filtrage actif, suppose l'emploi des fréquences de découpages très supérieure aux fréquences harmoniques que l'on veut éliminer.

II-2-Structure d'un filtre actif parallèle *:*

La structure générale du filtre actif parallèle, est présenté dans la figure (II-1) sous la forme de deux blocs: la partie puissance et la partie contrôle-commande.

- ***La partie puissance est constituée* :**

  - D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, command ables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, etc.…) avec des diodes en antiparallèle.
  - D'un circuit de stockage d'énergie.
  - D'un filtre de sortie.

- ***La parie contrôle-commande est constituée* :**

  - La méthode d'identification des courants perturbés.
  - La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
  - La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
  - La commande de l'onduleur de tension. [9]

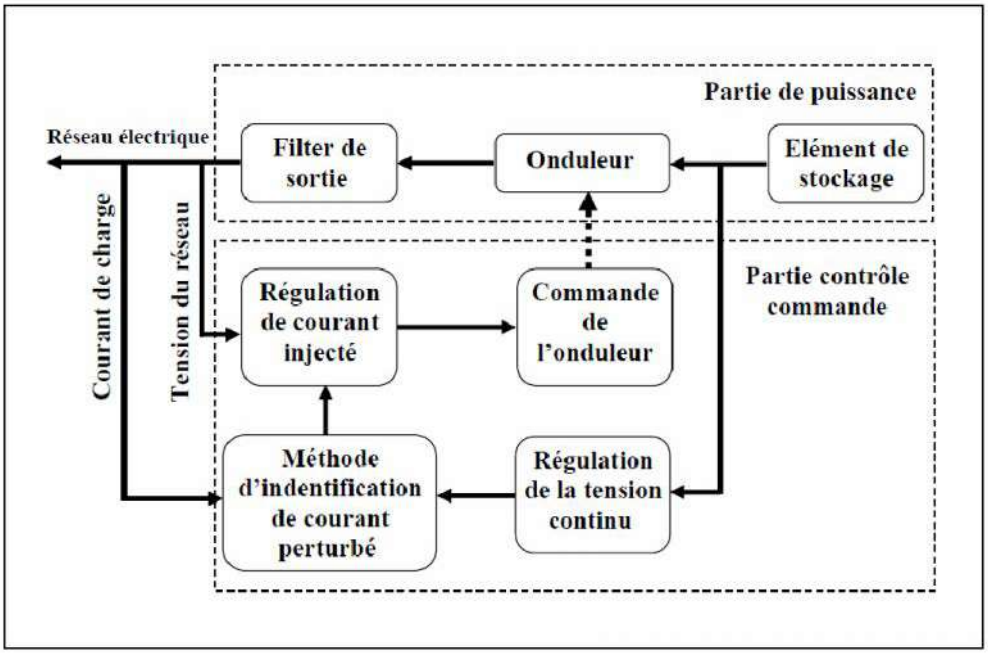


Fig. II-1: Structure générale d'un filtre actif parallèle.

.II-3- Mode de fonctionnement :

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

- ***Filtre dédié :*** Si la charge non linéaire est connue, les courants harmoniques i_{ch} sont calculables à priori. Par conséquent, le courant filtre i_{fa} est connu. La commande du filtre actif est également stationnaire et elle est déterminée à priori pour engendrer i_{fa}. La commande peut donc être dédiée à la charge (cas d'un redresseur alimentant une charge fortement inductive).

  En revanche, l'adaptabilité du filtre actif vis-à-vis des variations de la charge est impossible **[10]**
- ***Filtre adaptatif*** : Ce filtre est capable d'identifier par lui-même les harmoniques et de s'adapter automatiquement à leurs éventuelles évolutions. Sa commande, lui permet de générer en temps réel des courants harmoniques en opposition de phase. **[10]**

II-4- Principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle à structure tension :

Les perturbations en courant et en tension des réseaux électriques de distribution ont pour origine la prolifération des charges non linéaires qui y sont connectées. Parmi ces charges non linéaires, on peut notamment citer les convertisseurs statiques (redresseurs, onduleurs, gradateurs, etc.), le matériel informatique, les appareils de climatisation ou bien encore les systèmes d'éclairage à base de tubes fluorescents. Ces charges non linéaires absorbent des

courants non sinusoïdaux et sont à l'origine des pollutions harmoniques. Les courants harmoniques absorbés par ces charges circulent à travers les réseaux électriques et perturbent sérieusement le fonctionnement de certains équipements électriques, pouvant même conduire à leur destruction.

Le FAP est constitué principalement d'un convertisseur statique à base de semi-conducteurs de puissance commandé par un système de contrôle approprié. Il peut être assimilé à une source de courant qui compense en temps réel les courants harmoniques en injectant au niveau du point de raccordement des courants en opposition de phase avec les perturbations harmoniques identifiées.

Dans le cas ou l'élément de stockage est un condensateur le FAP est dit à structure tension et dans le cas ou l'élément de stockage est réalisé par une inductance, le FAP est nommé à structure courant. Toutefois, les FAPs à structure tension sont plus fréquemment mis en œuvre dans les applications industrielles pour la simplicité de leur commande, leur coût limité et leur taille physique réduite. [6]

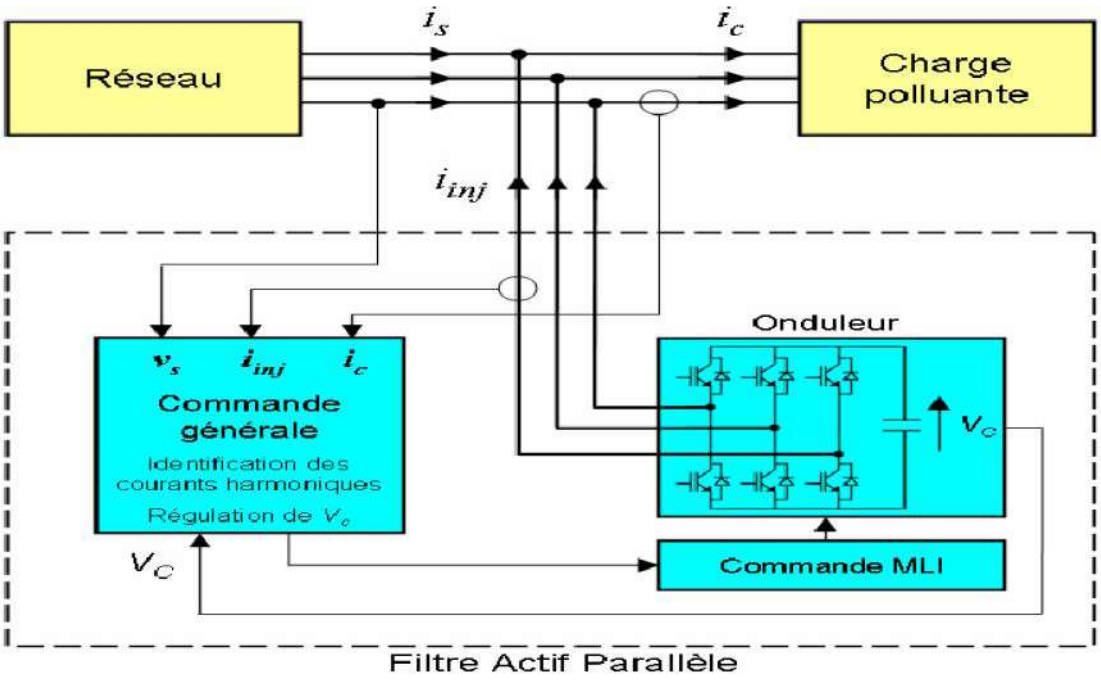


Fig. II-2. Schéma de principe d'un FAP à structure tension

II-5-Stratégies de Contrôle du Filtre Actif Parallèle à structure Tension

II.5.1 Identification des courants harmoniques

La qualité de la compensation des harmoniques de courant dépend fortement des performances de la méthode d'identification choisie. En effet, un système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer un filtrage satisfaisant si les courants harmoniques sont mal identifiés. Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature. Elles peuvent être regroupées selon deux approches. [6]

- ✓ ***Identification dans le domaine fréquentiel :***

Les méthodes permettant l'identification des courants harmoniques dans le domaine fréquentiel sont principalement basés sur l'analyse de Fourier appliquée aux grandeurs déformées (courants ou tensions) afin d'en extraire les signaux de compensation. En utilisant la transformée de Fourier, les composantes harmoniques de compensation sont d'abord séparées des signaux harmoniques polluants et sont ensuite combinées pour générer les consignes. La fréquence de commutation des semi-conducteurs du filtre actif est généralement maintenue plus grande que deux fois la plus élevée des fréquences harmoniques dans l'objectif d'avoir une compensation effective . Ces méthodes sont bien adaptées aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Par ailleurs, elles ont l'avantage d'identifier les harmoniques individuellement : elles permettent donc une compensation sélective.

Il est à noter que l'application on-line de la transformée de Fourier nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques d'où il en résulte un temps de réponse relativement lent. [6]

- ✓ ***Identification dans le domaine temporel.***

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes fréquentielles. Le principe de ce type de méthodes est la séparation du fondamental ou de certains harmoniques du reste des harmoniques par le filtrage. Les méthodes les plus importantes sont:

- ❖ ***Méthode des puissances active et réactive instantanées PQ***

L'extraction des harmoniques est réalisée à partir de la puissance instantanée calculée en repère fixe, en utilisant la transformée de Concordia [6]

Ainsi, les puissances sont décomposées en une composante continue, liée au fondamental, et en une composante alternative, liée aux harmoniques, qui peuvent être séparées en utilisant un filtre passe-haut. Une PLL. Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants

❖ ***Méthode du référentiel lié au synchronisme SRF***

Cette méthode repose sur la transformée de Park et elle est basée essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par identifiés erronés **[6]**

❖ ***Méthode de détection synchrone des courants de référence***

Cette méthode repose sur la génération des courants de référence synchrone avec les trois tensions de la source .Elle ne nécessite pas une PLL et permet d'obtenir d'excellentes performances en particulier dans le cas ou la tension réseau n'est pas perturbée. **[**6**]**

❖ ***Méthode du courant instantané dq***

Le courant de charge est transformé dans un repère tournant en utilisant la transformée de Park Les courants obtenus sont composés d'une composante continue, liée au fondamental, et une composante alternative, liée aux harmoniques, qui peuvent être séparées en utilisant un filtre passe-haut ou un filtre passe-bas. La séparation entre la composante fondamentale et les harmoniques devra être réalisée avec le minimum d'atténuation et de déphasage possible des harmoniques identifiés. Pour cela un filtre d'ordre élevé est souhaité. Cependant, ce type de filtre est difficile à implanter en pratique. Ainsi, un choix simple peut être utilisé consistant à un filtre passe-haut de type Butterworth du 2ème ordre avec une fréquence de coupure de 10Hz**. [6]**

II.5.1.1 Méthode des puissances active et réactive instantanées

La méthode des puissances instantanées a été introduite par H. Akagi. Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, à un système diphasé (α-β) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. Ensuite, pour déterminer les courants harmoniques de la charge, la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Dans la méthode classique des puissances instantanées on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passe bas afin de ne garder que la composante harmonique du signal. Le schéma bloc relatif à cette méthode est représenté par la Fig. II.3

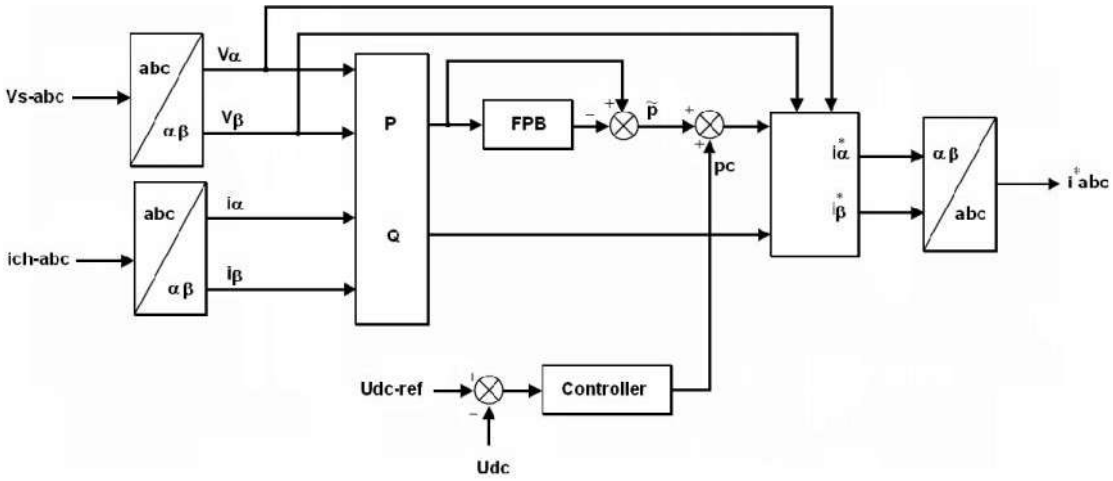


Fig. 3- Méthode d'identification des puissances active et réactive instantanées

Notons, respectivement, les tensions simples d'alimentations et les courants de charge d'un système triphasé équilibré par (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}) et $(i_{cha}, i_{chb}, i_{chc})$. La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé dont les axes sont en quadrature. Cette transformation appliquée aux tensions réseau et aux courants de ligne mène aux expressions suivantes : [11]

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

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{cha} \\ i_{cha} \end{bmatrix} \quad \text{(II.2)}$$

La puissance active instantanée p et la puissance réactive instantanée q sont définies par:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} \quad \text{(II.3)}$$

Les puissances active et réactive instantanées peuvent s'écrire comme la somme d'une composante continue et d'une composante harmonique :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} & + & \tilde{p} \\ \bar{q} & + & \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{(II.4)}$$

Avec : $\bar{p}$ et $\bar{q}$ les composantes continues de p et q, et $\tilde{p}$et$\tilde{q}$ les composantes harmoniques de p et q.

A partir de l'équation (II.3), nous pouvons déduire les expressions des composantes du courant de charge selon les axes $\alpha\beta$:

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{{v_\alpha}^2 + {v_\beta}^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad \text{(II.5)}$$

Le remplacement de (II.4) dans (II.5) donne les expressions des courants i_α et i_β selon les axes αβ:

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{{v_\alpha}^2 + {v_\beta}^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{{v_\alpha}^2 + {v_\beta}^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{(II.6)}$$

Puisque nous intéressons à la compensation simultanée des harmoniques de courant et de l'énergie réactive, dans ce cas nous éliminons alors la composante continue de p à l'aide d'un simple FPB et on ajoute la puissance active pc récessaire à la régulation de la tension continue U_{dc} à la composante harmonique de la puissance active instantanée. Les courants perturbateurs de référence, notés $i_{\alpha-ref}$ et $i_{\beta-ref}$, s'expriment selon les axes αβ:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{{v_\alpha}^2 + {v_\beta}^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + pc \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{(II.7)}$$

Les courants perturbateurs de référence selon les axes (abc) peuvent être déterminés en utilisant la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{a-ref} \\ i_{b-ref} \\ i_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} \quad \text{(II.8)}$$

II-5-1-2-Méthode du référentiel lié au synchronisme

Cette méthode à l'avantage d'être insensible aux distorsions qui peuvent avoir lieu dans la tension d'alimentation. En effet, les courants de référence sont obtenus directement à partir des courants de la charge polluante sans être affectée ni par les distorsions, ni par les déséquilibres présents dans les tensions de source. Ceci renforce la robustesse et la performance du processus de compensation. Cependant, une transformation du plan (α-β) vers le référentiel (d-q) des signaux en sinus et cosinus synchronisés avec les tensions simples du réseau est indispensable, ces derniers sont créés en utilisant une boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop).

La transformation de Concordia appliquée aux courants de charge ($i_{cha}, i_{chb}, i_{chc}$) permet de transformer le système triphasé équilibré à un système diphasé dont les axes sont en quadrature : [6]

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.9)}$$

L'expression des courants i_d et i_q dans le référentiel (d-q) sont données par:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{(II.10)}$$

Avec $\hat{\theta}$ est la position angulaire de la tension fondamentale du réseau, estimée par la PLL. Ces composantes peuvent alors être exprimées comme la somme d'une composante continue et d'une composante harmonique :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\imath}_d & \tilde{\imath}_d \\ \bar{\imath}_q & \tilde{\imath}_q \end{bmatrix} \quad \text{(II.11)}$$

Avec $\bar{\imath}_d$ et $\bar{\imath}_q$ sont les composantes continues de i_d et i_q, et $\tilde{\imath}_d$ et $\tilde{\imath}_q$ sont les composantes alternatives de i_d et i_q. A partir de l'équation (II.10), nous pouvons exprimer les composantes du courant selon les axes (α-β) par :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad \text{(II.12)}$$

En séparant les composantes continues des composantes harmoniques, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\imath}_d \\ \bar{\imath}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\imath}_d \\ \tilde{\imath}_q \end{bmatrix} \quad \text{(II.13)}$$

Les expressions des courants de référence $i_{\alpha-ref}$ et $i_{\beta-ref}$ sont donnés par:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{\imath}_d & + & \tilde{\imath}_{dc} \\ & \tilde{\imath}_q & \end{bmatrix} \quad \text{(II.14)}$$

Les courants de référence dans le repère (abc) sont donnés par:

$$\begin{bmatrix} i_{a-ref} \\ i_{b-ref} \\ i_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha-ref} \\ i_{\beta-ref} \end{bmatrix} \quad \text{(II.15)}$$

Le schéma de principe de la méthode référentiel synchrone est donné par la Fig. II-3

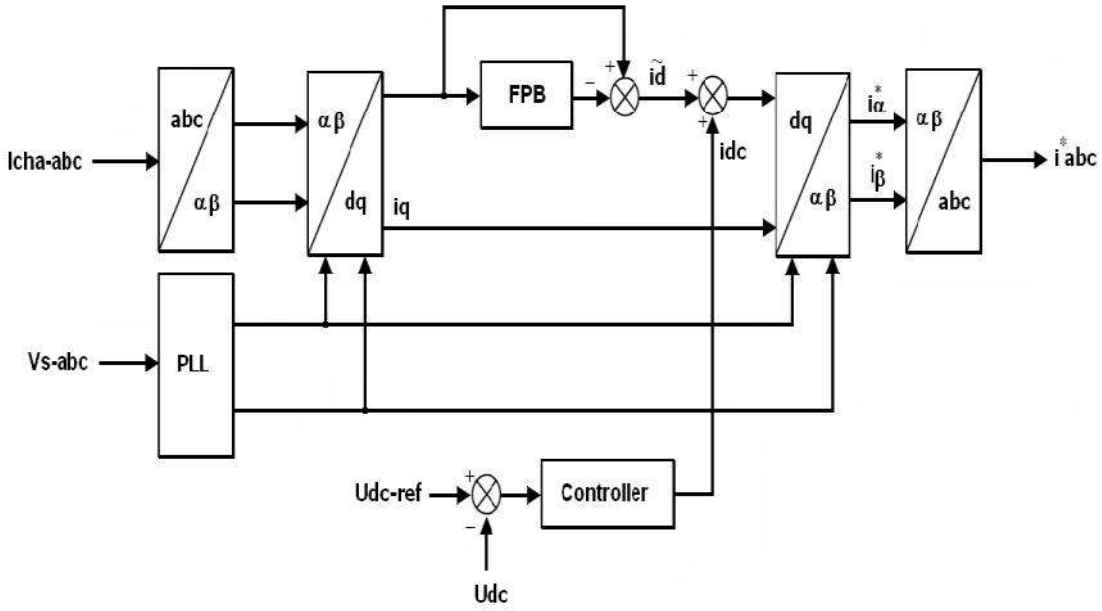


Fig. 3- Méthode du référentiel lié au synchronisme

II.5.2 Contrôleur des courants de référence

Les performances de compensation d'un filtre actif avec réduction du THD de la courante source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la technique du contrôle des courants de référence (poursuite des courants de références). Deux approches de contrôle sont couramment mises en œuvre, à savoir :

- ✓ Le contrôle direct basé sur la comparaison du courant de référence avec le courant réel injecté par le filtre actif.
- ✓ Le contrôle indirect basé sur la comparaison du courant de référence avec la courante source.

II.5.2.1 Contrôle par hystérésis fixe

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée, elle est caractérisée par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. Cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. Son principe consiste en l'élaboration d'un signal erreur qui est la différence entre le courant de référence et le courant produit par le convertisseur du

FAP. Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un nouvel ordre de commande est envoyé aux semi-conducteurs de manière à maintenir le courant réel à l'intérieur de la bande. Le contrôle du courant par hystérésis est simple à mettre en oeuvre et donne de bons résultats en régulation puisqu'on n'a ni erreur statique, ni erreur de poursuite. La commande est robuste vis à vis des paramètres du système et présente de bonnes dynamiques en régime transitoire. La bande permet de limiter l'amplitude des oscillations du courant de sortie. Cependant, la fréquence de commutation obtenue est variable, ce qui permet certes d'étaler le spectre du signal de sortie, mais sans aucun contrôle de ce dernier. En effet, lors de perturbations ou de variations de la référence, des commutations à fréquences plus élevées peuvent alors être provoquées. La bande est généralement calculée pour limiter cette fréquence sans cependant tenir compte de ce type de problème. Dans le cas d'un convertisseur de tension deux niveaux la technique de contrôle par modulation à hystérésis fixe peut être formulée de la façon suivante

- Si $i_f < i_{fref-HB}$: l'interrupteur supérieur est ouvert et l'interrupteur inferieure est fermé.
- Si $i_f > i_{fref+HB}$: l'interrupteur supérieur est fermé et l'interrupteur inferieure est ouvert.

Le bloc simulink permettant la génération des signaux de commande du convertisseur de tension deux niveaux dans ce cas est donné par la Fig. II-4. [6]

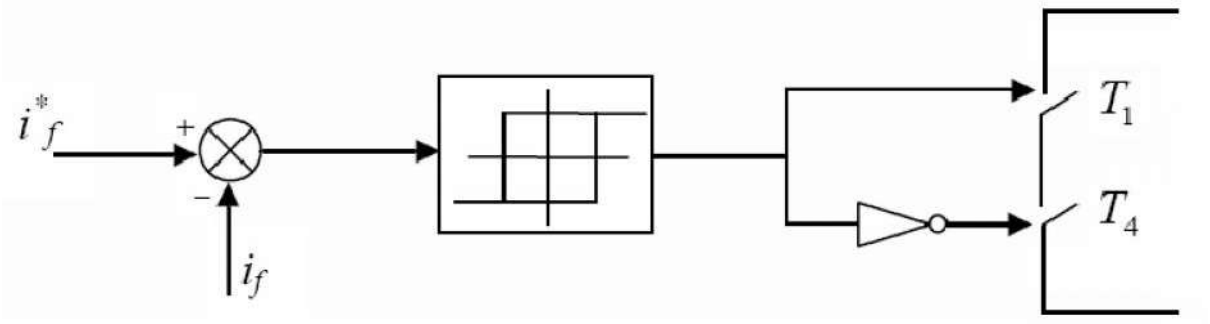


Fig. 4- Commande par hystérésis

II-6-La modélisation du filtre actif parallèle :

La modélisation du filtre actif parallèle consiste à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement. Nous pouvons procéder comme suit : soit V_{dc} la tension aux bornes de la source flottante C., que nous la considèrerons constante.

La figure II-5 donne le schéma synoptique d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux avec filtre (L_f, R_f) sans neutre raccordé. [10]

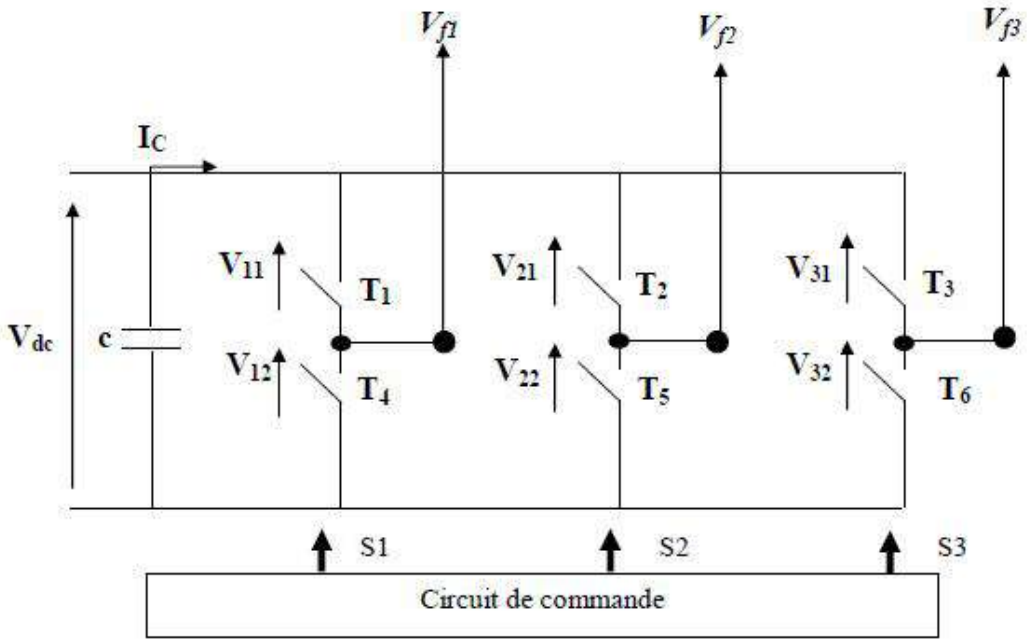


Fig. II-5- Représentation schématique d'un onduleur triphasé

II.7. Filtre actif parallèle à base d'un convertisseur de tension deux niveaux

II.7.1. Commande d'un FAP en utilisant la stratégie SRF à base d'un contrôleur à hystérésis

Le schéma bloc du FAP branché en parallèle à un réseau d'alimentation triphasé trois fils alimentant une charge non linéaire composée d'un pont complet à diodes et d'une chargeR_{ch}, L_{ch} est donné par la Fig. II-6. **[6]**

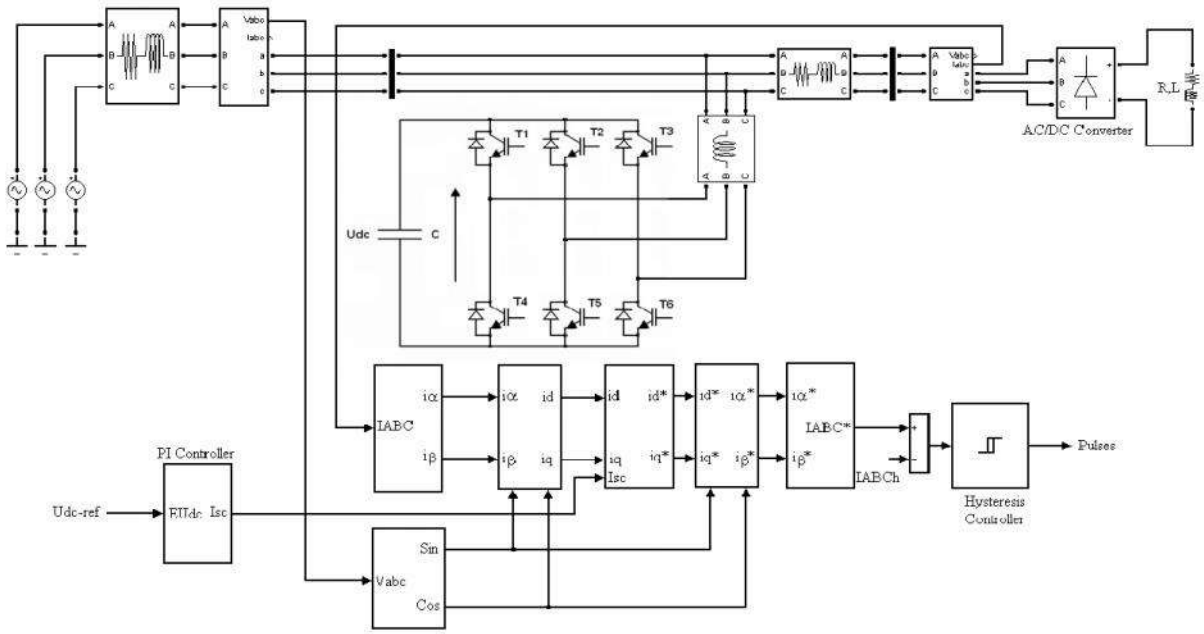
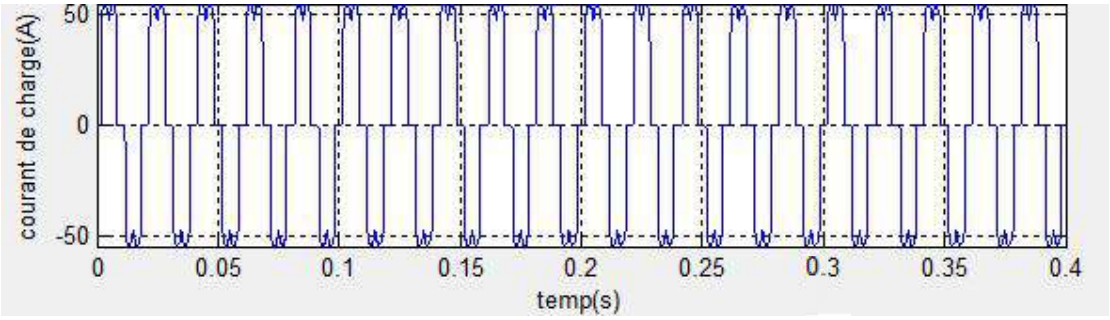


Fig. II-6. Schéma bloc du FAP-SRF-Contrôleur à hystérésis

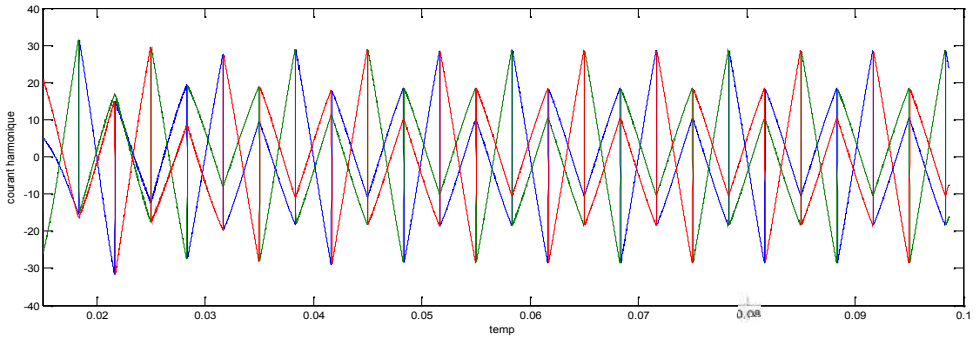
Les paramètres du système lors de la simulation sont fixés comme suit :

- Bande d'hystérésis Δ_i= 0.01 A,
- Tension continue de référence U_{dc-ref}= 700V.

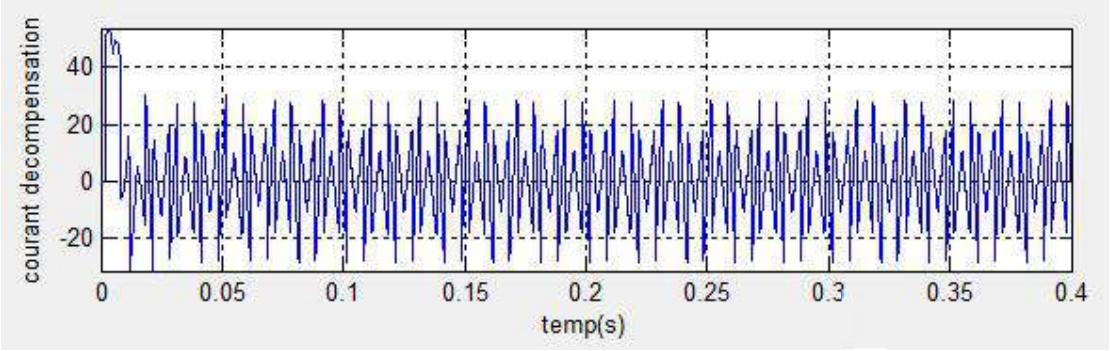
II-8-Résultat de simulation et interprétation de filtre actif parallèle :



(d) Courant de charge avant la compensationi_{ch}(A)



(b)- Courant harmonique fournit par le filtre i_{fabc}(A)



(f) Courant harmonique fournit par le filtre i_{fa} (A)

Fig. II-7. **a**-Courant de charge avant la compensationi_{ch}(A), **b-** Courant harmonique fournit par le filtre i_{fabc}(A), **c-** Courant harmonique fournit par le filtre i_{fa} (A)

Après application du filtre actif parallèle, on enregistre une nette amélioration dans l'allure du courant charge, comme illustré à la Fig. II-7. Le fait que la courante source après compensation ait une forme sinusoïdale prouve que le filtre actif génère un couranti_{fa}, comme le montre la Fg. II-8.

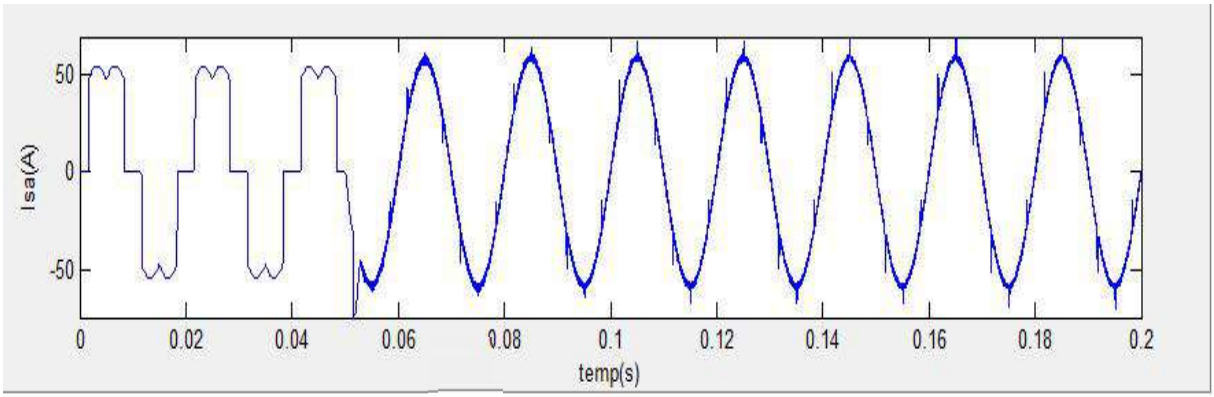
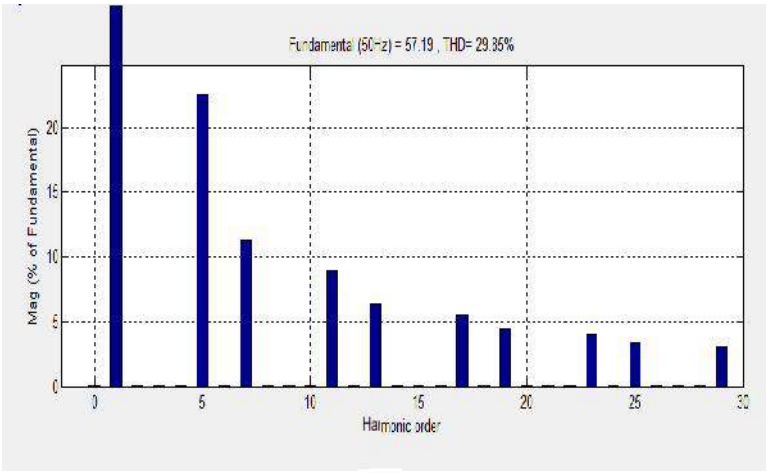
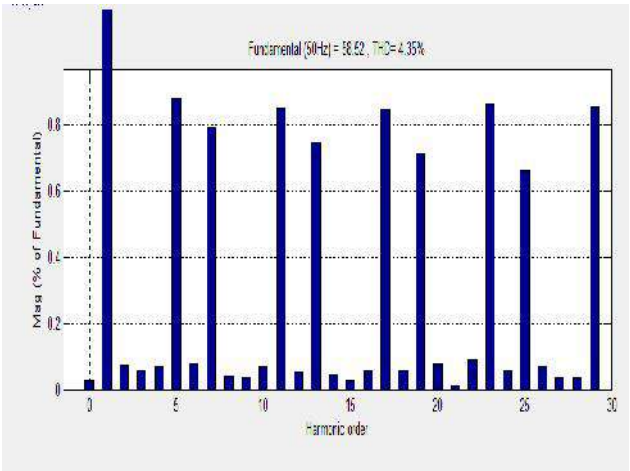


Fig. II-8. Courants de source i_{sa}(A) avant et après compensation



a)Spectre harmonique du courant de source i_{sa}(A) avant compensation (THDi=29.85)



b) Spectre harmonique du courant de source isa(A) avant compensation (THDi=4.36)

II-8-Les avantages et les inconvénients des filtres actifs parallèles :

Le filtre actif parallèle peut-être une solution de filtrage économique pour la compensation d'harmonique sous les conditions suivantes :

- L'amplitude des harmoniques de courant est limitée.
- Il y a un déplacement des contraintes du facteur de puissance sous des conditions de charges légères.
- Si les interactions avec le filtre passif sont un problème (ce qui est généralement le cas pour les charges de puissances moyennes et faibles) sinon le filtre passif est plus approprié.
- Pour les charges industrielles de puissances apparentes faibles et moyennes, où les efforts de développement et les coûts d'installation sont une très grosse part des coûts globaux du système final. [13]

Les avantages des filtres actifs parallèles sont les suivants :

- Ils peuvent être installés avec des coûts de développement et d'installation minimaux et sont très bien adaptés aux charges industrielles de puissances apparentes faibles à moyennes.
- Ils ne créent aucun problème de déplacement du facteur de puissance.
- Ils ne nécessitent pas de condensateurs de découplage à la sortie de l'onduleur.
- Plusieurs filtres peuvent être utilisés pour augmenter les capacités de charge.
- Les filtres actifs parallèles ne nécessitent pas d'appareil de protection coûteux.

Les principaux défauts des filtres actifs parallèles sont :

- Les filtres actifs parallèles peuvent poser des problèmes pour la compensation à des niveaux de puissances élevés.
- Les onduleurs MLI génèrent des harmoniques qui peuvent circuler dans des filtres passifs qui seraient connectés au système.

Ainsi pour cette étude c'est le FAP qui a été retenu car il répond principalement à la problématique des harmoniques de courant qui est la plus cruciale actuellement, tout en restant simple à mettre en œuvre et offre de très bonnes performances.

En effet le FAP est au centre des recherches des deux dernières décennies sur le filtrage actif et les références traitant de FAP sont extrêmement nombreuses, en particulier sur les sources telles que la revue IEEE et sa publication dédiée à l'électronique industrielle.

Il est également évolutif et permet d'implémenter de nouvelles stratégies à partir de la même structure matérielle. [14]

II-9- Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons considéré particulièrement la compensation des harmoniques des courants à l'aide d'un filtre actif parallèle.

Dans la première partie, nous avons introduit les notions sur la structure générale d'un tel filtre. Puisque l'élément essentiel de sa constitution étant la présence d'un onduleur, nous avons alors, présenté une étude sur son modèle.

Dans la deuxième partie, nous avons validé notre étude par une simulation numérique.

L'analyse temporaire et fréquentielle des grandeurs courantes avant et après compensation montrent l'intérêt de l'utilisation du filtre actif parallèle dans la compensation des courants perturbés.

Chapitre III :

Filtre actif sérié

III.1-Introduction :

En vue de dépolluer le réseau électrique et de maintenir la tension sinusoïdale, aux bornes de la charge quelque soit le courant absorbé par celle-ci; on doit compenser les harmoniques.

Cependant, l'objectif de l'étude de ce chapitre est l'amélioration des performances de la compensation des harmoniques de la tension à partir d'une structure de ***filtre actif série*** (FAS). Ainsi, dans un premier temps, nous étudierons la structure générale et le principe de compensation du filtre actif série. Puis, dans un second temps, nous monterons la validation de la structure adaptée à travers plusieurs essais de simulation.

III.2- Filtre actif série :

Le filtrage actif série est une solution pour protéger les charges sensibles contre les Perturbations de tension du réseau électrique. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions (v_{fa}) s'opposant aux tensions harmoniques (v_{sh}) venant du coté source et à la chute de tension harmonique (z_S i_{dh}). Le circuit du filtre actif série, illustré par la figure 1, joue le rôle d'une compensation de tension. [10]

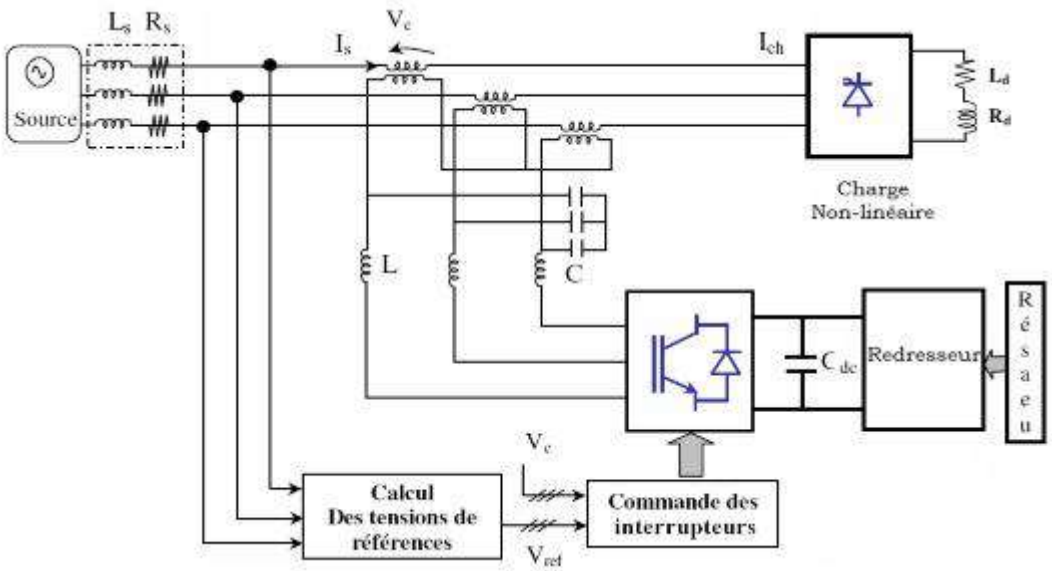


Fig. III.1. Principe du filtre actif série

III.3. Structure générale du filtre actif série :

Plusieurs structures du filtre actif série ont été proposées dans la littérature [8]. La plus utilisée est présentée sur la figure 2. Cette structure, est composée d'une **partie puissance** et d'une partie **contrôle commande**.

Le filtre actif série s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension.

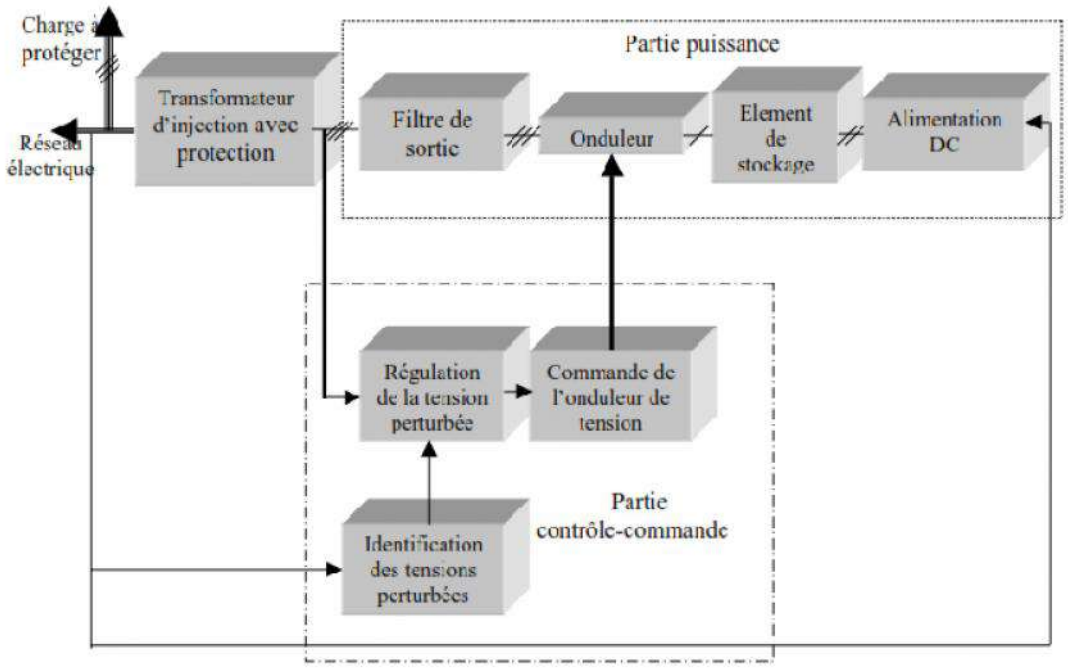


Fig.III.2 Structure générale du filtre actif série

III-3-1-Partie puissance :

Dans cette partie, on va détailler les éléments constitutifs du FAS. Nous commencerons par l'étude de l'onduleur en passant par le filtre de sortie et nous terminerons par les transformateurs d'injection de tension.

III.3.1.1 Onduleur de tension :

L'onduleur de tension réalise l'interface entre deux types de sources :

- Source de courant du coté alternatif;
- Source de tension du coté continu

La présence de ces sources impose le respect des règles de fonctionnement suivantes:

- La source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit pas être court-circuitée, par

conséquent deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandés d'une manière complémentaire. [8]

La source de courant coté alternatif ne doit pas être en court-circuit, d'où la mises-en antiparallèle de diodes avec les interrupteurs.

L'onduleur de tension (figure 3) se compose de six interrupteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, GTO), repartis d'une façon symétrique sur trois bras, montés avec des en antiparallèle avec des diodes. [10]

III.3.1.2 Système de stockage de l'énergie :

Le choix d'un système de stockage à deux condensateurs (C_{dc1}, C_{dc2}) avec un point milieu, comme le montre la figure 3, permet d'assurer aux bornes des condensateurs, une tension continu v_{dc} sans fluctuation. Cela permet aux trois phases du filtre actif série de fonctionner indépendamment, ce choix dans le cas de l'utilisation du filtre actif parallèle aurait dégradé la dynamique. En effet, un système de stockage sans point milieu permet d'avoir une tension maximale à la sortie de l'onduleur d'une valeur de $v_f = 2 \cdot v_{dc}/3$, d'une valeur maximale de $v_{dc}/2$ mais dans le cas d'une structure avec un point mílíeu. [10]

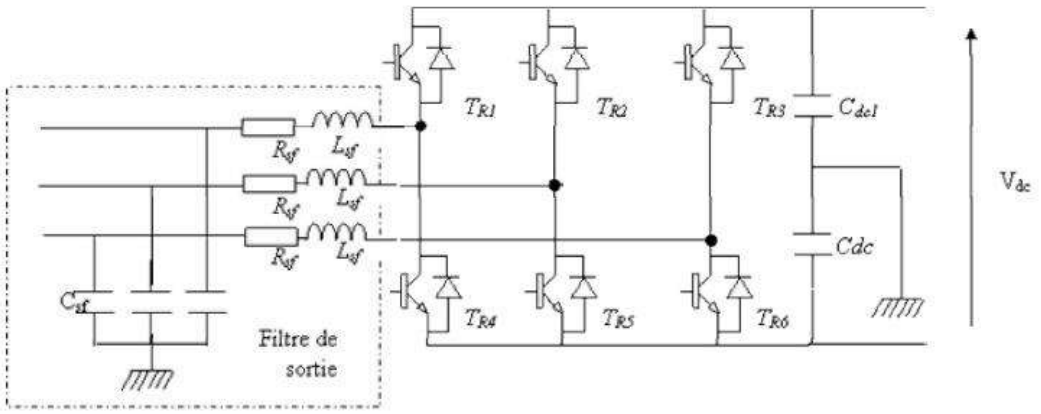


Fig.III.3 Partie puissance du filtre actif série

III.3.1.3 filtre de sortie :

Le filtre de sortie d'un filtre actif série est généralement un filtre passif du deuxième ordre (R_f, L_f, C_f) comme le montre les figures3 et 4. L'ensemble onduleur et filtre de sortie se comportent comme une source de tension où le filtre de sortie sert à atténuer les composantes dues aux commutations de l'onduleur [8], d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique de distribution [10]

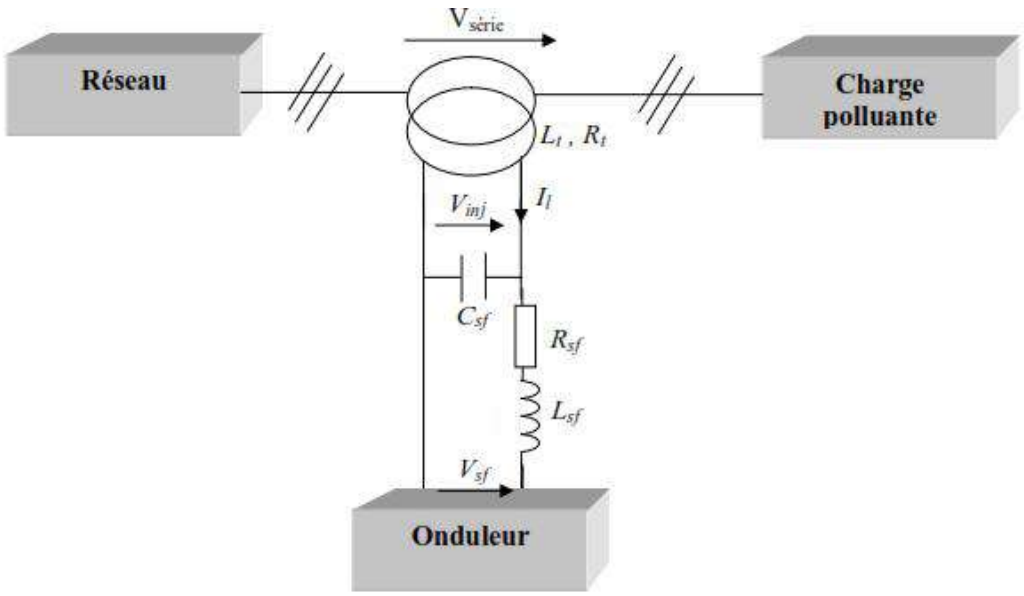


Fig. III.4- Schéma du filtre de sortie pour un FAS

III.3.2.1Modélisation du filtre de sortie :

A partir de la figure 4, on obtient :

$$V_{inj}(s) = \frac{B_1(s)}{A(s)} V_{sf}(s) + \frac{B_2(s)}{A(s)} i_l(s) \qquad \text{(III.1)}$$

Où

V_{sf}: La tension de sortie de l'onduleur C ;

V_{inj}: La tension aux bornes du condensateur;

i_l: Courant de la charge à protéger.

Et,

$\frac{B1(S)}{A(S)}$: Fonction du transfert du filtre de sortie du système d'origine.

$\frac{B2(S)}{A(S)}$: Fonction du transfert du modèle de perturbation.

Ces perturbations sont causées par le passage du courant de la charge à protégeri_l.

Avec,

Et :

$$\begin{cases} A(s) = a_1 s^2 + a_2 s + a_3 \\ B_1(s) = b_0 \\ B_2(s) = b_{21} s + b_{21} s \end{cases} \qquad \text{(III.2}$$

Où

$$\begin{cases} a_1 = L_{sf} \cdot C_{sf} \\ a_2 = R_{sf} \cdot C_{sf} \\ a_3 = 1 \\ b_0 = 1 \\ b_{21} = L_{sf} \\ b_{22} = R_{sf} \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

La fréquence de résonnasse du système d'origine est donnée par la relation suivante :

$$f_{cr} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{sf}C_{sf}}} \quad \text{(III.4)}$$

Et, le facteur de qualité est donné par l'équation

$$Q = \frac{1}{R_{sf}}\sqrt{\frac{L_{sf}}{C_{sf}}} \quad \textit{(III.5)}$$

Donc on doit dimensionner le filtre de sortie pour empêcher les composantes dues à la fréquence de commutation de se propager sur le réseau électrique. [8]

III.3.2.2 Transformateurs d'injection :

Les transformateurs d'injection (l_t, R_t) en série avec le réseau électrique permettent d'injecter avec le taux de transformation souhaité la tension produite par l'onduleur. Ces transformateurs, considérés comme des transformateurs de courant [10], permettent

Grâce à leurs caractéristiques magnétiques de saturation ces transformateurs contribuent à la protection du filtre actif série contre les défauts côté charge [6]

Les désavantages dus à l'emploi de ces transformateurs, sont leurs coûts élevés et leurs chutes de tension causées par leurs inductances de fuite (L_t, R_t) .Pour palier à cet inconvénient, un filtre actif série à base d'un onduleur multicellulaire et un seul bus continu a été proposé.

Dans notre travail, on utilise trois transformateurs d'injection de tension à taux de transformation unitaire, dimensionnés pour supporter le courant de la charge et la tension maximale injectée au réseau électrique. [10]

III.3.2.3. Partie contrôle commande :

Les éléments principaux de la partie contrôle et commande du filtre actif série sont :

- La commande de l'onduleur;
- La méthode d'identification des tensions perturbatrices appropriées;
- La régulation des tensions injectées au réseau électrique.

III.3.2.3.1. Commande de l'onduleur :

Les deux principaux types de commande des onduleurs sont :

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

a- Commande en MLI :

Elle consiste à comparer une onde modulatrice de référence (V) avec une onde porteuse triangulaire (V_p) comme le montre la figure 5.

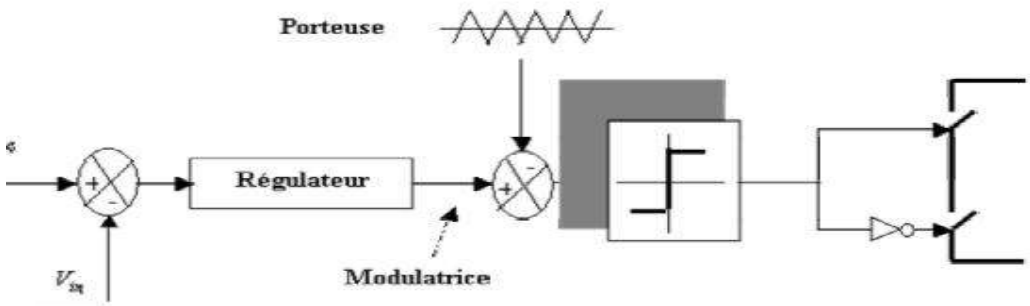


Fig. III. 5. Principe de la commande MLI

La tension de sortie de l'onduleur V_{sf} est égale à :

$$\begin{cases} V_{sf} = KV_{entrée} \\ K = \frac{V_{dc}}{2 \cdot V_p} \end{cases} \quad \text{(III.6)}$$

Avec :

V_p : La valeur crête de la tension de la porteuse ;

V_{dc} : La valeur crête de la tension continue à l'entrée de l'onduleur.

b- Commande à hystérésis :

C'est une commande non linéaire qui utilise l'erreur entre la tension de référence et la tension produite à la sortie du filtre de l'onduleur (figure 5). Cette erreur est comparée à la bande d'hystérésis. Ainsi, dés que l'erreur atteint le minimum ou le maximum de la bande, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. [10]

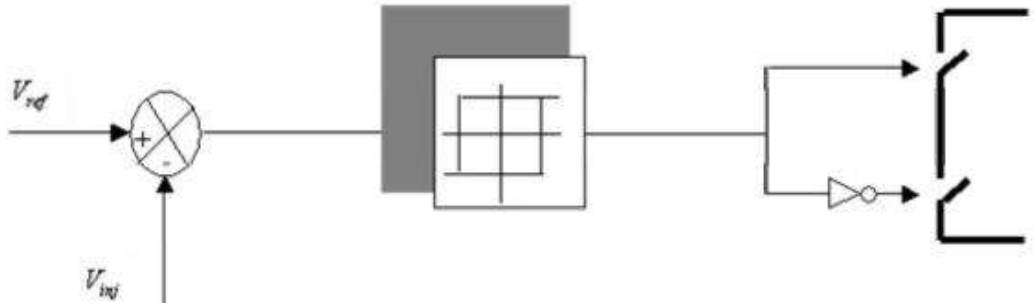


Fig. III.6 Principe de commande par hystérésis

III.4- Stratégies de contrôle d'un Filtre Actif Série à structure Tension

Afin d'identifier les tensions perturbatrices de la composante fondamentale directe de la tension du réseau électrique, plusieurs méthodes ont été étudiées .Parmi elles, les méthodes basées sur le calcul des composantes symétriques, méthodes basées sur le calcul des perturbations dans le repère (d, q). Dans cette partie, nous allons décrire les principales méthodes d'identification des tensions de compensation nécessaire au bon fonctionnement d'un filtre actif série. [6]

III.4.1.Méthode basée sur le calcul des composantes symétriques :

Cette méthode est basée sur le calcul des composantes symétriques de la tension du réseau électrique. Les tensions composées d'un réseau électrique en montage triangle sont données par l'équation suivante :

$$[V_{abc}] = [V_{ab}V_{bc}V_{ca}]^T \quad \text{(III.7)}$$

Ces tensions peuvent être décomposées en trois séquences positives (V_p) (appelées directes), négatives (V_n) (appelées inverses) et homopolaires (V_o), comme le décrit l'équation (III-8):

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad \text{(III.8)}$$

$\alpha = e^{j120}$

Considérant que le réseau étudié est composé de trois fils, les composantes homopolaires V_o deviennent nulles. Afin de calculer la composante négative, le premier paramètre de compensation doit être défini. Il s'agit du facteur négatifU_n, appelé aussi taux inverse, qui est le rapport entre les composantes négative et positive de tension :

$$U_n = \frac{V_n}{V_p} \quad \text{(III.9)}$$

Afin de calculer la composante positive nécessaire pour réguler la tension de la charge à protéger, le deuxième paramètre de compensation doit être défini. Il s'agit du facteur d'amplitude M_p qui est le rapport entre la composante positive et la tension de référence: V_{d-des}

$$M_p = \frac{V_p}{V_{d-des}} \quad \text{(III.10)}$$

Les tensions composées nécessaires pour compenser les tensions négatives sont :

$$[U_c] = -V_n.[T_n] \quad \text{(III.11)}$$

$$[T_n] = [1 \quad \alpha \quad \alpha^2]^T \quad \text{(III.12)}$$

En reportant les valeurs de V_n et V_p des équations (III-9) et (III-10) dans l'expression (III-11) on obtient:

$$[U_c] = -U_n.M_p[T_n] \quad \text{(III.13)}$$

Les tensions négatives simples (V_n1, 2,3) peuvent être obtenues par l'équation suivante :

$$[V_{n1.2.3}] = \frac{U_n}{1-\alpha} = -U_n.M_p.\frac{[T_n]}{1-\alpha} \quad \text{(III.14)}$$

Les tensions composées nécessaires pour réguler la tension de la charge afin d'obtenir une amplitude V_d-des (tensions de référence) s'obtiennent par :

$$[M_c] = -V_p[T_p] \quad \text{(III.15)}$$

$$[T_e] = V_p[1 \quad \alpha^2 \quad \alpha]^T \quad \text{(III.16)}$$

En reportant la relation (III-12) dans (III-16), on trouve :

$$[M_e] = (1 - M_p)[T_p] \quad \text{(III.17)}$$

Les tensions positives simples V_p1, 2,3 peuvent être obtenues par l'équation suivante :

$$V_{p1,2,3}] = \frac{M_p}{1-\alpha^2} = \frac{(1-M_p)}{1-\alpha^2}.[T_p] \quad \text{(III.18)}$$

A partir des équations (III-15) et (III-18), on obtient les tensions nécessaires pour réguler et compenser le déséquilibre de tension de la charge à protéger :

$$[V_{ref1,2,3}] = [V_{n1,2,3}] + [V_{p1,2,3}] \quad \text{III.19}$$

$$V_{ref1,2,3}] = \frac{[T_p]}{1-\alpha^2} - M_P.\left(\frac{[T_p]}{1-\alpha^2} + U_n\frac{[T_n]}{1-\alpha}\right) \quad \text{III.20}$$

Cette méthode permet la compensation des composantes inverse et directe d'une tension déséquilibre, mais ne permet pas la compensation de la composante homopolaire ni les harmoniques.

III-4.2-Méthode basée sur le calcul des perturbations dans le repère (d-q)

Cette méthode utilise la décomposition des tensions perturbatrices en séquences positiveV_p, négativeV_n, et homopolaire Vo. En passant par la transformation de Park nous obtenons pour chaque composante symétrique des valeurs constantes $V_{p\ (d\ ,q\text{-}mes)}$, $V_{n(d\ ,q\text{-}mes)}$, $V_{o(d\ ,q\text{-}mes)}$ En fixant les composantes désirées dans le repère direct et en quadrature aux grandeurs ($V_{p(d\text{-}des)}$, $V_{p(q\text{-}des)}$ pour la composante positive, aux grandeurs ($V_{n\ (d\text{-}des)}$, $V_{n(q\text{-}des)}$ pour la composante négative, et aux grandeurs ($V_{o(d\text{-}des)}$, $V_{o(q\text{-}des)}$ pour la composante homopolaire, les tensions de référence dans le repère de Park sont déterminées de la façon suivante :[6]

$$\begin{aligned} V_{d-ref}^{p} &= V_{d-des}^{p} - V_{d-mes}^{p} \\ V_{q-ref}^{p} &= V_{q-des}^{p} - V_{q-mes}^{p} \\ V_{d-ref}^{n} &= V_{d-des}^{n} - V_{d-mes}^{n} \\ V_{q-ref}^{n} &= V_{q-des}^{n} - V_{q-mes}^{n} \end{aligned} \qquad \text{(III.21)}$$

$$\begin{aligned} V_{d-ref}^{0} &= V_{d-des}^{0} - V_{d-mes}^{0} \\ V_{q-ref}^{0} &= V_{q-des}^{0} - V_{q-mes}^{0} \end{aligned}$$

Les tensions perturbatrices (tensions de référence) triphasées sont ensuite calculées grâce à la transformation suivante :

$$\begin{pmatrix} V_{ref1} \\ V_{ref2} \\ V_{ref3} \end{pmatrix} = C_{23}.P(\omega.t).\begin{pmatrix} V_{d-ref}^{p} \\ V_{d-ref}^{p} \end{pmatrix} + C_{23}.P(-\omega.t).\begin{pmatrix} V_{d-ref}^{n} \\ V_{d-ref}^{n} \end{pmatrix} \qquad \text{(III.22)}$$

$$P(\omega.t) = \begin{pmatrix} cos\omega t & -sin\omega t \\ sin\omega t & cos\omega t \end{pmatrix}$$

Avec :

C_{23} la transformation de Concordia inverse.

Cette méthode se complique en présence des composantes harmoniques, car il faut appliquer la transformation de Park directe et inverse pour chaque fréquence et procéder au filtrage des signaux à fréquence autre que celle de la transformation de Park. A cela nous ajoutons le fait que ces méthodes ont besoin d'une très bonne connaissance de la tension du réseau et qu'elles pourraient occasionner un surdimensionnement du filtre actif série, s'il n'y avait pas de conservation de l'angle de la composante directe de tension lors de la régulation de la tension de la charge. [6]

III-4.3- Méthodes des puissances active et réactive instantanées (PQ)

Deux stratégies peuvent être utilisées pour l'identification des tensions perturbatrices en

utilisant la théorie des puissances actives et réactives instantanées. La première approche peut être formulée de la façon suivante : [6]

Admettons que la tension source est triphasé symétrique et polluée, nous avons :

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \sin(n\omega t + \Theta_n) \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}\, U_n sin\left[\left(n\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \theta_n\right] \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}\, U_n sin\left[\left(n\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \theta_n\right] \end{bmatrix} \quad \text{(III.23)}$$

Ou U_n et θ_n sont respectivement la valeur de la tension efficace et l'angle de phase initiale de chaque tension pour les différents ordres, n est l'ordre de l'harmonique.

Lorsque n=1, nous avons une source de tension triphasé fondamentale:

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \Theta_1) \\ \sqrt{2} U_1 \sin\left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \Theta_1\right] \\ \sqrt{2} U_1 \sin\left[\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \Theta_1\right] \end{bmatrix} \quad \text{(III.24)}$$

La transformation de l'équation (III.23) au repère de référence (α–β) donne l'équation (III.25):

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \theta_n) \\ \sum_{n=1}^{\infty} \mp U_n \sin(n\omega t + \theta_n) \end{bmatrix} \quad \text{(III.25)}$$

Avec:

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(III.26)}$$

Les trois courants de phase (fondamentale positive) sont donnés par:

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{(III.27)}$$

La transformation de l'équation (III-18) au repère de référence (α–β) est donné par:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ -\cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad \text{(III.28)}$$

En faisant appel à la théorie des puissances active et réactive instantanées.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{(III.29)}$$

Alors:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \sqrt{3}\begin{bmatrix} U_1 \cos\theta_1 - \sum_{n=1}^{\infty} U_{3n+1}\cos(3n\omega t + \theta_{3n+1}) + \sum_{n=1}^{\infty} U_{3n+1}\cos(3n\omega t + \theta_{3n+1}) \\ U_1 \sin\theta_1 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{3n+1}\sin(3n\omega t + \theta_{3n+1}) + \sum_{n=1}^{\infty} U_{3n+1}\sin(3n\omega t + \theta_{3n+1}) \end{bmatrix} \quad \text{(III.30)}$$

Ou les composantes DC et AC sont inclues:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{(III.31)}$$

En faisant passer p et q à travers des filtres passe-bas (FPB), la composante continue est donné par:

$$\begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} = \sqrt{3}\begin{bmatrix} U_1 \cos(\theta_1) \\ U_1 \sin(\theta_1) \end{bmatrix} \quad \text{(III.32)}$$

En utilisant l'équation (III-22), la transformation est réalisée:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ -i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad \text{(III.33)}$$

Les composantes DC de p et q sont donnés par

$$\begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha f} & u_{\beta f} \\ u_{\beta f} & -u_{\alpha f} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ -i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_{\alpha f} \\ u_{\beta f} \end{bmatrix} \quad \text{(III.34)}$$

Les tensions fondamentales dans le référentiel (α–β) sont donné par:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha f} \\ u_{\beta f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ -i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} \quad \text{(III.35)}$$

Finalement les tensions fondamentale triphasés sont données par:

$$\begin{bmatrix} U_{saf} \\ U_{sbf} \\ U_{scf} \end{bmatrix} = C_{23}\begin{bmatrix} u_{\alpha f} \\ u_{\beta f} \end{bmatrix} = \sqrt{2}U_1\begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta_1) \\ \sin\left(\omega t + \theta_1 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t + \theta_1 + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{(III.36)}$$

Avec:

$$C_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(III.37)}$$

Le schéma de principe permettant l'identification des tensions perturbatrices basée sur la méthode des puissances active et réactive est donnée par la Fig. III6.

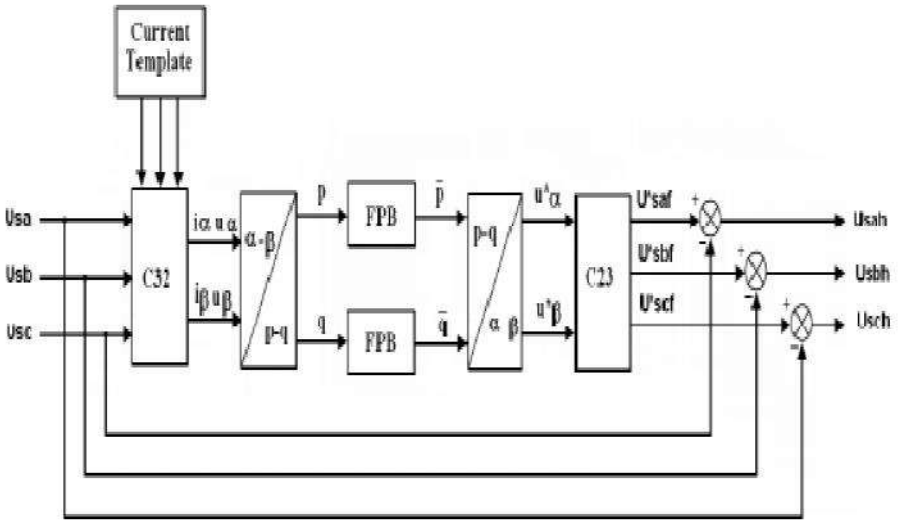


Fig. III.7. Identification des tensions perturbatrices

La deuxième approche consiste en la transformation des tensions instantanées triphasés de charge Ucha, U_{chb}, U_{chc} et des courants i_{cha}, i_{chb}, i_{chc} en coordonné biphasé (α–β), deux tensions de phaseu_α , u_β et deux courants de phase i_α , i_β sont respectivement obtenus:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{cha} \\ U_{chb} \\ U_{chc} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} U_{cha} \\ U_{chb} \\ U_{chc} \end{bmatrix} \quad \text{(III.38)}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad \text{(III.39)}$$

Avec C_{32} est la matrice permettant de transformer un système triphasé (abc) en un système biphasé (α–β).

Dans le plan (α–β), $\vec{v}$peut être décomposé en $\vec{v}_\alpha$ et $\vec{v}_\beta$ de même que pour le courant$\vec{\imath}$, il peutêtre décomposé en $\vec{\imath}_\alpha$ et $\vec{\imath}_\beta$:

$$\vec{\imath} = \vec{\imath}_\alpha + \vec{\imath}_\beta \quad \text{III.40}$$

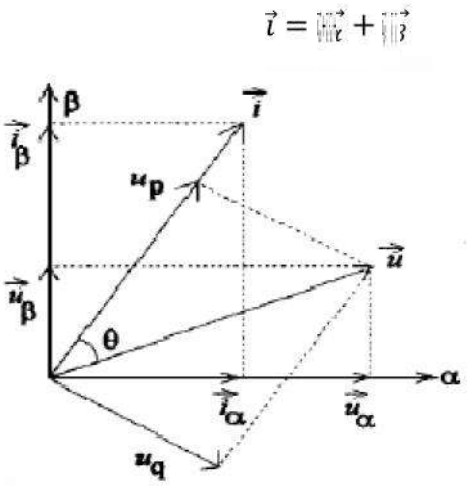


Fig. III.8 Diagramme vectoriel des tenions et des courants

Ou u et i sont les modules des vecteurs $\vec{u}$et $\vec{\imath}$ respectivement et θ est l'angle entre $\vec{u}$et$\vec{\imath}$. Assumons que $u_p$est la projection de $\vec{u}$ dans la direction de $\vec{\imath}$et $u_q$est la projection de $\vec{u}$dans la direction orthogonale de$\vec{\imath}$, les expressions de $u_p$et $u_q$sont données par :

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} U_{hu} \\ U_{lv} \\ U_{lw} \end{bmatrix} \qquad \text{III.41}$$

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \end{bmatrix} = C_{pq} C_{32} \begin{bmatrix} U_{lu} \\ U_{lv} \\ U_{lw} \end{bmatrix}$$

Avec:

C_{Pq}est la transformation matricielle permettant la conversion des tensions de phase u_α et u_β en$u_p$etu_q. Uch_a, Uch_b and Uch_c sont les tensions de charge triphasées. Lorsque les tensionsUch_a , Uch_b and Uch_c sont asymétriques ou riche en harmoniques, les composantes respective $\vec{u}_{af}$et$\vec{u}_{ah}$dans $u_p$et$u_q$correspondent à la séquence positive fondamentalesactive et réactive des tensions de phase triphasées et les composantes alternatifs correspondent aux composantes harmoniques dans les trois tensions de phase.

Active et réactive des tensions de phase triphasées et les composantes alternatives correspondent aux composantes harmoniques dans les trois tensions de phase.

Alors, les composantes fondamentales U_{chaf}, U_{chbf} et U_{chcf} peuvent être obtenues par la transformation inverse [5]:

$$\begin{bmatrix} U_{chaf} \\ U_{chbf} \\ U_{chcf} \end{bmatrix} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \overline{u_q} \end{bmatrix} \quad \text{(III.42)}$$

$$\begin{bmatrix} U_{chaf} \\ U_{chbf} \\ U_{chcf} \end{bmatrix} = C_{23} {C_{pq}}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix}$$

On ${C_{pq}}^{-1}$ est la matrice inverse de *C*. Cependant les composantes harmoniques de compensation peuvent être calculées selon:

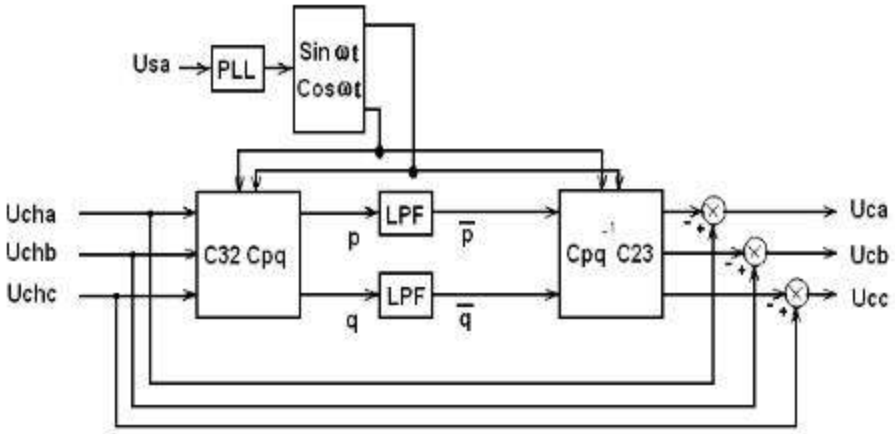


Fig. III.9 Tension de référence de compensation utilisant la méthode PQ

III.5. Filtre actif série à structure tension deux niveaux

Le schéma de principe d'un filtre actif série à base d'un convertisseur de tension deux niveaux est donné par la Fig. III-5, le FAS est inséré entre la source de tension perturbée et la charge à protégée. Il est composé de la source de tension triphasé, d'un filtre de sortie L_f C_f afin de supprimer les ondulations de commutation et de trois transformateurs permettant d'injecter les tensions compensatrices au réseau. [6]

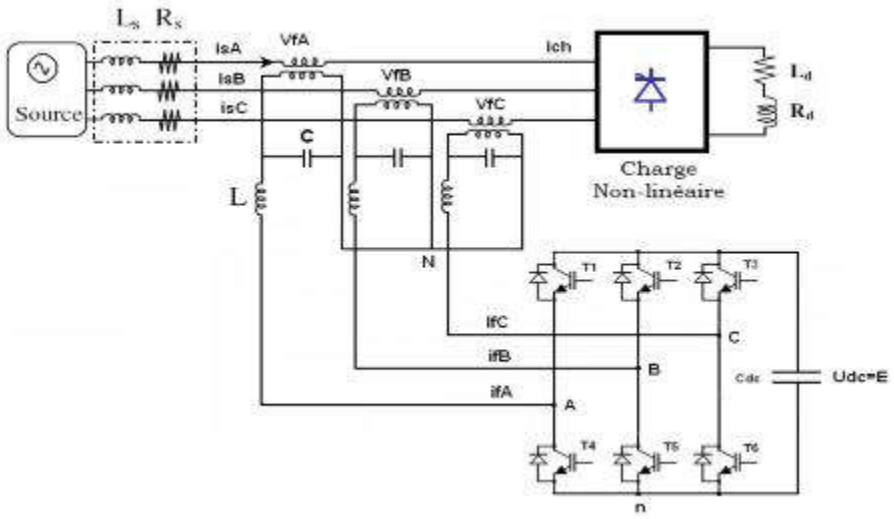


Fig. III-10- Schéma de principe d'un filtre actif série-convertisseur de tension deux niveaux

III.5.1. Modèle mathématique du FAS à structure tension deux niveaux

Le modèle mathématique du filtre actif série est basé sur les équations électriques qui gouvernent son fonctionnement. Il dépend des variables d'état tel que le courant dans l'inductance L du filtre, la tension aux bornes de la Capacité C et la tension DC aux bornes condensateur de filtrage C_{dc} [5]. En choisissons un rapport de transformation 1 :1, les équations électriques peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{aligned} L\frac{di_{f\,A}}{dt} &= v_{f\,A} - v_{AN} \\ L\frac{di_{f\,B}}{dt} &= v_{f\,B} - v_{BN} \\ L\frac{di_{f\,C}}{dt} &= v_{f\,C} - v_{CN} \end{aligned} \qquad \text{(III.44)}$$

$$\begin{aligned} C\frac{dv_{f\,A}}{dt} &= i_{s\,A} - i_{f\,A} \\ C\frac{dv_{f\,B}}{dt} &= i_{s\,B} - i_{f\,B} \\ C\frac{dv_{f\,C}}{dt} &= i_{s\,c} - i_{fc} \end{aligned} \qquad \text{(III.45)}$$

$$i = C_{dc}\frac{dE}{dt} = d_1 i_{f\,A} + d_2 i_{f\,B} + d_3 i_{f\,C}$$

Avec

i sont les courants traversant les inductances du FAS, et f *A p* représente les courants principaux coté primaire du FAS. D'autre part :

$$\begin{aligned} v_{AN} &= d_1 E \\ v_{BN} &= d_2 E \\ v_{CN} &= d_3 E \end{aligned} \qquad \text{(III.46)}$$

$$v_{nN} = -\frac{1}{3}(v_{AN} + v_{BN} + v_{CN})$$

Ce qui conduit aux équations suivantes :

$$\begin{aligned} v_{AN} &= v_{An} + v_{nN} = \tfrac{2}{3}v_{An} - \tfrac{1}{3}v_{Bn} - \tfrac{1}{3}v_{Cn} \\ v_{BN} &= v_{Bn} + v_{nN} = \tfrac{2}{3}v_{An} - \tfrac{1}{3}v_{Bn} - \tfrac{1}{3}v_{Cn} \\ v_{CN} &= v_{Cn} + v_{nN} = \tfrac{2}{3}v_{An} - \tfrac{1}{3}v_{Bn} - \tfrac{1}{3}v_{Cn} \end{aligned} \qquad \textit{(III.47)}$$

Ou « N » représente le point neutre principal et « n » nœud commun.

Cependant, le système peut être représenté comme suit :

$$\begin{aligned} L\frac{d}{dt}\overline{i_f} &= \overline{v_f} - T\overline{d}E \\ C\frac{d}{dt}\overline{v_f} &= \overline{i_s} - \overline{i_f} \\ C_{dc}\frac{dE}{dt} &= \overline{d^T}\overline{i_f} \end{aligned} \qquad \text{(III.48)}$$

Avec :

$$\overline{i_f} = \begin{bmatrix} i_{f\,A} \\ i_{f\,B} \\ i_{f\,C} \end{bmatrix}. \ \overline{v_f} = \begin{bmatrix} v_{f\,A} \\ v_{f\,B} \\ v_{f\,C} \end{bmatrix}. \ \overline{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix}. \ \overline{i_s} = \begin{bmatrix} i_{s\,A} \\ i_{s\,B} \\ i_{s\,C} \end{bmatrix}. \ T = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & 1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix}$$

Pour réduire l'ordre du système et le nombre des équations électriques, on utilise la transformation matricielle de Park :

$$K = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t) & -\cos(\omega_0 t) & 0 \\ \cos(\omega_0 t) & \sin(\omega_0 t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 3/2 & 3/2 & 3/2 \end{bmatrix} \qquad \text{(III.49)}$$

Ou $w_0$est la fréquence angulaire principale. Cette transformation permet d'exprimer les équations décrivant notre système dans le référenciel (d, q, o). Les variables du système deviennent :

$$\begin{aligned} \overline{i_s} &= [i_{sd} i_{sq} i_{so}]^T = K\overline{i_s} \\ \overline{i_f} &= [i_{fd} i_{fq} i_{fo}]^T = K\overline{i_f} \\ \overline{v_f} &= [v_{fd} v_{fq} v_{fo}]^T = K\overline{v_f} \\ \overline{d} &= [d_d d_q d_o]^T = K\overline{d} \end{aligned} \qquad \textit{(III.50)}$$

Le système (III-39) devient alors:

$$\begin{aligned} L\frac{di_{f\,d}}{dt} &= v_{f\,d} + L\omega_0 i_{f\,q} - d_d E \\ L\frac{di_{f\,q}}{dt} &= v_{f\,q} + L\omega_0 i_{f\,d} - d_q E \\ L\frac{di_{f\,0}}{dt} &= v_{f\,0} \end{aligned} \tag{III.51}$$

$$\begin{aligned} C\frac{dv_{f\,d}}{dt} &= C.\omega_0 v_{f\,q} - i_{f\,d} + i_{s\,d} \\ C\frac{dv_{f\,q}}{dt} &= -C.\omega_0 v_{f\,d} - i_{f\,q} + i_{s\,q} \\ C\frac{dv_{f\,0}}{dt} &= i_{s\,0} - i_{f\,0} \end{aligned} \tag{III.52}$$

$$C\frac{dE}{dt} = \frac{3}{2}\left(d_d i_{f\,d} + d_q i_{f\,q}\right) + \frac{1}{3} d_0 i_{f\,0} \tag{III.53}$$

Pour déduire le modèle d'état du système on considère que les variables de la séquence zéro sont nulles. La variable d'état x incluant les variables d'état réduit du filtre série est définie comme sui:

$$x = [i_{fd}\ i_{fq}\ v_{fd}\ v_{fq} E]^T$$

Ainsi le système peut être représenté sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \\ v_{fd} \\ v_{fq} \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & \frac{1}{L} & 0 & -\frac{d_d}{L} \\ -\omega_0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{d_d}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 & 0 & \omega_0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} & -\omega_0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}\frac{d_d}{C_{dc}} & \frac{3}{2}\frac{d_d}{C_{dc}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{fq} \\ i_{fd} \\ i_{fq} \\ E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \tag{III.54}$$

III.6 Simulation du fonctionnement d'un filtre actif série-charge non linéaire inductive

III.6.1 Filtre actif série à base d'un convertisseur de tension deux niveaux

Le schéma du FAS à base d'un convertisseur de tension deux niveaux est donné par la Fig. III.11. La stratégie de contrôle adopté pour l'identification des tensions compensatrices est basée sur la méthode PQ, la commande du convertisseur est réalisée moyennant un

contrôleur à hystérésis. La tension continue nécessaire à la compensation est obtenue en utilisant la technique de charge autonome [6].

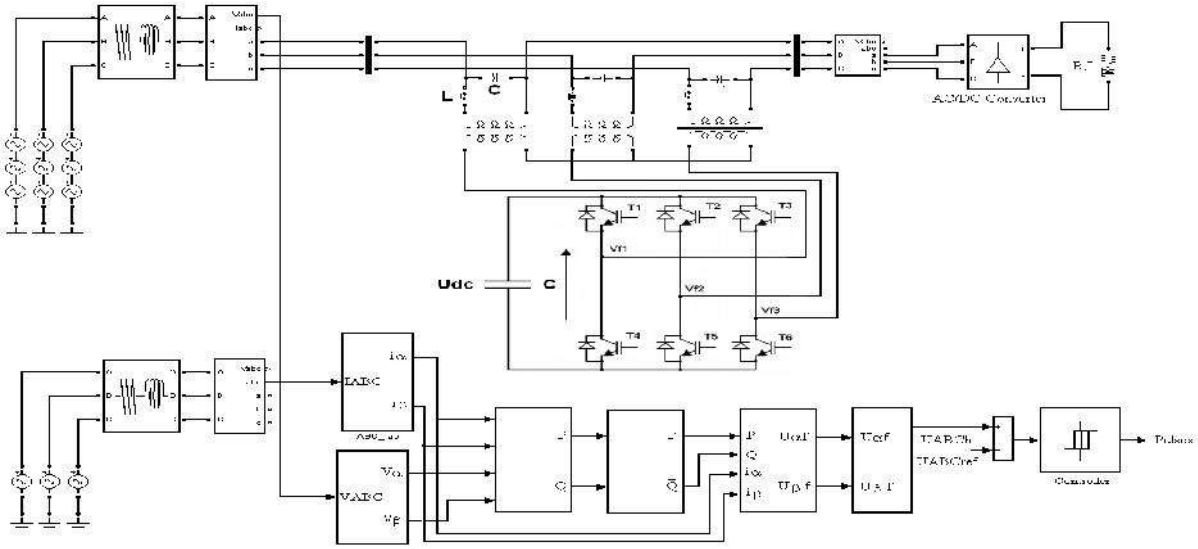


Fig. III.11 Bloc diagramme du FAS utilisant une stratégie de contrôle PQ(I) associé à un contrôleur à hystérésis à base d'un convertisseur de tension deux niveaux

II.6.1.1 Compensation des harmoniques de tension

La Fig. III-11 montre le cas de la compensation d'un réseau triphasé équilibré et déformé en utilisant la méthode PQ tensions triphasées équilibrée déformées sont donnés par:

$$v_{sa} = 311\sin(ax) + 311/5\sin(5ax) + 311/7\sin(7ax)$$

$$v_{sb} = 311\sin\left(ax - \frac{2\pi}{3}\right) + 311/5\sin\left(5ax + \frac{2\pi}{3}\right) + 311/7\sin\left(7ax - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (III.55)$$

$$v_{sc} = 311\sin\left(ax + \frac{2\pi}{3}\right) + 311/5\sin\left(5ax - \frac{2\pi}{3}\right) + 311/7\sin\left(7ax + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Pour la deuxième perturbation harmoniques, l'expression des trois tensions équilibrées déformées sont donné par **: [5]**

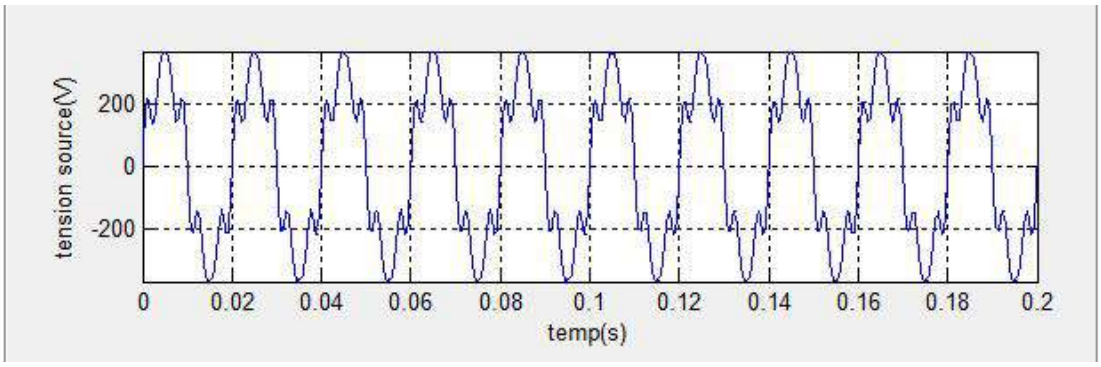
$$v_{sa} = 311\sin(ax) + 141\sin(2ax) + 35\sin(4ax) + 14\sin(5ax)$$

$$v_{sb} = 311\sin\left(ax + \frac{4\pi}{3}\right) + 141\sin\left(2ax + \frac{4\pi}{3}\right) + 35\sin\left(4ax + \frac{4\pi}{3}\right) + 14\sin\left(5ax + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (III.55)$$

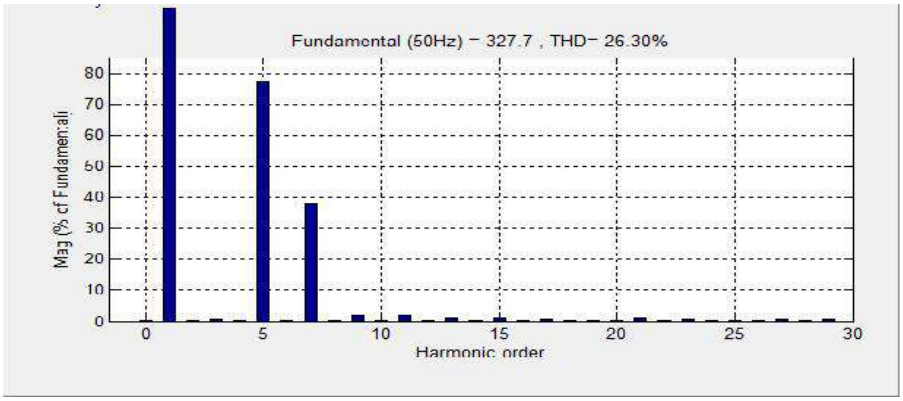
$$v_{sc} = 311\sin\left(ax + \frac{2\pi}{3}\right) + 141\sin\left(2ax + \frac{2\pi}{3}\right) + 35\sin\left(4ax + \frac{2\pi}{3}\right) + 14\sin\left(5ax + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Les résultats de simulations en utilisant la première approche sont représentés par la Fig. III12.

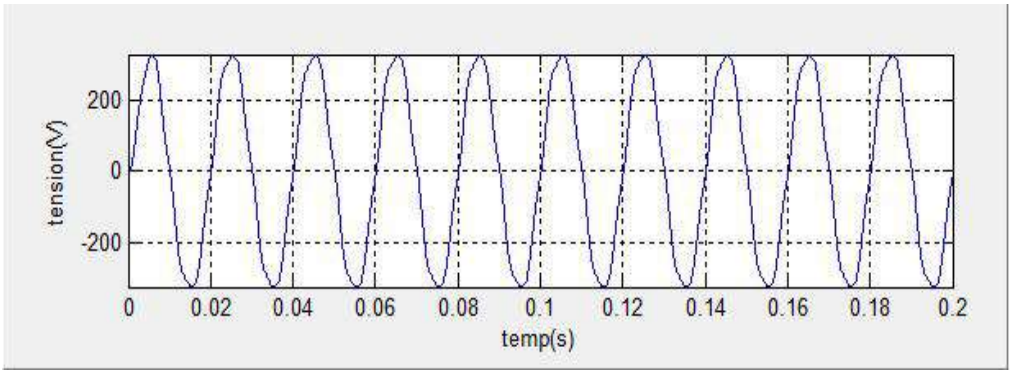
Compensation d'un réseau triphasé équilibré et déformé-Convertisseur de tension deux niveaux-Méthode PQ(I) est la matrice permettant de transformer un système triphasé (abc) en un système biphasé (α–β).est la matrice permettant de transformer un système triphasé (abc) en un système biphasé



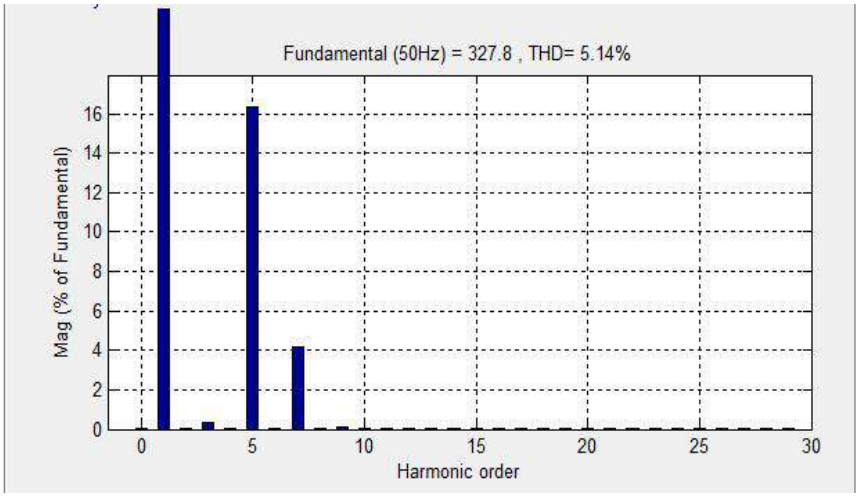
a) Tension de source



b) Spectre harmonique de la tension de source



c) Tensions de la charge après compensation



d) Spectre harmonique de la tension de compensation

Fig.12. a) Tension de source(V),**c)** Tensions de la charge après compensation(V)

Les résultats de simulation obtenus montrent que la méthode PQ(I) passe par un transitoire de 0.04 sec avant stabilisation et permet la détection instantanée des perturbations harmoniques de tension quelque soient leurs types. Le FAS injecte convenablement les tensions de compensation à travers le convertisseur utilisé, le THDv est nettement amélioré, il passe de 26.30% à 5.14%.

III.7.Conclusion

Ce chapitre à été consacré au filtre actif série à structure tension à base des convertisseurs de tension deux niveaux(. La stratégie de contrôle permettant la détermination des tensions de référence adoptée est celle des puissances active et réactive instantanées (PQ), deux approches ont été étudiées

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacrée à l'étude des différents systèmes de filtrage moderne permettant la compensation des harmoniques de courant et/ou de tension en utilisant différentes stratégies de contrôle en utilisant le logiciel **MATLAB-Simulink**. Les principaux systèmes étudiés sont le filtre actif parallèle **(FAP),** le filtre actif série **(FAS)**. Le filtre actif parallèle a pour objectif la compensation des courants perturbateurs harmoniques, le filtre actif série a pour objectif la compensation des harmoniques de tension en plus des différentes autres perturbations comme le déséquilibre, les creux de tension, les surtensions, etc.

Dans le cas du filtre actif parallèle, la configuration a été proposés l'une à base du convertisseur de tension deux niveaux. Les stratégies de contrôles adoptées pour la détermination des courants de référence sont basées sur la méthode du référentiel lié au synchronisme, cette méthode offre un meilleur compromis entre l'efficacité, la souplesse et la simplicité d'implantation. Avant compensation, la courante source absorbée par la charge non linéaire est largement polluée avec un **THDi** de **4.36%.** Les résultats de simulations obtenus montrent que en utilisant les FAPs proposés, le **THDi** après compensation est nettement amélioré et descend à des valeurs très acceptables en conformité avec la norme standards **IEEE519**. Pour les différentes configurations étudiées, ce courant est presque sinusoïdal et en phase avec la tension source ce qui améliore le facteur de puissance et réduit la compensation de la puissance réactive.

Dans la dernies partie de ce mémoire qui concernait le filtre actif série, la configuration a été proposés aussi à base des topologies de convertisseur deux niveaux. La stratégie de contrôle choisi pour la détermination des tensions de compensation est basée sur la méthode des puissances actives et réactives instantanées **(PQ)** avec deux approches différentes. Les résultats de simulation obtenus montrent l'efficacité, instantané des FASs proposés pour la compensation des harmoniques de tension et des autres type de perturbations liés à la tension avec une nette amélioration des performances de en matière de réduction du **THDv.**

En conclusion, nous pouvons affirmer que l'ensemble des objectifs fixés au départ, ont pu être obtenus :

- Etude et modélisation de différents systèmes de filtrage actif **(FAP, FAS)** à base des topologies de convertisseurs de tension deux niveaux.
- Etude de plusieurs stratégies de contrôle permettant l'identification des courants de référence ou les tensions de compensation (paramètre déterminant dans la qualité de compensation) d'un système de filtrage moderne.

BIBLIOGRAPHIE

[1] : **Mr. HADDAD SALIM**, «gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission »thèse de doctorat en électromécanique, Université Badji Mokhtar Annaba(Algérie), 2010

[2] : **NEKKAR Djamel,** «Contribution à l.Etude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés» Thèse de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras (Algérie), 2013-2014

[3] **GATTAL BOULAARES** : «méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique pour l'application aux creux de tension pour obtenir le titre de magister en électrotechnique» Thèse de Magister En Electrotechnique, Université de Batna Faculté de Technologie(Algérie), 30/06/2012.

[4] -Khor Shafiee Mohsen, "Amélioration de la qualité de l'énergie à laide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques", Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de Nantes, (France) 2006.

[5] :**V. Ignatio** : «Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique : application aux creux de tension et à la pollution harmonique», Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier- Grenoble I, 2006. French, HAL Id: tel-00170713 https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00170713,1Octobre 2006.

[6] : **C.Salim**, « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle» Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra(Algérie), septembre 2013.

[7] : **Mr. BELKHALFA BILLEL, Mr. BENBOUCHTA SIDALI**, «Commande d'un Filtre Actif Série de Puissance à Cinq Niveaux pour Améliorer la Qualité de la Tension Electrique (Etude et simulation) » Thèse Master, université Dr. yahia fares de medea (Algérie) ,2013-2014.

[8] : **M. A. E. Allai,** « Contribution à l'Etude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat, université de Louis Pasteur, Strasbourg, septembre 2002

[9] : **ZELLOUMA LAID**, «Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé » mémoire de magister, Université Badji Mokhtar Annaba(Algérie) ,2006.

[10] : **Mr BOUKADOUM AZIZ,** «Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique » Thèse Magister, Université Badji Mokhtar Annaba(Algérie), Octobre 2007

[11] :S.TADJER, I.HABI, « problématiques et identification des perturbations harmoniques dans un réseau basse tension» Laboratoire de la recherche sur l'électrification des entreprises industrielles Faculté des Hydrocarbures et de la chimie-Université M'Hamed Bougara
E-mail : Sidahmed79dz@yahoo.fr

[12] : M. H. DJEGHLOUD, «filtrage actif de puissance » Thèse de Doctorat en Science et en Electrotechnique. Université Mentouri Constantine. 12 décembre 2007.

[13] : H. Nour Eddine, «Etude Comparative des Techniques de Filtrage des Harmoniques de Courant » Thèse de Magister, université Ferhat Abbas – setifufas (Algérie) » ,2010

[14] : HAMRAOUI Farid, MEKATI Abd elaziz, «Commande d'un Filtre Actif parallèle»mémoire de mastère électrotechnique, Université Dr YAHIA FARES de Médéa, Juin 2012-

[15] -Mekri Fatiha, "Commande robuste des conditionneurs actifs de puissance", Thèse de Doctorat en génie électrique, Ecole Polytechnique de l'université de Nantes, (France) 2007.

Tableau -a Paramètres du FAP

Convertisseur de tension deux niveaux

Source d'alimentation	
220V, 50Hz	
Rs, Ls	0.1Ω, 1mH
Charge non-linéaire	
Rl, LL	10 Ω, 6 mH
FAP	
L	1.2mH

Tableau -b Paramètres du F AS

Convertisseur de tension deux niveaux

Source d'alimentation	
220V, 50Hz	
Rs, Ls	25, 19.4 mH
Charge non-linéaire	
RL, CL	1 Ω, 1 µF
FAS	
Lsf, CSf Rsf	50 mH, 200 µF 31