



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère d'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Thème

*Étude et simulation d'un filtre actif
parallèle commandé par mode glissant*

Réalisé par :

AZZOUZ Said

GHOBNI Ali

NISSE Salem

Encadré par:

Dr. ZELLOUMA Laid

Soutenu en Juin 2021

Remerciements

Un merci de cœur au « bon Dieu » le tout puissant qui nous a donné la santé, la volonté et le courage afin de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements très chaleureusement et notre sincère gratitude :

A Notre promoteur Mr ZELLOUMA LAID, pour son orientation, Ses conseils, et sa disponibilité à tout moment de besoin d'orientation. Toutes nos reconnaissances pour vous.

A notre Jury , pour accepter d'examiner et de juger notre travail.

Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements vont également à l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin, directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Que Dieu vous accorde, son aide, dans tous vos projets et activités.

D E D I C A C E

Je dédie ce travail :

A mes parents,

À mes frères et sœurs, ma grande famille,

*À mes ceux et celles qui m'éprouvent de la véritable
amitié.*

NISSE SALEM

Je dédie ce travail :

A mes parents,

À mes frères et sœurs, ma grande famille,

*À mes ceux et celles qui m'éprouvent de la véritable
amitié.*

AZZOUZ SAID

Je dédie ce travail :

A mes parents,

À mes frères et sœurs, ma grande famille,

*À mes ceux et celles qui m'éprouvent de la véritable
amitié.*

GHOBNI ALI

RESUME

Ces dernières années, l'utilisation des convertisseurs statiques est en forte progression. Ces convertisseurs absorbent des courants non sinusoïdaux aux réseaux électriques. Ils se comportent alors comme des générateurs des courants harmoniques provenant des dysfonctionnements au niveau des équipements électriques.

Le développement récent des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables, tels que les IGBT, a permis la conception de nouvelles structures, comme les filtres actifs de puissance, pour minimiser ces courants harmoniques.

Dans ce travail, nous exposons l'étude et la simulation du filtre actif parallèle de puissance en vue de compenser les harmoniques de courants et la puissance réactive susceptibles d'apparaître dans les réseaux électriques.

Après un rappel des origines, et des effets de la pollution harmonique sur les réseaux électriques, les différentes solutions de dépollution du réseau électrique; nous étudions la structure du filtre actif parallèle de puissance, la commande du filtre actif à base de l'onduleur a été ensuite étudiée, à savoir les méthodes d'identification des courants harmoniques de référence: dans ce cas on utilise la méthode des puissances instantanées p-q, la commande hystérésis pour l'onduleur et un régulateur par mode glissant pour régulation du bus continu. Puis, nous avons validé par des simulations sous l'environnement Simulink/Matlab .

Les résultats obtenus prouvent que le filtre actif nous permet d'avoir des résultats très satisfaisants avec des THDi de courants de source conformes aux normes inférieures à 5%.

Mots clés: charge non linéaire , Courants harmoniques , identification des harmoniques des courants , Taux de distorsion d'harmonique THD , FAP, Onduleur, Méthode p-q.

ABSTRACT

Recently, the use of power electronic loads is increased. These power electronic loads absorb non-sinusoidal current from the electrical network and behave as harmonic currents generator, which can cause undesirable effects on electrical equipments.

The recent development of semi-conductor completely controllable, such as IGBT, allows to conceive new structures, such as active power filter for harmonic compensation.

In this work, the study and the simulation of a shunt active power filter to compensate current harmonics and reactive power in electrical network is studied.

The structure of a shunt active power filter and its control strategy are the most important elements in the compensation process. In this work, two-levels voltage source inverter topology is selected. However, instantaneous active and reactive power theory (p-q) is applied to calculate and identify harmonic currents. The hysteresis controller is used in current control loops. However, controller by sliding mode is used for DC bus voltage control. The simulations has been performed using Matlab/Simulink .

The shunt active filter based on the proposed control strategy has shown good performance in reducing the total harmonic distortion (THDi) of the source current to less than 5% satisfying the international recommendation.

Key words: non-linear load , Harmonic current , extraction the current harmonics , Total harmonic distortion THD, shunt active power filter, inverter, method (p-q),

الملخص

في السنوات الأخيرة , يعتبر استعمال المحولات الثابتة في تزايد كبير , حيث أن هؤلاء المحولات يمتصون تيارات غير جيبية من الشبكة الكهربائية . إذا أنهم يسلكون سلوك مولدات التيار التوافقي الذي يحدث خلل على مستوى الأجهزة الكهربائية.

أدى تطور أشباه النواقل للاستطاعة القابلة للتحكم ال IGBT في الأوان الأخيرة الى ظهور مفهوم لبنية جديدة مثل المرشح الفعال من أجل التقليل من هؤلاء التيارات التوافقية .

في هذا العمل , سوف نقوم بعرض دراسة و محاكاة المرشح الفعال المتوازن للاستطاعة بهدف تعويض توافقيات التيارات و الاستطاعة الغير فعالة التي تظهر في الشبكات الكهربائية .

بعد التذكير بأهم الاضطرابات التي تؤثر على الشبكة الكهربائية أسبابها و تأثيرها و مختلف الحلول لتصفية الشبكة من الشوائب . سوف نقوم بدراسة إجمالية لبنية المرشح الفعال المتوازن الاستطاعة , و بعد ذلك نقوم بدراسة تحكم المرشح الفعال القائم على العاكس والطرق المستعملة لتحديد التيارات التوافقية المرجعية وفي هذه الدراسة سوف نستعمل طريقة الاستطاعة اللحظية p-q و باستعمال تقنية التحكم التخلفية ومنظم وضع الانزلاق لتنظيم الجزء الثابت . و بعد ذلك سوف نتحقق من النتائج عن طريق المحاكاة باستعمال برنامج الماتلاب .

النتائج المتحصل عليها تثبت أن المرشح الفعال يتيح لنا الحصول على نتائج جيدة جيداً , مع THD_i أقل من 5% و ذلك ما يوافق القوانين و النظم الدولية .

الكلمات المفتاحية : الحمولة الغير خطية , التيارات التوافقية , تحديد التوافقيات للتيارات , معامل تشويه التيار , المرشح الفعال المتوازن , المرشح , طريقة p-q .

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	I
LISTE DES TABLEAUX	II
LISTE DES SYMPOLES	III
LISTE DES ABREVIATIONS	VII
INTRODUCTION GENEERALE	1
Chapitre I	
Perturbations des réseaux électriques et principes de compensation	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Qualité de l'énergie.....	5
I.2.1 Définition.....	5
I.3 Perturbation électrique.....	5
I.3.1 Creux et coupures de tension.....	6
I.3.2 Fluctuations des tensions.....	7
I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	7
I.3.4 Variation de fréquence	8
I.3.5 Harmonique et inter-harmonique.....	8
I.3.5.1 Les perturbations harmoniques.....	9
I.3.5.1.1 Origines et sources d'harmonique.....	9
I.3.5.1.2 Conséquence des harmoniques.....	9
I.3.5.1.2.1 Effets instantanés	9
I.3.5.1.2.2 Effets a terme	10
I.4 Grandeurs et caractéristiques des harmoniques	11
I.4.1 Grandeur harmonique.....	11
I.4.2 Rang de l'harmonique.....	11
I.4.3 Série de Fourier.....	11
I.4.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	12
I.4.5 Taux de distorsion.....	12
I.4.6 Facteur de puissance	13
I.4.7 Spectre d'harmonique (de fréquence).....	13
I.4.8 Charges linéaires et non-linéaires	14
I.5 Normes et réglementation de perturbation	14
I.6 Les solutions traditionnelles	15
I.6.1 Transformateur à couplage spécial	15

I.6.2 Pont dodécaphasé.....	16
I.6.3 Sur dimensionnement ou déclassement des installations électriques	16
I.6.4 Agir sur la structure de l'installation	17
I.6.5 Inductances (selfs) série	17
I.6.6 Filtres passifs d'harmoniques.....	17
I.6.6.1 Filtre résonant.....	18
I.6.6.2 Filtre amorti.....	18
I.6.6.3 Les avantages et les inconvénients des filtres passifs.....	19
I. 7 Solutions modernes de dépollution	19
I.7.1 Filtrage actif.....	20
I.7.1.1 Le principe de fonctionnement du filtre actif.....	20
I.7.1.a Filtre actif parallèle (<i>FAP</i>).....	21
I.7.1.b. Filtre actif série (<i>FAS</i>).....	22
I.7.1.c Combinaison parallèle série actif.....	22
I.7.1.2 Les avantages et les inconvénients du filtre actif	23
I.7.2 Filtrage hybride.....	23
I.7.2.a Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	24
I.7.2.b Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	24
I.7.2.c Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	25
I.7.3 Les redresseurs MLI.....	25
I.7.3.a Les redresseurs MLI de courant.....	25
I.7.3.b Les redresseurs MLI de tension.....	26
I.8 Conclusion.....	27

Chapitre II

Structure du filtre actif parallèle de puissance et principe de fonctionnement

II.1 Introduction	29
II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance	29
II.3 Structure du filtre actif parallèle	31
II.3.1 Etude de la partie puissance.....	31
II.3.1.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle	32
II.3.1.2 circuit de stockage d'énergie	34
II.3.1.2.1 Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage	35
II.3.1.3 Filtre de sortie	36
II.3.2 Etude de la partie commande.....	38

II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courant perturbés	38
II.3.2.1.1 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées.....	39
II.3.2.2 Système a PLL	41
II.3.2.3 Commande de onduleur.....	42
II.3.2.3.1 La commande par hystérésis.....	42
II.3.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	43
II.3.2.4 Régulation de la tension continue (PI)	44
II.3.2.5 Régulations du courant du filtre actif.....	45
II.3.2.6 Régulation de la tension continue par mode glissant.....	46
II.3.2.6.1 Principe de la commande par mode glissant.....	46
II.3.2.6.2 Choix de la surface de glissement	47
II.3.2.6.3 Conditions d'existence et de convergence.....	48
II.4 Conclusion.....	48

CHAPITRE III

MODELISATION ET SIMULATION DE L'ENSEMBLE RESEAU ELECTRIQUE, CHARGE POLLUANTE ET FILTRE ACTIF PARALLELE

III.1 Introduction.....	50
III.2 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.....	50
III.3 Modélisation de l'association réseau-filtre actif-charge polluante	51
III.3.1 Modélisation du réseau électrique	51
III.3.2 Modélisation du charge polluante (Redresseur à diode).....	51
III.3.3 La modélisation du filtre actif (ou de l'onduleur)	52
III.3.3.1 Fonction de connections	53
III.3.3.2 Fonctions de conversions composées	53
III.3.3.3 Représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur	54
III.4 Simulation de l'ensemble du réseau, filtre actif parallèle et la charge polluante	55
III.4.1 Résultats de simulation et Interprétation.....	56
III.4.1.1 Comportement du FAP en régime permanent	56
III.4.1.2 Comportement du FAP en régime dynamique (Changement de la charge) ...	60
III.4.2 Interprétations des résultats	61
III.4.2.A) En régime permanent	61
III.4.2.B) En régime dynamique.....	62
III.5 Conclusion	62
Conclusion Generale	63
Bibliographies	65

LISTE DE FIGURE

Numéro de figure	Le titre	Page
Figure(I.1)	Systeme de tension triphasé équilibré	5
Figure(I.2)	Creux et coupures de tension	6
Figure(I.3)	Fluctuations de tension	7
Figure(I.4)	Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension	7
Figure(I.5)	Variation de fréquence	8
Figure(I.6)	Harmoniques et interharmoniques	9
Figure(I.7)	Le spectre harmonique du courant de charge polluante	14
Figure(I.8)	Structure du pont dodécaphasé	16
Figure(I.9)	Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles	17
Figure(I.10)	Structure du filtre résonant	18
Figure(I.11)	Structure du filtre amorti	19
Figure(I.12)	Montage du Filtre actif parallèle	21
Figure(I.13)	Montage du Filtre actif série	22
Figure(I.14)	Montage du Filtre actif série-parallèle	22
Figure(I.15.a)	Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	24
Figure(I.15.b)	Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	24
Figure(I.15.c)	Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	25
Figure(I.16.a)	Redresseur à MLI de courant	26
Figure(I.16.b)	Redresseur à <i>MLI</i> de tension	26
Figure(II.1)	Schéma de principe des signaux générés par le filtre actif parallèle	30
Figure(II.2)	Structure générale de filtre actif parallèle	31
Figure(II.3)	Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension	32
Figure(II.4)	Structure d'un onduleur triphasé	32
Figure(II.5)	Structure filtre active parallèle à tension	33
Figure(II.6)	Interrupteurs équivalents du filtre actif à source de tension	33
Figure(II.7)	Structure de filtre actif à courant	34
Figure(II.8)	Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées	41
Figure(II.9)	Principe de la commande des courant par hystérésis	42
Figure(II.10)	Principe de commande par MLI	43
Figure(II.11)	Boucle de régulation de la tension continue	45
Figure(II.12)	Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle	46
Figure(II.13)	Systeme de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation	47
Figure(II.14)	Démonstration du mode de glissement	48
Figure(III.1)	Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluant	50
Figure(III.2)	Schéma synoptique d'un réseau triphasé	51
Figure(III.3)	Schéma d'une charge non-linéaire (un pont redresseur)	52
Figure(III.4)	Schéma représentatif d'un onduleur de tension triphasé	52
Figure(III.5)	Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur	54
Figure(III.6)	Schéma de simulation d'un filtre actif parallèle de puissance	55

Figure(III.7)	courant de source avec spectre d'harmonique avant le filtrage	56
Figure(III.8)	courant et tension de la source avant le filtrage	57
Figure(III.9)	le courant est injecté par le filtre	57
Figure(III.10)	courant de source avec spectre d'harmonique après le filtrage	57
Figure(III.11)	courant et tension de la source après le filtrage	58
Figure(III.12)	la tension continu de la condensateur de l'onduleur	58
Figure(III.13)	Courant de source I_s , avant/après du FAP	58
Figure(III.14)	le courant est injecté par le filtre, avant/après du FAP	58
Figure(III.15)	courant et tension de la source après le filtrage	59
Figure(III.16)	Puissances instantanées active p et réactive q avant FAP	59
Figure(III.17)	Puissances instantanées active p et réactive q après FAP	59
Figure(III.18)	la tension de la condensateur avant/ après le filtrage	59
Figure(III.19)	L'effet du changement de la charge sur les I_{ch} , I_{inj} , I_s et V_{dc}	60

LISTE DES TABLEAUX

Nombre de tableau	Titre	Page
Tableau (I.1)	Limites des distorsions des tensions au Pcc (IEEE 519-1996).	15
Tableau(II.1)	Influence des paramètres sur le comportement du FAP	37
Tableau (III.1)	Tensions fournies par l'onduleur sous formes vectorielles	54
Tableau (III.2)	Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée	56

LISTE DES SYMBOLES

U_f	La tension de fourniture(V)
U_n	La tension nominale de réseau électrique (V).
h ou k	La range des harmoniques.
f_h	La fréquence de la composante harmonique de rang h (H_z)
f_1	La fréquence de la composante fondamentale(H_z)
f, f_s	La fréquence fondamentale du réseau(H_z)
S(t)	Un signal périodique peut représenter un courant(A)ou une tension (V).
T	Un période (S)
ω, ω_s	La pulsation de réseau (rad/s)
a_0	Composante continue de la signal S(t) périodique
a_n, b_n ou a_h, b_h	Sont les coefficients de la série de Fourier
C_h	L'amplitude l'harmonique de rang h
θ_h	Phase de l'harmonique de rang h($^\circ$)
C_{eff}	La valeur efficace de l'amplitude l'harmonique de rang h
S_{eff}	La Valeur efficace d'une grandeur d'harmonique
S_{effh}	Les valeurs efficaces des différentes harmoniques du signales
S	La puissance apparente (VA)
P	La puissance active (W)
Q	La puissance réactive(Var)
D	La puissance déformante
V	La tension (V)
I_{effh}	La valeur efficace du courant de l'harmonique(A)
φ_1	Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente(degré).
γ	Le déphasage entre et S.
S_1	la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire
φ	Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S
N	Un nombre de convertisseur triphasé
P	Indice de pulsation
M	Sera à indice de pulsation
f_r	Fréquence de résonance (H_z)
L	L' inductance(H)
C	le condensateur(F)
R	Le résistance(R)
i_{inj}, i_f	Courant injecte dans la réseau par filtre actif parallèle(A)
v_{inj}	Tensions injecte dans la réseau par filtre actif série (V)
I_d	Le courant de charge coté continu(A)

U_d	La tension de charge coté continu(V).
P_{CC}	Point de couplage commun
i_{ca}	Courant de la charge active (A).
i_{cr}	Courant de la charge réactive(A)
i_h	Courant de la charge harmonique(A)
$i_f\{1,2,3\}$	Le courant fournit par le filtre actif (A)
$i_s\{1,2,3\}$	Le courant fournit par la source(A)
$L_c\{1,2,3\}$	Inductance du réseau coté charge (H)
$R_c\{1,2,3\}$	Résistance du réseau coté charge(Ω)
$R_s\{1,2,3\}$	Résistance du réseau coté source(Ω)
$L_s\{1,2,3\}$	Inductance du réseau coté source(H)
$e_s\{1,2,3\}$	Tensions simples du réseau au début de la ligne (V)
$R_f\{1,2,3\}$	Les résistances de couplage(Ω)
$L_f\{1,2,3\}$	Les inductances de couplage(H)
$v_s\{1,2,3\}$	Tension de source(V)
v_{dc}	Tension aux bornes du condensateur(V)
i_{dc}	Courant aux bornes du condensateur(A)
C_{dc}	Capacité du condensateur (F)
$S\{1,2,3,4,5,6\}$	Etats des interrupteurs de l'onduleur
C_f	Capacité de filtre de sortie(F)
N	La neutre
$C\{1,2,3\}$	Etats logiques de la commende de l'onduleur
α, β	Paramètres du repère de Clark
f'_c	La fréquence de commutation des interrupteurs du filtre actif.(Hz)
Δv_{dc}	Différence entre les tensions du condensateur
$v_{dc_{max}}$	Tension maximale aux bornes du condensateur(V)
$v_{dc_{min}}$	Tension minimale aux bornes du condensateur(V)
ω_h	La pulsation la plus faible des harmoniques à compenser (rad/s)
$v_{f_{max}}$	La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur(V)
$v_{s_{max}}$	La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre(V).
ΔT	La période de variation du courant du filtre
f_{ond}	La fréquence de variation du courant du filtre
α	La pente de la porteuse triangulaire
ε	L'amplitude de l'onde triangulaire
f_c	Fréquence de coupure (Hz)
$i\{\alpha, \beta, 0\}$	Courants du réseau électrique dans le repère stationnaire(A)
$v_s(\alpha, \beta, 0)$	Tensions estimées du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère stationnaire(V).

$i_{ch}\{1,2,3\}$	Courants de charges(A).
i_n	Courant du neutre (A)
i_0	Courant homopolaire(A).
$P(t)$	Puissance réelle(W)
$p_0(t)$	Puissance homopolaire(W)
$q(t)$	Puissance imaginaire
\bar{p}, \bar{q}	Puissance continue liée à la composante fondamentale du courant et de la tension.
\tilde{p}, \tilde{q}	Puissances alternatif correspondantes à la somme les composantes perturbatrices du courant et de la tension
Δ	Déterminé $v_{sa}^2 + v_{s\beta}^2$
$I_{réf}$	Courant de référence (A)
$I_{hréf}\{1,2,3\}$	Courants de référence du réseau électrique(A)
$I_{hréf}(\alpha, \beta, 0)$	Courants de référence du réseau électrique dans le repère stationnaire (A).
K	Constante du FMV.
$X_{\alpha\beta}$	L'entrée mesurée.
\bar{i}_d, \bar{i}_q	Courant continu (A)
\tilde{i}_d, \tilde{i}_q	Courant alternatif(A)
$v_{s\{d,q,0\}}$	Tensions estimées du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère Park(V).
θ_d	La phase instantanée réelle de la tension direct
$\hat{\theta}_d$	L'angle de rotation estimé
$v_{d-réf}$	Tension simple directe de référence (V).
φ_d	L'angle de la composante directe de la tension du réseau
ω_d	Pulsation de réseau direct(rad/s).
$\hat{\omega}_d$	Pulsation de réseau direct estimé(rad/s)
v_m	Amplitude maximale de tension simple(V)
$I_{f-réf}\{1,2,3\}$	Courants de filtre de référence(A)
P_c	Puissance active consommée par la charge.
v_p	L'amplitude de la porteuse triangulaire (V)
R_{ch}, L_{ch}	Charge non-linéaire
L_{tot}	Inductance totale de ligne(H)
i_{chmoy}	Le courant moyen de la charge non linéaire(A).
i_{chfond}	Le courant fondamental de la charge (A)
Z_n	L'impédance nominale du réseau(Ω)
Z_{cc}	L'impédance de court-circuit du réseau(Ω)
Z_f	L'impédance de filtre actif (Ω)
I_{ms}	La valeur efficace de courant(A)
V_{CES}	Tension maximale au bornes du composant(V)
V_{GES}	Tension de grille(V)

I_c	Courant au bornes du composant(A)
I_{CM}	Courant maximale au bornes du composant(A)
V_{INmax}	Tension d'entrée maximale sans filtre/avec filtre(V)
C_{qvi}	Condensateur de filtrage
V_c	Tension de commande
P_I	Consommation de courant de l'alimentation
T_{max}	Température maximale de fonctionnement
R_g	Une résistance de grille(Ω)
I_h	Amplitude du courant harmonique (A)
I_L	Courant maximal demandé par la charge(A_{rms})
I_{SC}	Courant de court-circuit (A)
U	La tension continu(V)

LISTE DES ABREVIATIONS

THD	En anglais: Taux de Distorsion Harmonique
IGBTs	En anglais: Isolâtes Gâte Bipolaire Transistor
MOSFETs	En anglais: Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor
GTO	En anglais: Gate Turn-Off Thyristor
Fp	Facteur de puissance
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion (En anglais: PWM, Pulse Width Modulation).
VSC	Onduleur de tension ou (En anglais: Voltage Source Converter).
FAP	Filtre Actif Parallèle
FAS	Filtre Actif Série.
UPQC	En anglais: Unified Power Quality Conditioner
IEEE	En anglais: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
CEI	En anglais: Commission Electrotechnique Internationale
IGBT	En anglais: Isolated Gate Bipolar Transformer
PLL	En anglais: Phase -Locked Loop (Boucle de verrouillage de phase).
FFT	La Transformée de Fourier Rapide
DFT	La Transformée de Fourier Discrète
RDFT	La transformée de Fourier discrète récursive.
PIRI	Puissance Instantanée Réelle et Imaginaire
TCD	Transformation de Concordia Directe
SRF	Théorie du Référentiel lié au Synchronisme
PID	Régulateur :Proportionnelle Intégral, Dérivation
F.e.m.	Force électromotrice
FPH	Filtre Passe Haut
FPB	Filtre Passe Bas
FMV	Filtre Multi-Variable
BT	Basse Tension
MT	Moyenne Tension
RTI	Real Time Interface
E/S	Entrée/Sortie
PC	Personal Computer
TTL	Transistor-Transistor Logic.
CAN	Convertisseur Analogique Numérique
CNA	Convertisseur Numérique Analogique
PD3	Un redresseur triphasé en pont Gréât
TDD	Total Demand Distortion

INTRODUCTION GENERALE

L'électronique de puissance est un domaine relativement nouveau et en pleine croissance. Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance (On appelle ces dispositifs des charges non-linéaires) dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ces perturbations sont générées par les charges non-linéaires connectées au réseau, comme exemple, on cite notamment les équipements à charge déséquilibrée et les convertisseurs statiques (redresseurs et cyclo-convertisseurs). Ces charge non-linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux, même si elles sont alimentées par une tension sinusoïdale, elles se comportent par conséquent comme des générateurs des harmoniques et échangent en plus l'énergie réactive provenant des dysfonctionnements au niveau des équipements électriques.

L'utilisation de ces convertisseurs a donné naissance à de nombreuses applications nouvelles comme: la commande électrique des moteurs, les alimentations de secours de puissance, le chauffage par induction électrique, les applications dédiées à la traction électrique, la compensation des harmoniques...etc.

Les harmoniques engendrées par ces charges non linéaires circulent dans les réseaux électriques et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voire même engendrer leur destruction. Ces effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé tant pour le distributeur que pour les utilisateurs. C'est pour ces raisons que le filtrage des distorsions en courant et en tension est au centre des préoccupations actuelles à la fois des fournisseurs , et des utilisateurs d'énergie électrique; ils adoptent donc, les uns comme les autres, les limites proposées par les normes IEEE, CEI. Donc il est nécessaire de réduire ces harmoniques pour protéger le réseau électrique contre cette pollution harmonique. Actuellement, il existe un certain nombre de solutions techniques pour éliminer ou réduire les effets liés à une mauvaise qualité de l'énergie. Il s'agit là d'un domaine très riche tant en innovations qu'en développement [3].

On peut distinguer deux principaux types des filtres, les filtres passifs qui sont beaucoup utilisés, mais qui présentent certains inconvénients du fait que les harmoniques couvrent un domaine fréquentiel large et fluctuant. En outre, ils peuvent présenter des risques d'apparition de résonance avec le réseau auquel ils sont connectés. Pour toutes ces raisons et des raisons d'encombrement, une autre solution de dépollution des réseaux électriques a été proposée, se sont les filtres actifs. Telle que le développement récent des semi-conducteurs de puissance

entièrement commandables, tels que les IGBT, à permis à la conception de nouvelles structure, comme les filtres actifs de puissance, pour minimiser ces courants harmoniques.

Les filtres actifs sont un moyen efficace pour la compensation des harmoniques de courants ou de tensions générés par des charges non-linéaires. Ils compensent, en temps réel, les perturbations dues à une charge non-linéaire en injectant sur le réseau les harmoniques et le réactif du courant consommé par la charge afin que le réseau n'est plus qu'à fournir un courant sinusoïdal et en phase avec la tension.

Les filtres actifs plus souples et moins encombrants, sont basés essentiellement sur les onduleurs de tension avec une commande appropriée (MLI, hystérésis...). Ils comportent deux fonctions principales; une fonction d'identification des courants harmoniques des références et une fonction de commande d'onduleur pour injecter des courants de compensation, aussi bien la régulation du bus continue.

L'objectif de notre travail est d'étudier le concept du filtre actif en parallèle de puissance pour objectif de dépolluer les réseaux électriques par compensaion des harmoniques produits dans le réseau (diminution du taux de distorsion d'harmonique totale), et parfois l'énergie réactive consommée par les charges non-linéaires afin d'obtenir un courant du réseau s'approchant le plus possible du signal sinusoïdal et l'amélioration du facteur de puissance. Puis, nous allons réalisé ce filtre actif par simulation.

Ce mémoire a été structuré comme suit:

- ❖ Dans le premier chapitre, nous présentons les perturbations des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes. Ensuite, les origines/les conséquences de cette pollution harmonique avec la citation des normes et réglementations imposées aux utilisateurs, ainsi que les solutions classiques et modernes pour la réduction des harmoniques.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, sera consacré au structure du filtre actif parallèle de puissance ainsi que son principe de fonctionnement. Nous avons présenté les différents méthode d'identifications des courants harmoniques des références, les principaux types de commande d'onduleur, et la régulation de bus continue.
- ❖ Dans le troisième chapitre, la modélisation de l'ensemble, réseau-charge polluante-filtre actif, est d'abord présenté, ensuite les résultats de simulation obtenus à partir l'environnement Matlab/Simulink. En fin de ce mémoire nous présentons une conclusion générale de cette étude.

CHAPITRE I

PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES ET PRINCIPES DE COMPENSATION

CHAPITRE I

PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES ET

PRINCIPES DE COMPENSATION

I.1 Introduction

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré. La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des perturbations et des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers . Afin d'éviter le dysfonctionnement, la destruction des composants du réseau électrique, il est indispensable de comprendre l'origine de ces perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer.[1-2]

Pour cela ce présent chapitre va aborder les différents types de perturbations et leurs effets néfastes sur la qualité de l'énergie électrique et sur la forme d'onde de la tension et le courant du réseau électrique , ensuite , d'étudier les perturbation d'harmonique en commençant par leurs origines, conséquences et les caractéristiques de ces harmoniques. Par suite, nous parlerons sur les normes et les réglementations imposées aux utilisateurs. Ensuite, nous allons discuté sur les solutions traditionnelles et modernes utilisées pour atténuer ces problèmes liés aux perturbations harmoniques. Finalement, nous exposerons le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle, ce filtre est développé tout au long de cette mémoire.

I.2 Qualité de l'énergie électrique

I.2.1 Définition

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement, toutefois, cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes: d'une part, les perturbations de courant causées par le passage dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs et d'autre part les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques, déséquilibrés et les creux de tension. [3]

L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tension sinusoïdale.

Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- La fréquence.
- L'amplitude.
- La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif

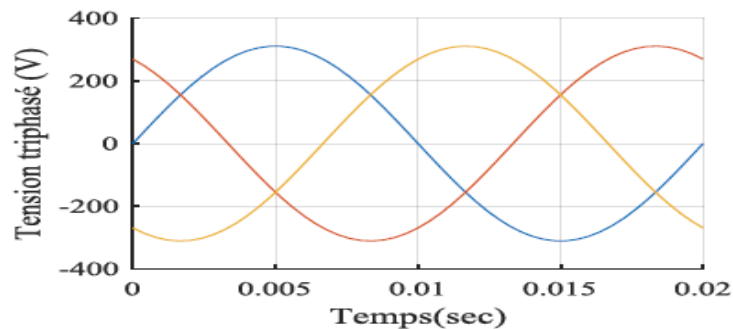


Fig.(I.1): Système de tension triphasé équilibré.

I.3 Les Perturbations électriques

Les perturbations sont l'ensemble des phénomènes internes ou externes au réseau ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et/ou en forme les grandeurs électriques du réseau (courant, tension, fréquence). Ces perturbations peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie. Elles peuvent aussi être classées selon quelles soient permanentes, semi-permanentes ou aléatoires (foudre, court-circuit, manœuvre...) . [4] Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par [2].

I.3.1 Creux et coupures de tension

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.). Une coupure de tension quand à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. [3]

La figure (I.2) montre un exemple de creux et de coupure de tension.

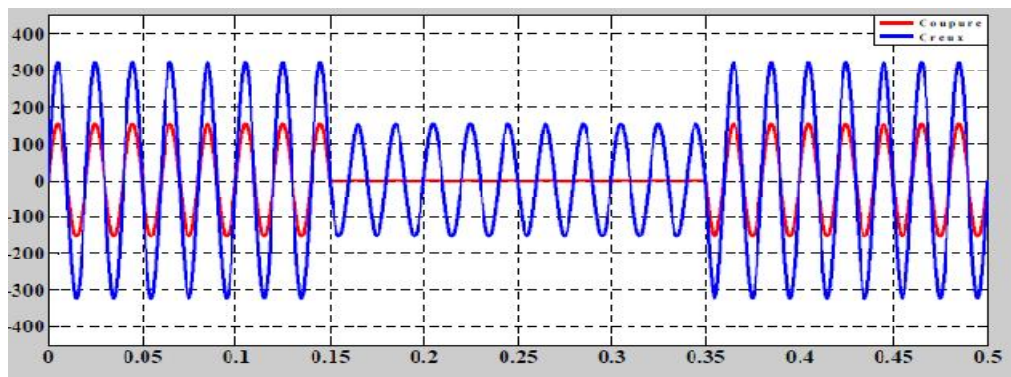


Fig (I.2): Creux et coupures de tension.

Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension:

- ✓ Les creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.).
- ✓ Les creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, protection de branches sur les lignes aériennes...etc.).

I.3.2 Fluctuations des tensions

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (I.3). [3]

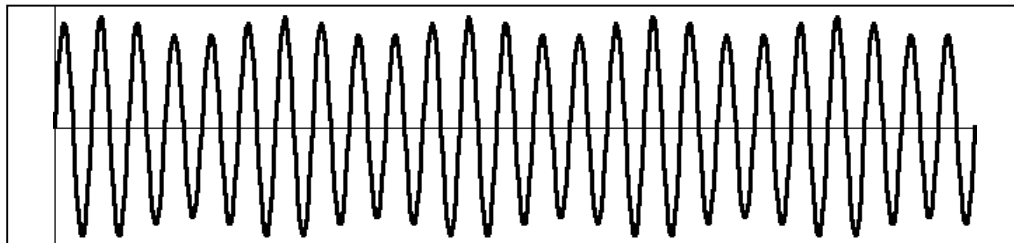


Fig (I.3) : Fluctuations de tension.

I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé (voir la figure (I.4)).

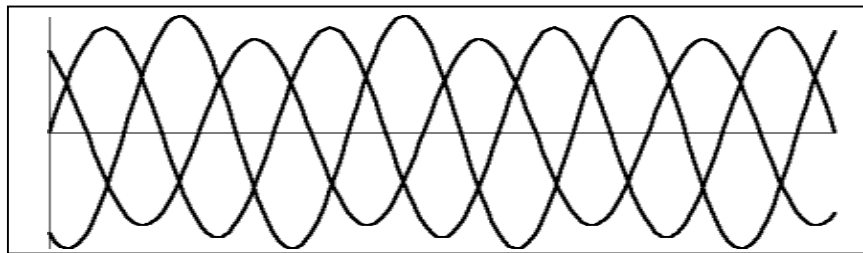


Fig (I.4) : Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. [3]

I.3.4 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure (I.5)).

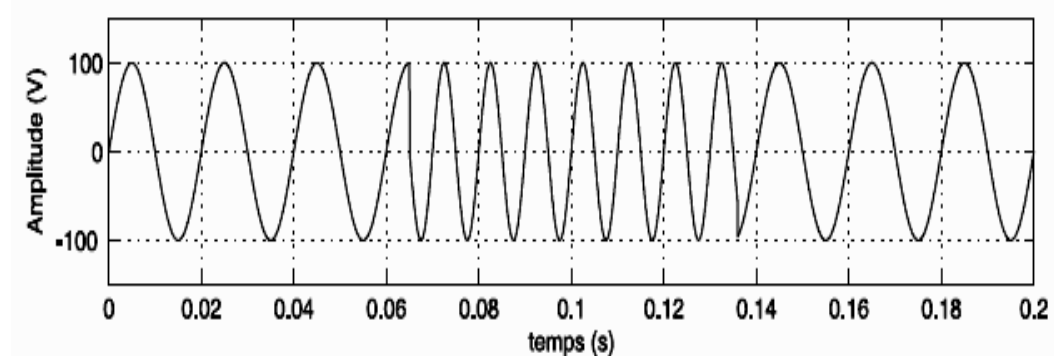


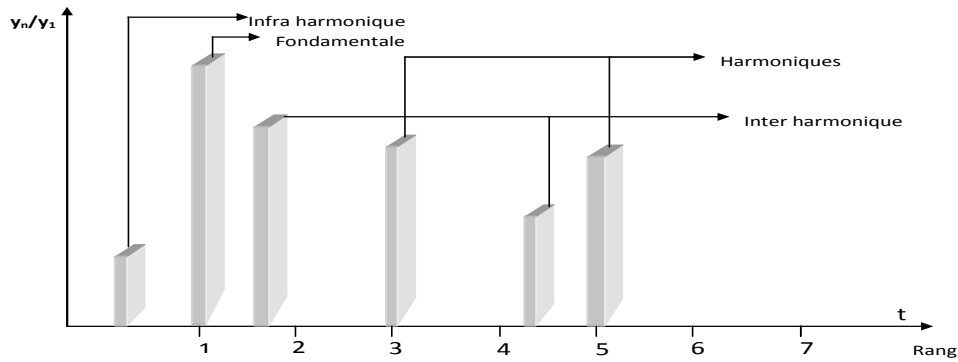
Fig (I.5) : Variation de fréquence

Au niveau des réseaux de distribution ou de transport cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente lors que de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$. [3]

I.3.5 Harmonique et inter-harmonique

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. La figure (I.6) montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électrique est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors.

Les interharmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des interharmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande. [3,5]



Fig(I.6) : Harmoniques et interharmoniques

I.3.5.1 Les perturbations harmoniques

I.3.5.1.1 Origines et sources d'harmonique

Les harmoniques sont générées par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc.

I.3.5.1.2 Conséquence des harmoniques

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donner lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types : les effets instantanés et les effets à terme [3,5].

I.3.5.1.2.1 Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques** : En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.

- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs** : Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.
- **Erreurs dans les appareils de mesure** : Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.
- **Vibrations et bruits** : Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

I.3.5.1.2 .2.Effets a terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

- **Echauffement des câbles et des équipements** : Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du suréchauffement du neutre et les matériels bobines comme les transformateurs ou les moteurs.
- **Echauffement des condensateurs** : L'échauffement est cause par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- **Echauffement du aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs** : Echauffement cause par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétiques) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.

Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques.

I.4 Grandeurs et caractéristiques des harmoniques

I.4.1 Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental. [06]

I.4.2 Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence fn à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50Hz)

$$n = \frac{fn}{f_1} \quad (\text{I.1})$$

I.4.3 Série de Fourier

La signal $S(t)$ de la figure(I.2) peut représenter un courant ou une tension. Il est périodique de période T , donc de fréquence et de pulsation:

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{I.2})$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{I.3})$$

Ce signal s'écrit selon la décomposition suivant:

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(h\omega t) + b_n \sin(h\omega t)) \quad (\text{I.4})$$

Avec :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^t S(t) dt \quad (\text{I.5})$$

$$\text{Pour } h \geq 1 : a_n = \frac{1}{T} \int_0^t S(t) \cdot \cos(h\omega t) dt \quad (\text{I.6})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^t S(t) \cdot \sin(h\omega t) \cdot dt \quad (\text{I.7})$$

On peut écrire:

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(h\omega t + \theta_n) \quad (\text{I.8})$$

$$\text{avec :} \quad \theta_n = \arctan(a_n/b_n) \quad (\text{I.9})$$

On définit les fréquences d'harmoniques $h f$ comme les fréquences multiples de la fréquence fondamentale « f ». Leur rang h est tel que :

$$f_n = f * h \quad (\text{I.10})$$

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (\text{I.11})$$

La grandeur C_h est l'amplitude l'harmonique de rang h . Il faut noter qu'on utilise très souvent le terme amplitude pour désigner la valeur efficace harmonique donnée par:

$$C_{neff} = \frac{C_n}{\sqrt{2}} \quad (\text{I.12})$$

a_0 : Composante continue de la tension $S(t)$ périodique.

θ_n : Phase de l'harmonique de rang h .

I.4.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative ($y(t)$) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^t Y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2} \quad (\text{I.13})$$

On note qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée (> 1 kHz).

I.4.5 Taux de distorsion

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n Y_n^2}}{Y_1} \times 100 \quad (\text{I.14})$$

Y_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

Y_n : Les valeurs exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

I.4.6 Facteur de puissance

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements. Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D) entre en considération. Elle est donnée par la relation :

$$D = V \cdot \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{sn}^2} \quad (\text{I.15})$$

Le facteur de puissance est donc égal :

$$FB = \frac{p}{s} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.16})$$

$$\text{Avec : } P = V \cdot I_{s1} \cos(\phi_1) \quad (\text{I.17})$$

$$Q = V \cdot I_{s1} \sin(\phi_1) \quad (\text{I.18})$$

On peut aussi calculer le facteur de puissance de la manière suivante :

$$FP = \frac{V \cdot I_{s1} \cos(\phi_1)}{V \cdot I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos(\phi_1) \quad (\text{I.19})$$

On constate que la puissance déformante et la puissance réactive contribuent à la dégradation du facteur de puissance. [06]

I.4.7 Spectre d'harmonique (de fréquence)

Un signal déformé comporte généralement plusieurs harmoniques. On représente souvent ce signal sous la forme d'un spectre, c'est-à-dire à l'aide d'un schéma où l'on porte en abscisse la fréquence et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pourcent). Comme il est représenté sur la figure (I.7) [20].

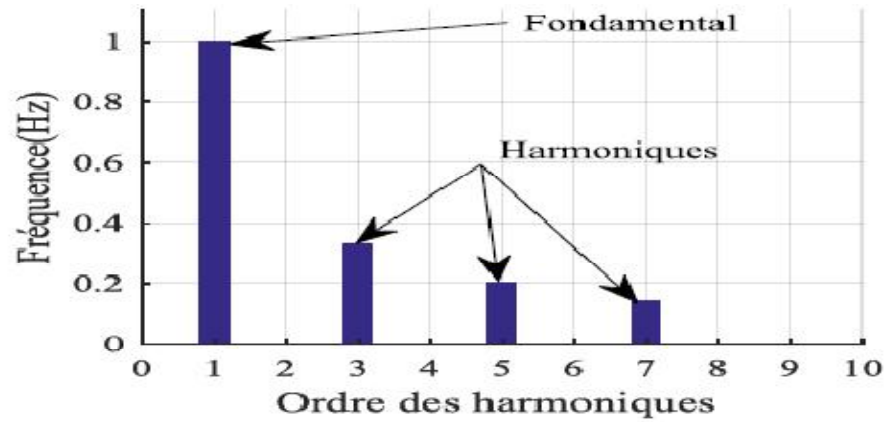


Fig.(I.7): Le spectre harmonique du courant de charge polluante.

I.4.8 Charges linéaires et non-linéaires

Une charge est dite linéaire lorsque son impédance est constant, le courant qu'elle absorbe est alors sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdal.

Une charge non-linéaire lorsque son impédance varie au cours d'une même période, le courant qu'elle absorbe n'est pas sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdal

I.5 Normes et réglementation de perturbation

Pour éviter tous les désagréments générés par la présence de courants et de tensions harmoniques sur le réseau et pour préserver la pollution du réseau, les utilisateurs sont de plus en plus tenus de respecter un certain nombre de normes .

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont la *CEI* et l'*IEEE*. Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées [7].

- La Commission Electrotechnique Internationale (*CEI*) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (*CEI 61000*). Nous pouvons citer a titre d'exemple:
 - *CEI 61000-2-2* qui définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension.

- CEI 61000-3-2 qui définit les limites d'émissions de courant harmonique par les appareils consommant moins de 16A par phase.
 - CEI 61000-2-4 qui définit les niveaux de compatibilité dans les réseaux d'installations industrielles [9],[10].
- La norme principale de l'IEEE est:
- IEEE 519-1996 qui définit les limites des perturbations des tensions et courant au Pcc . Le tableau (I.1) indique ces limites des distorsions des tensions.

Tableau (I.1): Limites des distorsions des tensions au P_{cc} (IEEE 519-1996).

Niveau des tension au P_{cc}	Taux individuel d'harmoniques(%)	Taux de distorsion global THD(%)
$V_n \leq 69kV$	3	5
$69kV \leq V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n \geq 69kV$	1	1.5

I.6 Les solutions traditionnelles

Sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques. [3]

I.6.1 Transformateur à couplage spécial

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Cette solution limite, au contraire, la puissance disponible de la source, et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques. [8]

I.6.2 Pont dodécaphasé

Un convertisseur composé de convertisseurs triphasés élémentaires à indice de pulsation p , sera à indice de pulsation m , si les convertisseurs élémentaires sont alimentés par des tensions dont les déphasages sont en progression arithmétique de $\frac{2\pi}{mp}$.

La figure (I.8) illustre un exemple pour $p=6$ et $m=2$ un convertisseur à indice de pulsation égal 12. Ce convertisseur (un redresseur triphasé en pont Gréât U) appelé dodécaphasé, ce montage ne laisse que les harmoniques $12k \pm 1$ au primaire du transformateur. Nous obtiendrons le même résultats en utilisant deux transformateurs ayant respectivement pour montage triangle-étoile et étoile-étoile, cependant, cette solution augmente l'impédance de la ligne et par voie de conséquence la distorsion harmonique de tension. En plus, le nombre des semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse

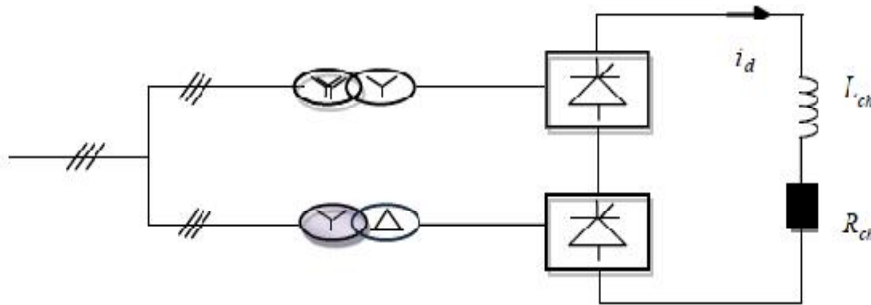


Fig.(I.8): Structure du pont dodécaphasé.

I.6.3 Sur dimensionnement ou déclassement des installations électriques

On procède généralement au sur dimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'a git pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par cette approche, les problèmes lies à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée. Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas le profit du potentiel réel de l'installation. [11]

I.6.4 Agir sur la structure de l'installation

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur (figure (I.9)). Une alimentation par câble distinct est préférable [12]

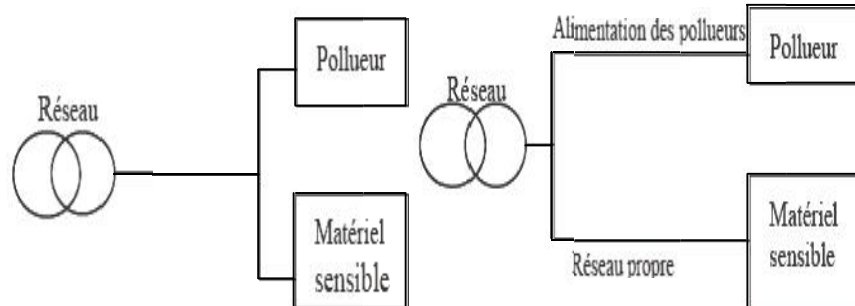


Fig (I.9): Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles

I.6.5 Inductances (selfs) série

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse), et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non-linéaire. Peu onéreuse, la self a cependant efficacité limitée. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [12].

I.6.6 Filtres passifs d'harmoniques

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer, donc il se comporte comme un court circuit pour l'harmonique considéré. Un filtre comprend donc une série de « gradins » qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés.

On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges.

Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie [13]

Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace. L'efficacité de ces filtres se trouve dégradée par la présence de certains facteurs :

- ✓ Insuffisante habilité à couvrir une large bande de fréquence qui nécessite l'installation de plusieurs filtres.

- ✓ Naissance de résonances séries et parallèles avec le réseau qui conduit à l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle de la résonance.
- ✓ La forte dépendance de l'impédance et de la fréquence du réseau.
- ✓ Equipements volumineux . [3]

I.6.6.1 Filtre résonant

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur la figure (I.10) montre clairement le montage de ce dernier .[10]

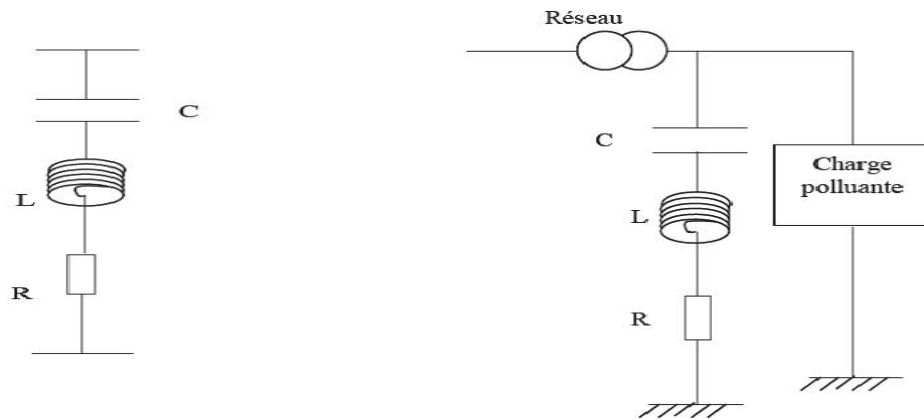


Fig (I.10):Structure du filtre résonant

Cette solution consiste 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 des éléments inductifs et capacitifs. En effet ces circuits, pour chaque paire (L, C), ont une fréquence dite de résonance où l'impédance du circuit est très basse, L'impédance se résume aux résistances internes des éléments, cette fréquence est définie par

$$f_r = \sqrt{1/LC} \quad (\text{I.20})$$

I.6.6.2 Filtre amorti

Un filtre amorti est composé d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquence du spectre et non une fréquence particulière, c'est un filtre passe haut [14].

La figure (I.11) montre le montage de ce type de filtre.

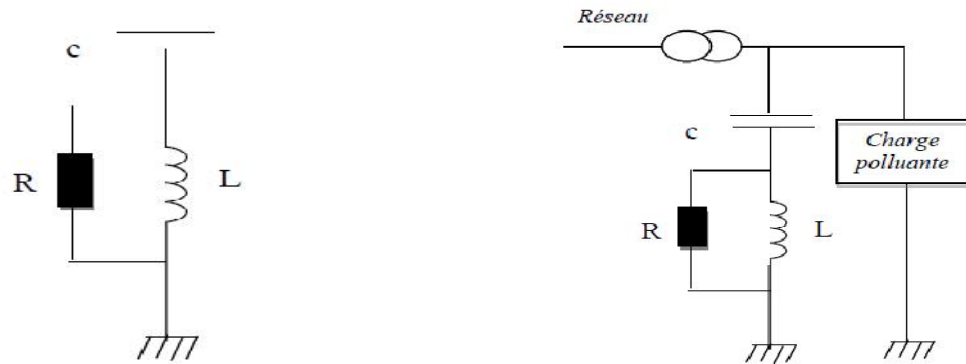


Fig. (I.11): Structure du filtre amorti

I.6.6.3 Les avantages et les inconvénients des filtres passifs

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance. Cependant il présente les inconvénients suivants:

- L'impédance du réseau en présence des filtres passifs peut faire apparaître des résonances.
- Le filtrage passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires et dans ce cas, le filtre passif peut être surchargé.
- Le filtrage passif est peu flexible et, en cas de modifications dans le réseau, il peut avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage.
- La conception des filtres passifs doit considérer la tolérance de fabrication et les dérives paramétriques qui apparaissent à l'usage.

Ainsi, avant d'installer un filtre de ce type, une étude détaillée doit être menée afin d'analyser, cas par cas, les risques de résonance et de surcharge. [10]

I. 7 Solutions modernes de dépollution

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs tel que les *IGBTs*, *MOSFETs*, commutant des puissances de plus en plus élevées à des fréquences plus importantes, a permis de trouver de nouvelles solutions aux problèmes de perturbations des réseaux. Les inconvénients des solutions classiques telle que le filtrage passif (antirésonance, surcharges et forte dépendance de l'environnement,...) ont conduit à la conception de nouvelles structures "auto-adaptatives" pour la suppression des harmoniques appelées filtres actifs

Le principe du filtrage actif est l'injection de courants (ou des tensions) harmoniques en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser: courants harmoniques absorbés par la charge et/ou de tensions harmoniques présentes sur le réseau [15] . Parmi ces moyens modernes, nous pouvons citer:

1.7.1 Filtrage actif

Les solutions traditionnelles précédemment citées pour l'amélioration de la qualité de l'énergie, et particulièrement pour la dépollution harmonique peuvent avoir plus d'inconvénients que d'avantages, c'est pourquoi aujourd'hui le filtrage actif est la solution la plus souhaitable, surtout pour le filtrage harmonique .

Depuis la mise en œuvre de leur principe de base en 1970s, les filtres actifs des harmoniques ont attiré l'attention des chercheurs de l'électronique de puissance qui se sont intéressés à la pollution harmonique dans les systèmes d'alimentation. Particulièrement, les filtres actifs ont été stimulés par l'apparition des composants d'électronique de puissance comme les thyristors (*GTO*) et les transistors (*IGBT*). Les filtres actifs modernes sont plus performants du point de vue qualité de filtrage, plus petits dans la taille physique, et plus flexibles dans l'application par rapport aux filtres passifs conventionnels qui utilisent les condensateurs, les inductances et les résistances.

Cependant, les filtres actifs sont légèrement inférieurs dans le coût et l'efficacité par rapport aux filtres passifs, même actuellement. [15-16]

La filtre actif feront l'objet d'une étude approfondie tout au long de cette mémoire.

1.7.1.1 Le principe de fonctionnement du filtre actif

Les principes de base des filtres actifs (compensation active) pour les harmoniques perturbateur sont été proposés autour de la décennie de 1970s. Depuis, beaucoup de recherches ont été développées sur ces systèmes et leurs applications pratiques.

Un filtre actif de puissance se compose d'un onduleur commandé par modulation de largeur d'impulsion (*MLI/PWM*) par exemple, connecté au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passif, et d'un bus continu.

Ce convertisseur *PWM* constituant le filtre actif peut avoir deux structures différentes en fonction de l'élément de stockage du bus continu. Le convertisseur de type tension (onduleur de tension) ou *VSC (Voltage Source Converter)* utilise un condensateur pour stocker l'énergie au niveau du bus *DC* et imposer ainsi la nature source de tension à l'entrée de l'onduleur. Le condensateur peut être remplacé par une inductance, qui joue alors le rôle d'une source de

courant continu. Dans ce cas, ce type de convertisseur prend la dénomination d'onduleur de courant [21].

Ce système commandé en courant ou en tension est alors capable de reproduire et d'injecter dans le réseau des composantes de tension ou de courant équivalentes, mais en opposition de phase aux composantes indésirables les générées par les charges polluantes afin de les éliminer. Un filtre actif peut être raccordé au point de raccordement commun pour une compensation globale ou individuelle.

On peut classer les filtres actifs selon plusieurs critères, comme sa configurations par rapport au réseau, le type d'onduleur qu'il utilise, le nombre de file. Concernant la configuration par rapport au réseau on distingue:

- Le filtre actif parallèle (*FAP*): conçu pour compenses toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive;
- Le filtre actif série (*FAS*): conçu pour compenses toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension;
- La combinaison parallèle-série actif: solution universelle pour compenses toutes les perturbations en courant et en tension.

I.7.1.a Filtre actif parallèle (FAP)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (I.12), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle 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 [18]

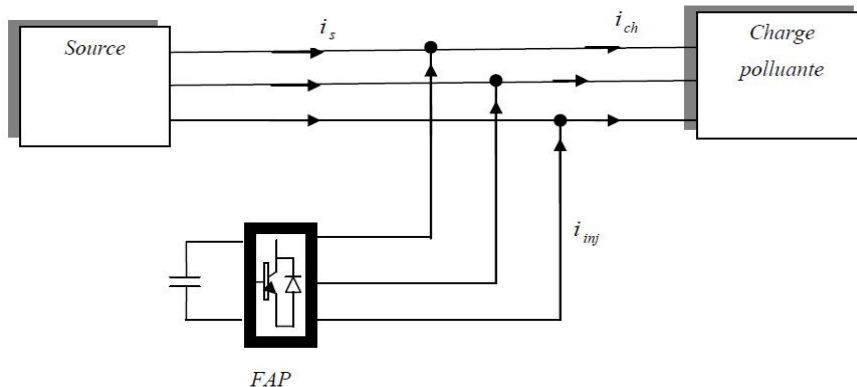


Fig (I.12):Montage du Filtre actif parallèle

I.7.1.b. Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série engendre des tensions harmoniques V_h dont la somme avec la tension réseau V_s est une onde sinusoïdale (figure (I.13)). Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions.

En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [17]

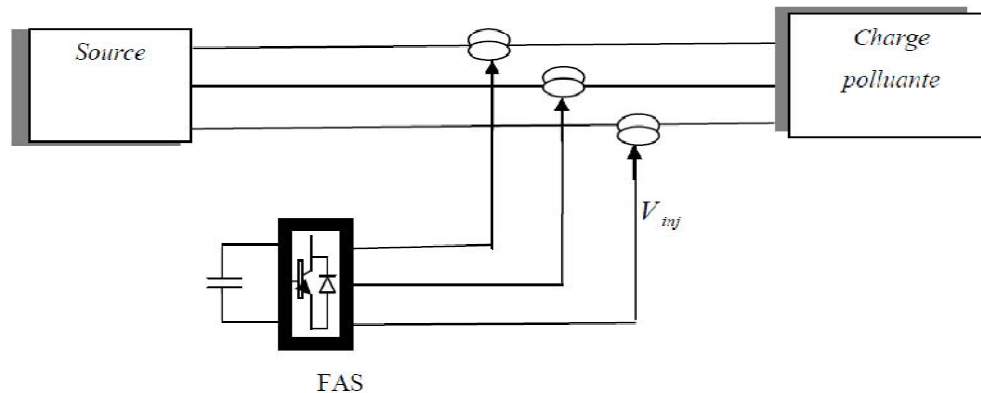


Fig (I.13):Montage du Filtre actif série

I.7.1.c Combinaison parallèle série actif

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série (figure (I.14)). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actifs ou United Power Qualité Conditionner. Il possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [3]

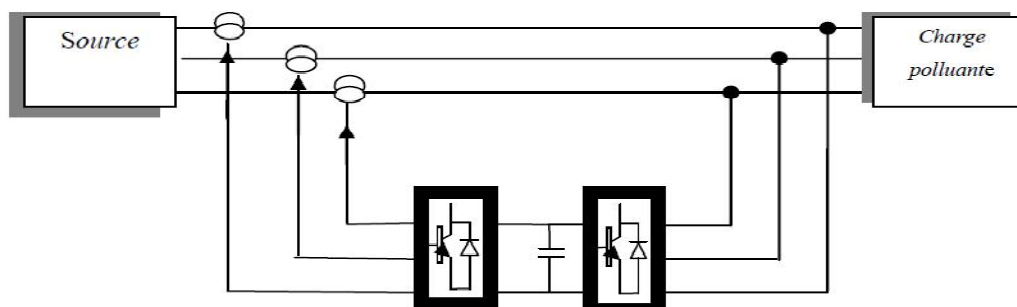


Fig (I.14):Montage du Filtre actif série-parallèle

I.7.1.2 Les avantages et les inconvénients du filtre actif:

Le filtre actif offre de nombreux avantages:

- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante);
- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau;
- Il est insensible à la variation des caractéristiques du réseau;
- Il n'y a aucun risque de surcharge lorsque le niveau de pollution harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif, puisque il fonctionne au maximum de ses capacités et tout risque de destruction est écarté;
- La compensation de la puissance réactive est envisageable;
- Le risque de résonance (amplification des harmoniques) entre filtre et impédance du réseau, qui existe avec un filtre passif est supprimé.

Toute fois, le filtrage actif présente quelques inconvénients:

- Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance;
- Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif;
- Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtre passif [23].

I.7.2 Filtrage hybride

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif.

L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques; le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc d'optimiser le rapport performance / coût et d'avoir une meilleure tenue en tension[14]

On a plusieurs structures de filtre hybride par exemple :

- ✓ Le filtre actif série connecter en série avec des filtres passifs parallèles.
- ✓ Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- ✓ Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

I.7.2.a Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Il empêche les courants harmoniques de circuler vers le réseau et les oblige à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme montre la figure (I.15.a) [22].

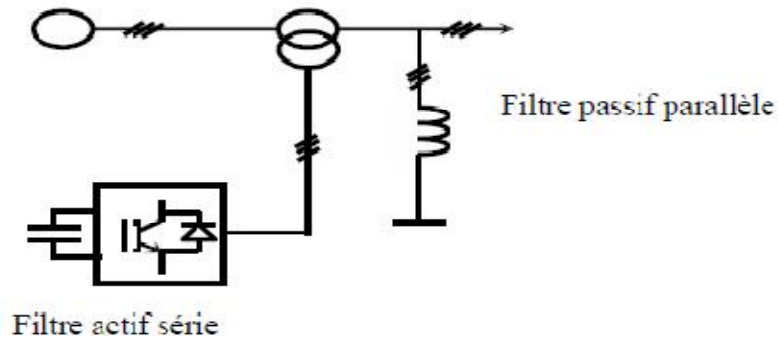


Fig.(I.15.a): Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.

I.7.2.b Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure (I.15.b), 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 [23].

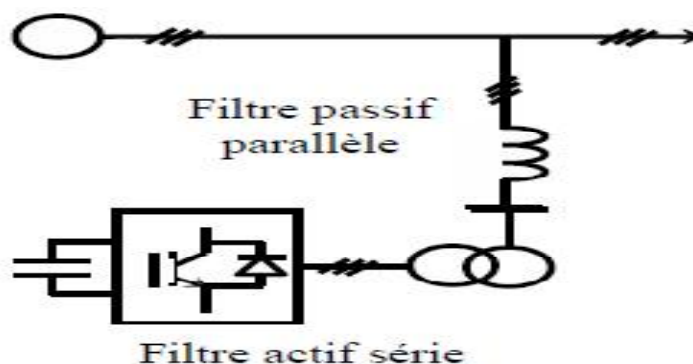


Fig.(I.15.b): Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

I.7.2.c Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans configuration, montrée en figure (I.8.c), est la compensation des courants 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 cyclo-convertisseur de forte puissance [21].

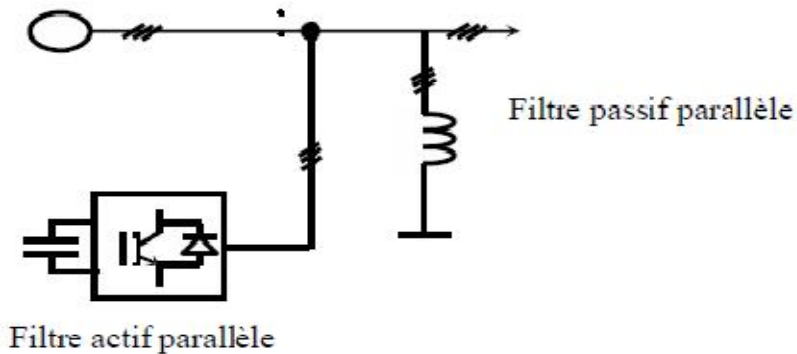


Fig.(I.15.c): Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

I.7.3 Les redresseurs MLI

Les redresseurs à MLI sont des onduleurs exploitant leurs réversibilités en courant dans le deuxième mode de fonctionnement. Grâce à la commande MLI, ces convertisseurs peuvent prélever des courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et assurer aussi un facteur de puissance unitaire. Selon le type d'onduleur utilisé, nous distinguons deux structures de redresseurs à MLI [21]:

- Redresseur à MLI de courant;
- Redresseur à MLI de tension.

I.7.3.a Les redresseurs MLI de courant

La tension U_d étant unidirectionnelle, la réversibilité de la puissance active est assurée par le courant I_d , qui est bidirectionnel. Le contrôle de la puissance réactive est réalisé par action indirecte sur la phase du fondamental de courant du réseau.

Les inductances L_s servent dans la figure (I.16.a) à découpler le convertisseur de réseau car les deux réseaux alternatifs et continus sont tous deux sources de tension.[19]

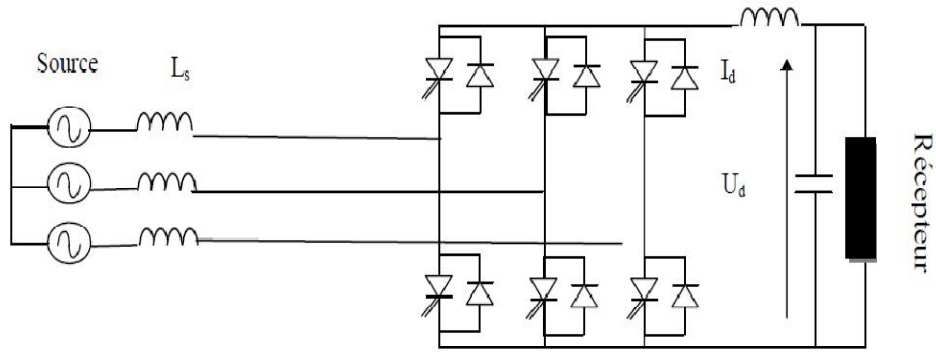


Fig.(I.16.a): Redresseur à MLI de courant

I.7.3.b Les redresseurs MLI de tension

Le redresseur à *MLI* de tension est basé sur une structure d'onduleur de tension représenté sur la figure (I.16.b). Chaque interrupteur est constitué d'un *IGBT* (composant commandé à l'amorçage et au blocage) et d'une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Ainsi, ce convertisseur de part sa structure est réversible en courant. Il peut donc contrôler de façon instantanée la forme d'onde des courants prélevés sur le réseau. Il alimente alors une charge (active ou passive) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant absorbé étant sinusoïdal et, éventuellement, en phase avec la tension réseau correspondante. Ce redresseur à *MLI* permet d'atteindre un facteur de puissance très proche de l'unité et régler, via la commande, la direction du flux de l'énergie réactive: absorbée ou fournie.[21]

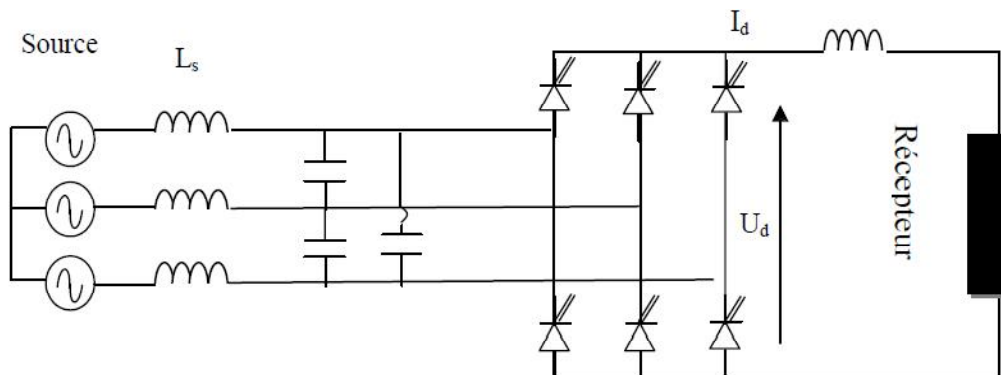


Fig.(I.16.b): Redresseur à MLI de tension.

I.8 Conclusion

Nous avons vu qu'actuellement Les charges non linéaires sont de plus en plus présentes comme récepteurs consommateurs dans les réseaux de distribution industrielle, Elles produisent une pollution électrique harmonique qui nécessite généralement un dispositif d'élimination de ces perturbations et compensation de l'énergie réactive qu'ils consomment. Puis on a abordé les principales perturbations harmoniques et les moyens techniques permettant de les limiter dont il existe plusieurs, les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement, de résonance et d'une mauvaise adaptation face à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

De plus nous sommes s'intéressé dans la suite aux solutions modernes tel que le filtre actif parallèle.

CHAPITRE II

***STRUCTURE DE FILTRE ACTIF PARALLELE
DE PUISSANCE ET PRINCIPE DE
FONCTIONNEMENT***

CHAPITRE II

STRUCTURE DE FILTRE ACTIF PARALLELE DE PUISSANCE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

II.1 Introduction

Depuis quelques décennies, le filtrage actif fait l'objet de nombreux travaux de recherche afin de compenser les courants harmoniques générés par les charges polluantes connectées aux réseaux électriques. Dans ce chapitre nous présentons la description générale des différentes parties de filtre actif de puissance. Nous commencerons par un exposé la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle a été divisée en deux: la partie puissance et la partie contrôle-commande. Ensuite, dans la partie puissance, nous allons introduire les trois principaux blocs de cette structure, à savoir l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Finalement, dans la partie de contrôle-commande, nous exposerons les cinq principaux blocs, soit l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue et du courant du filtre actif parallèle, la commande de l'onduleur et le système à base de PLL. Le système à base de PLL sera intégré dans la méthode d'identification des courants perturbés afin de généraliser l'application de cette dernière dans les cas les plus défavorables de la tension du réseau.

II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de la charge non linéaire. En pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde. La simulation par MATLAB permet d'apprécier la réalité de la compensation. En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables. [23-24-25].

Donc le filtre actif parallèle doit fournir la puissance déformante et ou la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance fondamentale active et ou réactive. Pour cela le circuit de contrôle, en agissant sur les signaux de gâchette des semi-conducteurs (transistors, GTO, IGBT,...), doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur (i_{inj1} , i_{inj2} ,

linj3) de telle sorte que le courant fourni par le réseau (I_{s1} , I_{s2} , I_{s3}) soit sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau. [26-14]

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active (I_{cha}), une composante réactive (I_{chr}) et une composante harmonique (ΣI_{chn}).

$$\text{Avec : } I_{ch} = I_{cha} + I_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{chn} \quad (\text{II. 1})$$

Le compensateur actif ne peut absorber ou fournir de la puissance active puisqu'il ne comporte pas de source active. D'après la première loi de Kirchhoff, le courant fourni par la source est égale à :

$$I_s = I_{ch} - I_{inj} \quad (\text{II. 2})$$

La source fournit la puissance active absorbée par la charge. Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante

$$I_s = I_{cha}, I_{inj} = I_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{chn} \quad (\text{II. 3})$$

Le filtre actif se compose de deux parties distinctes, partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée d'un élément de stockage d'énergie, d'un pont onduleur triphasé et d'un filtre de sortie généralement du premier ordre. Pour la partie commande, on a le bloc d'identification des courants de références, le contrôle du courant réseau ainsi que la commande. [28]

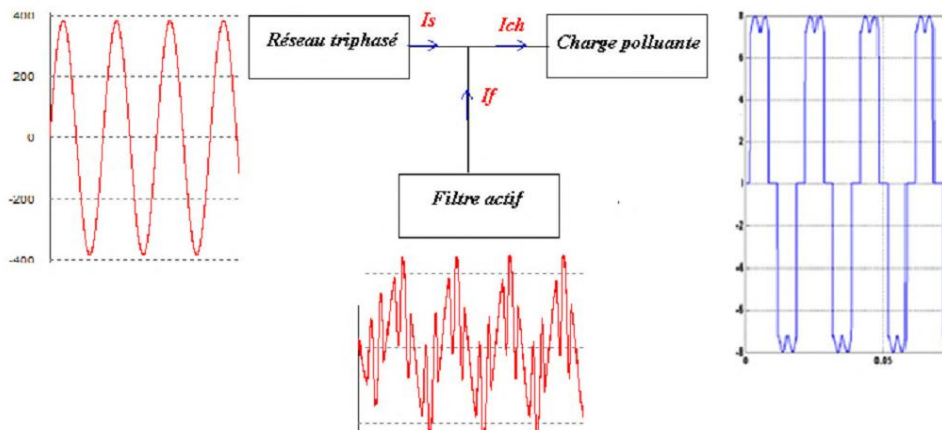


Fig.(II.1) : Schéma de principe des signaux générés par le filtre actif parallèle.

II-3 Structure d'un filtre actif parallèle

La figure (II.2) donne la structure générale du FAP, laquelle se présente sous la forme de deux parties: la partie puissance et la partie commande.

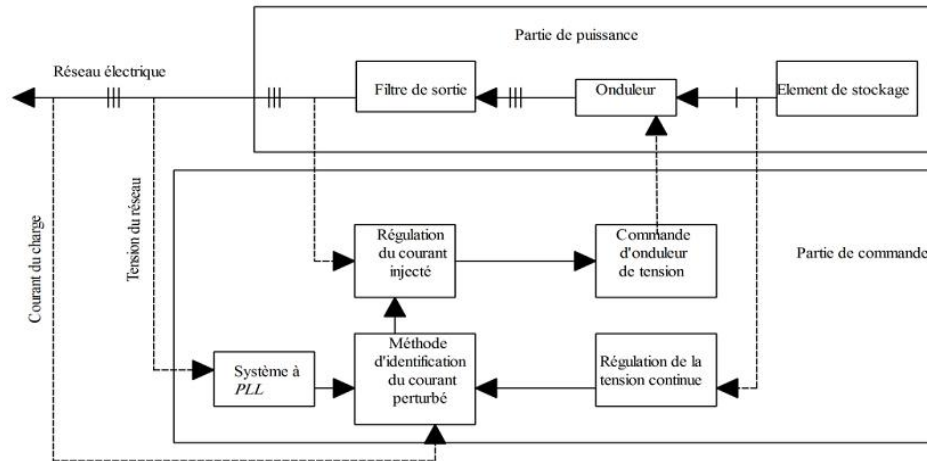


Fig.(II.2): Structure générale de filtre actif parallèle.

La partie puissance est constituée:

- ✓ D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables 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 partie commande est constituée:

- ✓ De la méthode d'identification des courants perturbés.
- ✓ Du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants.
- ✓ De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- ✓ De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- ✓ De la commande de l'onduleur de tension.

II.3.1 Etude de la partie puissance

La partie puissance du FAP est constituée de l'onduleur, d'un filtre découplage et d'une capacité de stockage de l'énergie.

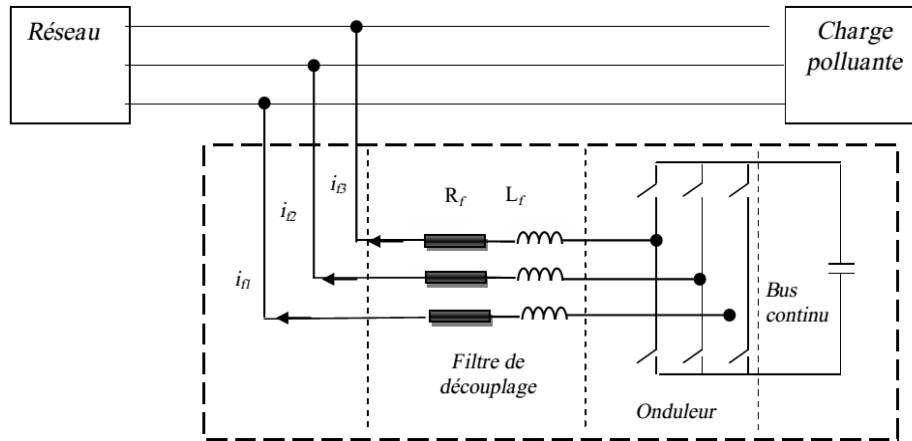


Fig.(II.3): Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.

II.3.1.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle

❖ Structure générale

L'onduleur est la partie essentielle du filtre actif [30]. La figure (II.4) présente un structure générale d'onduleur triphasé, il se compose de trois bras à base d'interrupteurs de puissance commandables à l'amorçage et au blocage avec des diodes en antiparallèle [18,26].

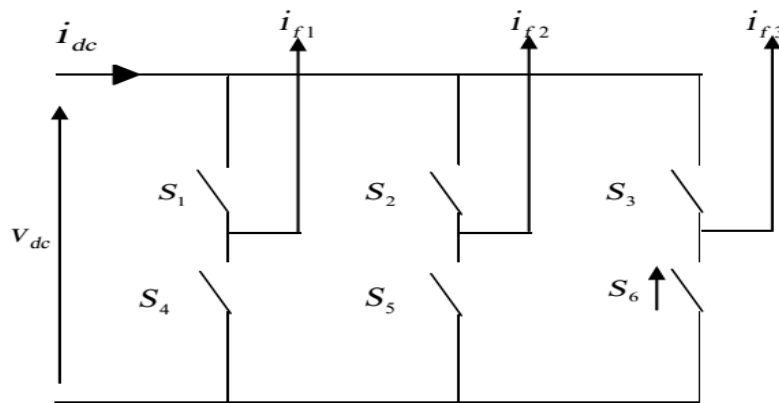


Fig.(II.4): Structure d'un onduleur triphasé.

L'onduleur peut être commandé en tension ou en courant et peut donc se comporter comme une source de tension ou de courant vis-à-vis du circuit extérieur. Ce comportement en source de tension ou de courant peut être obtenu indifféremment avec une structure d'onduleur de tension ou de courant. La source continue peut être une source de courant ou de tension, cette source peut être un élément réactif, condensateur ou inductance, dans lequel on maintient constante la valeur moyenne de l'énergie stockée [31].

❖ **Structure de tension**

Le filtre actif à structure tension connecté en parallèle au réseau est représenté sur la figure (II.5). On insère entre l'onduleur et le réseau un filtre d'entrée du premier ordre qui est en réalité une simple inductance L_f . La capacité " C_{dc} " joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes v_{dc} doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif [23,32].

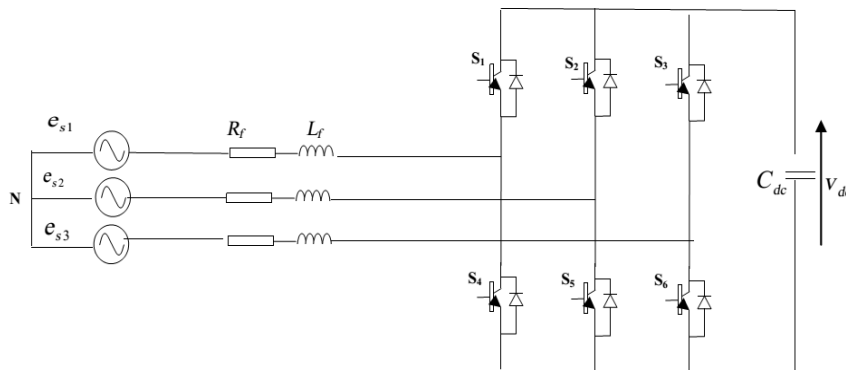


Fig.(II.5): Structure filtre active parallèle à tension

L'onduleur de tension utilise des interrupteurs réversibles en courant formés de semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture associés à des diodes montées en parallèle inverse comme le montre la figure (II.6). On utilise de préférence:

- Le transistor à effet de champ ou MOSFET pour les faibles puissances.
- Le transistor bipolaire ou IGBT pour les courants moyens.
- Le thyristor GTO pour les forts courants [31].



Fig.(II.6): Interrupteurs équivalents du filtre actif à source de tension.

❖ **Structure de courant**

Le schéma de principe du filtre actif à structure courant connecté au réseau est représenté sur la figure (II.7). On insère entre l'onduleur et le réseau un filtre d'entrée (d'un filtre passe bas) du

second ordre constitué d'une inductance L_f et d'une capacité C_f . L'inductance L sert à stocker l'énergie et joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant i_f traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif [24,32].

Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [23].

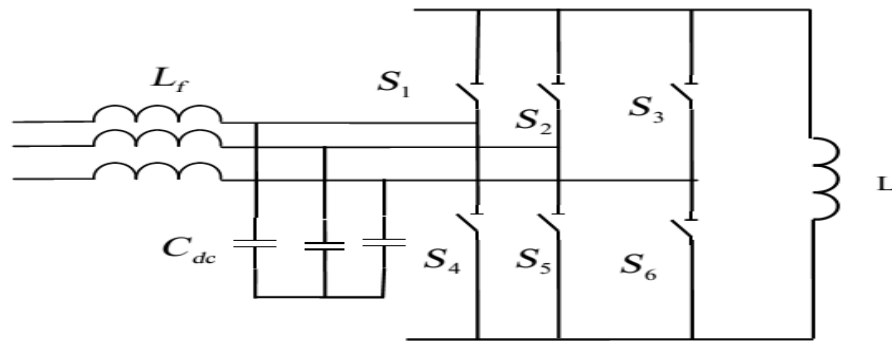


Fig.(II.7): Structure de filtre actif à courant.

❖ Comparaison des deux structures

- Dimensionnement des circuits de stockage: Pour les faibles puissances, le stockage de l'énergie dans un condensateur (structure tension) est plus efficace et moins coûteux. En revanche, pour les fortes puissances une inductance (structure courant) est plus adaptée.
- Protection contre les surtensions et surintensités: Les interrupteurs constituant un onduleur de tension doivent être protégés contre les surintensités tandis qu'un onduleur de courant nécessite une protection contre les sur tensions. Cette dernière est plus complexe à réaliser technologiquement. Ainsi, pour des installations de faible ou de moyenne puissance, la structure tension semble mieux adaptée et plus simple à réaliser [1].

II.3.1.2 Circuit de stockage d'énergie

La source continue de l'onduleur de tension est un condensateur (C_{dc}) qui joue le rôle d'une source de tension continue v_{dc} .

Le choix de la tension v_{dc} et de la capacité de condensateur C_{dc} affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension v_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue v_{dc} causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que

l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Ils doivent être faible d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs et d'autre part pour ne pas dégrader la performance du filtre actif [24,34].

II.3.1.2.1 Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage

nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées [18]:

- ✓ La première méthode est basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif et celle de la charge polluante comme suit:

La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans les trois phases est:

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d^2 d(\omega t)} = I_d \quad (\text{II.4})$$

où: I_d représente le courant de charge coté continu.

Le fondamental du courant de la charge est donné par :

$$I_{s1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_s = 0.9I_d \quad (\text{II.5})$$

Les courants harmoniques produits par la charge représentent la différence entre le fondamentale et la valeur efficace du courant coté alternatif de la charge. Ces courants sont donnés par:

$$\sum_{n=2}^{\infty} I_{sn} = \sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2} = 0.43I_s \quad (\text{II.6})$$

Le filtre actif doit fournir la puissance correspondante aux harmoniques produite par la charge. En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur six fois inférieure à celle de la tension du réseau électrique, on peut trouver :

$$C_{dc} \geq \frac{0.43I_s}{6f_s(v_{dcmax}^2 - v_{dcmin}^2)} \quad (\text{II.7})$$

où : f_s la fréquence fondamentale du réseau électrique.

On choisit un taux d'ondulation Δv_{dc} acceptable, généralement de l'ordre de 2% V_{dc} [1].

- ✓ La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_n rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante:

$$C_{dc} = \frac{I_n}{v_{dc} \Delta v_n \omega_n} \quad (\text{II.8})$$

où: ω_n la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser [18].

II.3.1.3 Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- assurer la dynamique du courant

$$\frac{d}{dt} \vec{i}_{cn} = \frac{d}{dt} \vec{i}_f \quad (\text{II.9})$$

avec: i_{ch} le courant harmonique de la charge et i_f le courant du filtre actif.

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique [18].

Une petite valeur de l'inductance du filtre passif assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. Une étude comparative entre 5 approches qui permettent de trouver la valeur de L_f est faite .

Dans ce qui suit on présente deux approches qui permettent de déterminer L_f :

1) En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient [24,35]:

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{max} = \frac{v_{f\ max} - v_{s\ max}}{L_f} \quad (\text{II.10})$$

avec:

$V_{f\ max}$: La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur.

$V_{s\ max}$: La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre.

Pour des petites variations du courant du filtre, on obtient:

$$\frac{\Delta i_f}{\Delta T} = \frac{v_{f\ max} - v_{s\ max}}{L_f} \quad (\text{II.11})$$

$$\Delta T = \frac{1}{f_{ond}} \quad (\text{II.12})$$

ΔT : La période de variation du courant du filtre.

f_{ond} : la fréquence de variation du courant du filtre.

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25 % de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par:

$$L_f = \frac{v_{f \max} - v_{s \max}}{i_{f \max} \omega} \tag{II.13}$$

2) Le dimensionnement L_f de peut être réalisé avec la contrainte que pour une fréquence de commutation donnée, la pente du courant i_f est plus petite que celle d'une porteuse triangulaire définissant cette fréquence de commutation. La pente de la porteuse triangulaire est définie par [24,35]:

$$\alpha = 4\varepsilon f'_c \tag{II.14}$$

Telle que:

ε : est l'amplitude de l'onde triangulaire.

f'_c : est la fréquence de commutation des interrupteurs du filtre actif.

La pente maximale de i_f , dans le cas d'un filtre actif a point milieu, est donnée par:

$$\frac{di_f}{dx} = \frac{0.5v_{dc} + v_{s \max}}{L_f} \tag{II.15}$$

D'où une valeur de L_f estimée à:

$$L_f = \frac{0.5v_{dc} + v_{s \max}}{4\varepsilon f'_c} \tag{II.16}$$

Le tableau (II.1) suivant résume l'influence des paramètres L_f , C_{dc} et V_{dc} , et sur le comportement du FAP [24]:

Tableau(II.1): Influence des paramètres sur le comportement du FAP.

Paramètres	Objectifs	Problèmes
C_{dc}	Petit condensateur pour réduire le cout et les pertes (minimiser l'énergie pour charger le condensateur).	Une grande variation de V_{dc} pendant le régime transitoire.
L_f	Une petite valeur pour obtenir uneréponse rapide ($\frac{di_f}{dt}$ grande)	Augmentation de la fréquence de commutation qui est limitée par certaine composante électronique. En plus en retrouve les harmoniques à haute fréquence du côté de la source.
V_{dc}	Assez grande pour assurer la dynamique de compensation.	Pertes élevées (pour une grande valeur de V_{dc} il faut apporter plus de puissance pour charger le condensateur).

II.3.2 Etude de la partie de commande

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées [18].

- identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.
- identification à partir de la détection du courant de la source.
- identification à partir de la détection de la tension de la source.

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

II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courants perturbés

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles d'approche.

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

Récemment, des nouvelles méthodes d'identification ont été présentées pour donner le choix de compenser un, plusieurs ou voire même tous les types de courants perturbateurs. En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge. Cette méthode, qui ne peut être implantée que numériquement, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive, de même que la régulation de tension n'assure pas toujours une bonne qualité à la tension de la charge [18].

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à

compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux adaptée.

II.3.2.1.1 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées

❖ Généralités sur les puissances instantanées

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties: active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation (II.17)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{II.17})$$

Cette méthode exploite la transformation α - β pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du *filtre actif parallèle* (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation α - β -0 triphasée permet d'écrire, la relation des tensions suivante :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

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

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

$$P(t) = V_{s1} I_{s1} + V_{s2} I_{s2} + V_{s3} I_{s3} = p(t) + p_0(t) \quad (\text{II.20})$$

$$P(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta$$

$$P_0(t) = V_0 I_0$$

Avec $P(t)$ la puissance réelle instantanée, $P_0(t)$ la puissance homopolaire instantanée.

L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaire du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = \frac{-1}{\sqrt{3}}[(V_{s1} - V_{s2})I_{s3} + (V_{s2} - V_{s3})I_{s1} + (V_{s3} - V_{s1})I_{s2}] = V_{\alpha} I_{\beta} - V_{\beta} I_{\alpha} \quad (\text{II.21})$$

A partir des relations (II.20) et (II.21), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

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

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Avec:

- \bar{p} une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- \bar{q} une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- \tilde{p} et \tilde{q} des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension [18].

❖ Calcul des courants perturbations

En inversant la relation (II.22), nous pouvons recalculer les courants dans le repère α - β comme le montre l'équation (II.24) :

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

En considérant les équations (II.23) et (II.24), nous pouvons séparer le courant dans le repère (α - β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Courant actif Courant réactif Courants harmoniques

Avec $\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$ supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique. Cette expression montre donc que l'identification des différentes

composantes du courant dans le repère $(\alpha-\beta)$ revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation $(\alpha-\beta)$ inverse donnée par la relation (II.26)

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \tag{II.26}$$

avec I_{α} , I_{β} courants perturbateurs calculés dans le repère $\alpha-\beta$ à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (II.25) [18,36,37].

❖ Algorithme d'identification

Finalement, l'algorithme d'identification que nous avons défini peut être représenté par le synopsis de la figure(II.8). Par souci de simplification, nous décrirons les matrices des relations (II.18,II.19),après avoir enlevé les composantes homopolaires

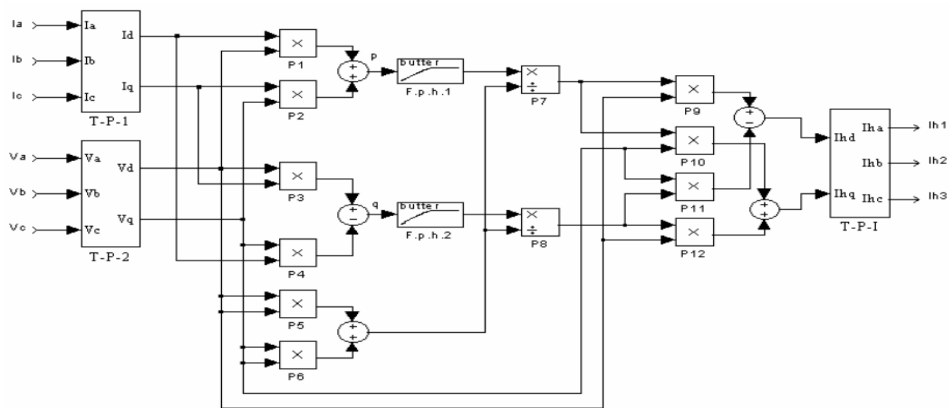


Fig (II.8): Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.

Dans cette figure, nous avons présenté le schéma de l'algorithme d'identification des courants harmoniques, qui est constitués essentiellement, par des blocs de la matrice de transformation $(\alpha-\beta)$, des filtres passe haut afin d'enlever les composantes continue des puissances, et les différents blocs de calcul du courant harmonique [18,36,37].

II.3.2.2 Système à PLL

L'identification des courants perturbés se fait à partir d'une méthode de calcul basée sur l'exploitation des tensions du réseau $v_{r1,2,3}$ saines, c'est-à-dire sinusoïdales et équilibrées, et pour obtenir ces tensions, on utilise une boucle de verrouillage de phase ou PLL (phase locked loop).

La PLL est la technique la plus répandue pour l'extraction de la composante fondamentale directe de la tension du réseau, son fonctionnement se base sur la transformation de Park pour passer au repère dq. Les tensions $v_{r,1,2,3}$ subissent dans un premier temps la transformation de Concordia dans le repère $\alpha\beta$. Les tensions ainsi obtenues $v_{\alpha,\beta}$ sont exprimés dans le repère de Park par une rotation, l'angle de cette rotation représente l'angle de la composante directe de la tension, il est issu de l'intégration de l'estimation de la pulsation déterminée par le régulateur, ainsi la PLL ne sera verrouillée que lorsque l'angle estimé est égal à l'angle de la tension directe [15].

II.3.2.3 Commande de l'onduleur

L'objectif de cette commande appliquée aux compensateurs est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui permettent d'obtenir une tension de sortie, côté alternatif, qui suit le plus fidèlement possible la consigne en minimisant ses harmoniques non désirées (harmoniques de commutation) et ce, en optimisant l'amplitude pour une tension du bus continue donnée.

Différents types de commande de l'onduleur sont recensés dans la littérature, on peut citer la commande par hystérésis et la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). La commande par hystérésis se résume pour un système du premier ordre à un simple relais, elle est parfaitement adaptée aux organes de commande ayant une action à deux positions comme c'est le cas pour l'onduleur. La commande MLI cherche à rendre la fréquence de commutation constante et nécessite pour cela un régulateur [38].

II.3.2.3.1 La commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.

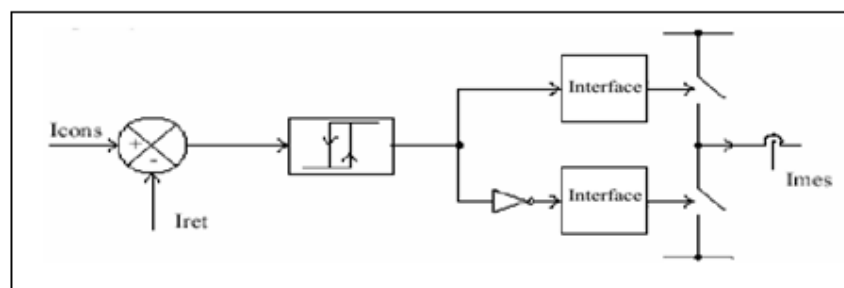


Fig.(II.9): Principe de la commande des courants par hystérésis.

Dés que l'erreur atteinte la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité, comme le montre la figure(II-9), est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposée, à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis [18;39].

II.3.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion(MLI)

Pour résoudre les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur, c'est la technique de commande par MLI, qui résoud le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure(II-10).

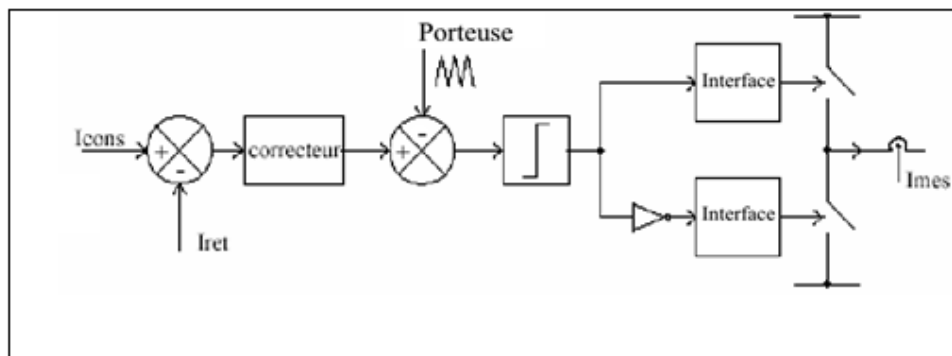


Fig.(II.10): Principe de commande par MLI.

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

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

Plus récemment, nous avons vu apparaître une technique de commande, dite commande à modulation vectorielle. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquées à chacun des interrupteurs [18;39].

II.3.2.4 Régulation de la tension continue(PI)

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. La principale cause susceptible de la modifier sont les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie). La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur P_c s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice \tilde{p} et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi V_{dc} . La puissance P_c représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension V_{dc} égale à la valeur de la tension de référence souhaitée (V_{dcref}). Le régulateur employé ici est un régulateur proportionnel simple (K_c). En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.27})$$

Notons que la relation (II.27) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension V_{dc} autour de sa référence V_{dcref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$P_c = C_{dc} \cdot V_{dcref} \frac{d}{dt} (V_{dc})$$

$$\Rightarrow V_{dc}(s) = \frac{P_c(s)}{V_{dcref} C_{dc}(s)} \quad (\text{II.28})$$

A partir de la relation (II.28), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de la figure(II.11). Le choix du paramètre K_c aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal [18,36,37].

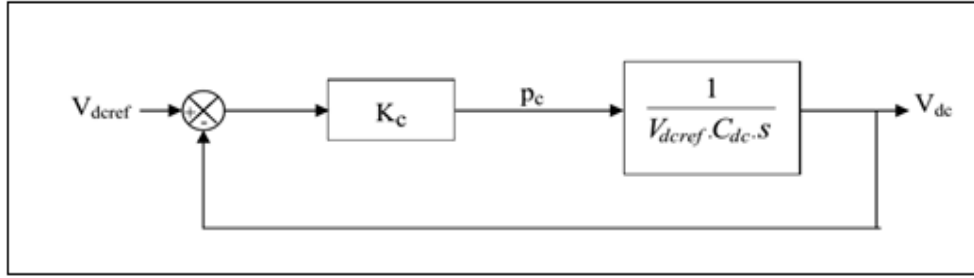


Fig.(II.11): Boucle de régulation de la tension continue.

II.3.2.5 Régulation du courant du filtre actif

En négligeant les effets de la capacité C_{dc} et des résistances du filtre de sortie sur le courant de référence I_{inj} (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation), nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif I_{inj} .

$$L_f \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad (\text{II.29})$$

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

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_{inj} \quad (\text{II.30})$$

A partir des équations (II.29) et (II.30), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta I_f = \left(V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \right) - V_f \quad (\text{II.31})$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (II.31) peut être défini comme tension de référence (V_{fref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{fref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (\text{II.32})$$

L'écart entre V_{fref} et V_f produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (II.32), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance L_f , lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de la référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la figure(II.12).

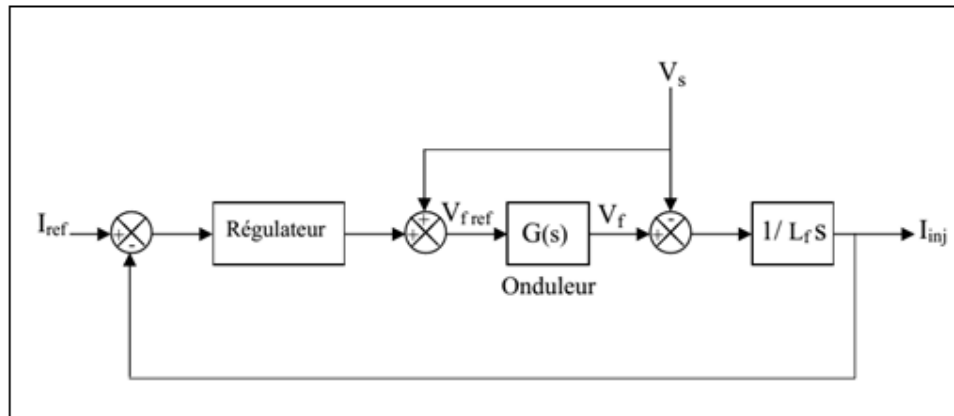


Fig.(II.12): Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle.

Dans ce schéma, $G(s)$ représente l'onduleur qui peut être modélisé par la relation suivante :

$$G(s) = K \frac{1}{1+\tau \cdot s} \quad \text{avec} \quad K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \quad (\text{II.33})$$

Avec V_{dc} la tension côté continu de l'onduleur, V_p l'amplitude de la porteuse triangulaire et (τ) représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

Le régulateur doit satisfaire les objectifs généraux de la régulation ainsi que les contraintes liées au rejet des perturbations [18,36,37].

II.3.2.6 Régulation de la tension continue par mode glissant

II.3.2.6 .1 Principe de la commande par mode glissant

La technique de commande par mode glissant (en anglais : Sliding mode) est un mode de fonctionnement particulier des systèmes de réglage à structure variable. Un système à structure variable est un système qui peut changer sa structure en faisant commuter sa commande entre deux valeurs, suivant une logique de commutation bien spécifiée comme illustré dans la figure (II.13). La commutation entre deux valeurs est définie par la loi suivante

$$U \begin{cases} U_{max} & \text{si } S(X) > 0 \\ U_{min} & \text{si } S(X) < 0 \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Cette configuration est représentée à la figure suivante

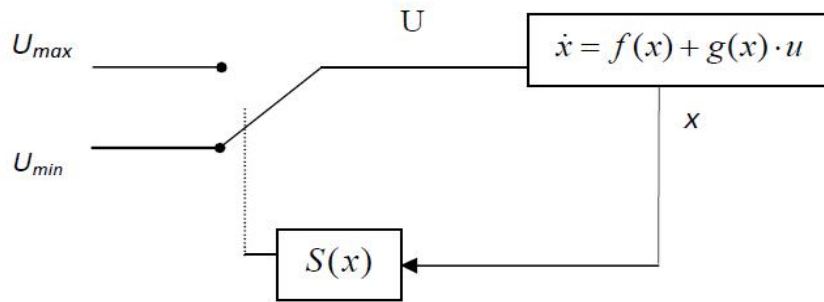


Fig (II.13) : Système de réglage à structure variable avec changement de la structure par commutation

II.3.2.6.2 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne le nombre et la forme des fonction nécessaires. Ces deux facteurs dépendent de l'application et de l'objectif visé. Pour un système défini par l'équation (II.34), le vecteur de la surface S a la même dimension que le vecteur de commande u

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) + B(x, t)u \quad (\text{II.34})$$

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. La forme non-linéaire est une fonction de l'erreur sur la variable à régler x , une forme générale proposée par *J.J. Slotine* et assurant la convergence de la variable à régler vers sa référence est donnée par :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \quad (\text{II.35})$$

$e(x)$: Représente l'écart entre la variable à régler et sa référenc.

λ : Est une constante positive.

r : Est le degré relatif de variable, il représente le nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande. L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x) = 0$. Pour un choix convenable du paramètre, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence[33].

II.3.2.6 .3 Conditions d'existence et de convergence

Le mode glissant existe lorsque les commutations ont lieu continûment entre U_{max} et U_{min} . Ce phénomène est illustré dans la figure (II.14) pour le cas d'un système de réglage du deuxième ordre avec les deux grandeurs d'état x_1 et x_2 . [45].

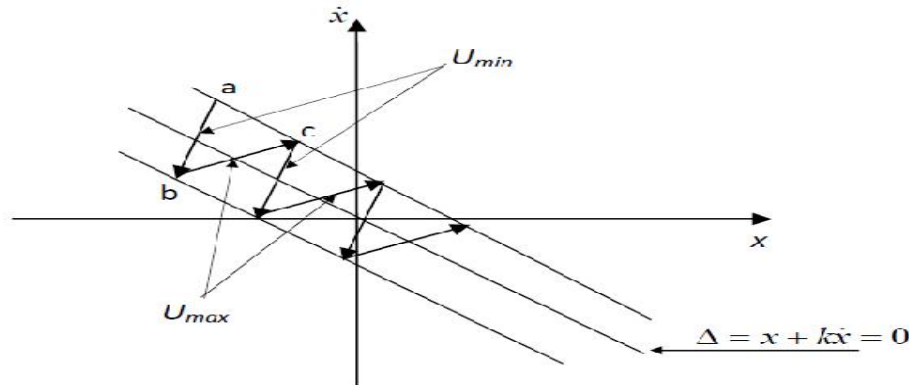


Figure (II.14) : Démonstration du mode de glissement

On considère d'abord une hystérésis sur la loi de commutation $S(x) = 0$ (droite en trait interrompu), les commutations ont lieu sur les droites décalées parallèlement de $\pm \Delta S$. Une trajectoire avec $U = U_{max}$ touche au point "a" le seuil de basculement inférieur. Si avec $U = U_{min}$, la trajectoire est orientée vers l'intérieur de la zone de l'hystérésis, elle touche au point "b" le seuil de basculement supérieur ou lieu de commutation sur $U = U_{min}$. Si la trajectoire est de nouveau orientée vers l'inférieur et ainsi de suite. Il y'a donc un mouvement continu à l'intérieur de la zone de l'hystérésis. Par conséquent la loi de commutation fait un mouvement infiniment petit autour de $S(x) = 0$ et le vecteur x suit une trajectoire qui respecte cette condition.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, la structure générale du FAP, les différentes méthodes d'identifications des courants de référence où on a consacré la théorie de la puissance instantanée et étudié le principe de base et stratégies de commande de l'onduleur de tension. Finalement, nous avons présenté le circuit de régulation du courant ainsi V_{dc} qu'une boucle de régulation de la tension continue du filtre actif afin d'assurer un fonctionnement plus stable.

CHAPITRE III

***MODELISATION ET SIMULATION DE
L'ENSEMBLE RESEAU ELECTRIQUE, CHARGE
POLLUANTE ET FILTRE ACTIF PARALLELE***

CHAPITRE III

MODELISATION ET SIMULATION DE L'ENSEMBLE RESEAU ELECTRIQUE, CHARGE POLLUANTE ET FILTRE ACTIF PARALLELE

III.1 Introduction

L'objectif principal de ce travail est la compensation des courants harmoniques en utilisant le filtrage actif parallèle à base d'un convertisseur statique (onduleur de tension). Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation des différentes parties du système global: le réseau électrique, la charge polluante (redresseur en pont tout diodes), et le filtre actif parallèle. Enfin nous présentons les résultats de simulation obtenus dans l'environnement Matlab/ Simulink avec interprétation.

III.2 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante

Le filtre actif parallèle est un onduleur de tension commandé en courant, qui possède un condensateur comme source continue et qui est connecté au réseau perturbé à travers un filtre inductif [27]. La figure (III.1) donne le schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.

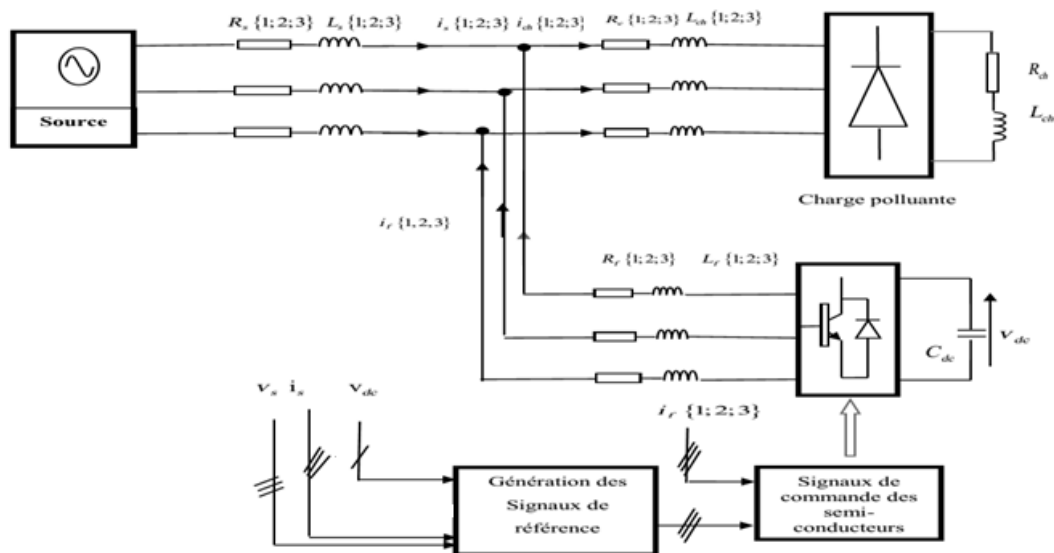


Fig.(III.1): Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.

III.3 Modélisation de l'association réseau-filtre actif-charge polluante

La modélisation d'un système revient à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement.

III.3.1 Modélisation du réseau électrique

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance (une inductance L_s et une résistance R_s), dite de court-circuit, d'où la représentation du réseau par un système de f.e.m triphasées équilibrées en série avec une impédance.

$$Z_s = R_s + jL_s \cdot \omega_s \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{bmatrix} e_{s1} \\ e_{s2} \\ e_{s3} \end{bmatrix} = \sqrt{2}E \begin{bmatrix} \sin(\omega_s t) \\ \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

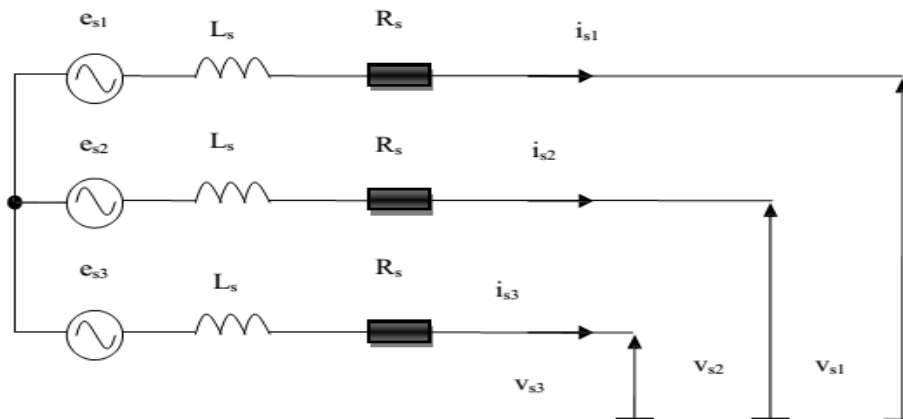


Fig.(III.2): Schéma synoptique d'un réseau triphasé.

III.3.2 Modélisation du charge polluante (Redresseur à diode)

La charge polluante est matérialisée par un pont redresseur à diodes représenté sur la figure (III.3), débitant sur une charge inductive R-L. Les redresseurs absorbent des courants non sinusoïdaux et considérés comme des générateurs d'harmonique de courants d'ordre $6h \pm 1$. Pour pouvoir filtrer les harmoniques, il convient d'abord de identifier. Cette charge est modélisé comme étant des sources de courants parfaites (les semi-conducteurs sont considérés parfaits) [40],[22],[42].

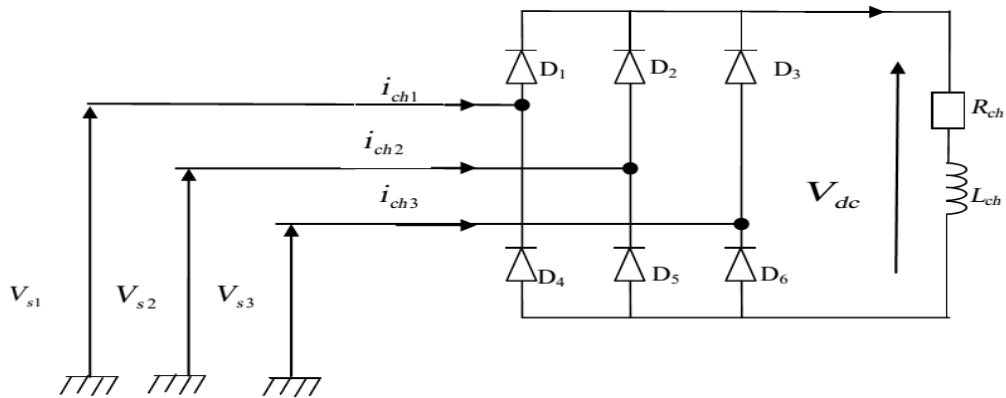


Fig. (III.3): Schéma d'une charge non-linéaire (un pont redresseur).

III.3.3 La modélisation du filtre actif (ou de l'onduleur)

Le rôle du filtre actif parallèle est de filtrer les harmoniques des courants, avec l'injection des courants de références en opposition de phase dont le but d'obtenir des courants sinusoïdaux de la source. Dans notre travail nous avons choisi un onduleur de tension, commandé en courant. Ce dernier est constitué de six transistors et de six diodes, chaque transistor avec sa diode en antiparallèle sera modélisé par un interrupteur parfait entièrement commandable (IGBT) [22]. Pour la modélisation de l'onduleur, on considère les hypothèses suivantes :

- Interrupteur parfaits: La commutation des interrupteurs est instantanée (temps de fermeture et ouverture nul) et sans pertes.
- La chute de tension dans les interrupteurs est considérée nulle en conduction.
- Source parfaites: La tension aux bornes du dipôle continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée [43].

La figure (III.4) donne le schéma synoptique d'un onduleur triphasé:

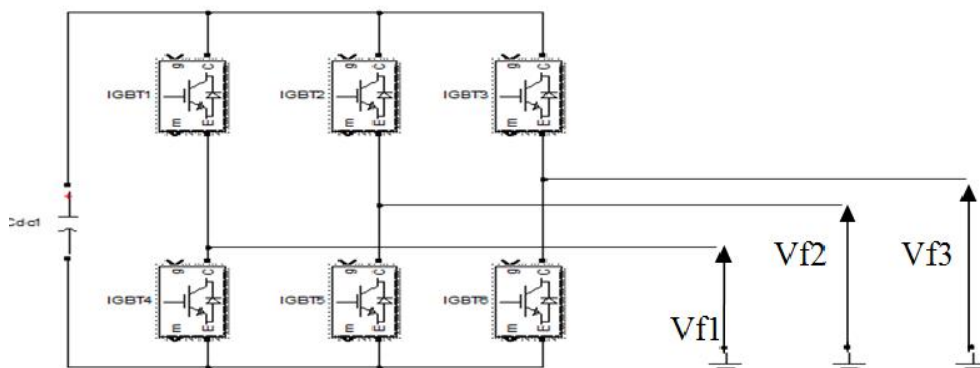


Fig. (III.4): Schéma représentatif d'un onduleur de tension triphasé.

III.3.3.1 Fonction de connexions

Soit $i=1, 2, 3$ $j=1, 2$

On associe à chaque interrupteur une fonction F_{ij} dite de connexion, tel que :

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur est fermé} \\ 0 & \text{si l'interrupteur est ouvert} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

D'où :

$$\begin{cases} i_{ij} = F_{ij} \cdot i_c \\ v_{ij} = (1 - F_{ij})v_c \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Tel que i_{ij} représente le courant qui traverse l'interrupteur k_{ij} et v_{ij} la tension aux bornes de ce dernier [44].

III.3.3.2 Fonctions de conversions composées :

Soit V_{Fab} , V_{Fbc} , V_{Fca} les tension composées délivrées par l'onduleur écrient comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix} = V_c \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} F_{ab} \\ F_{bc} \\ F_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Et:

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Donc:

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_c \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Les fonctions de conversion simples s'écrivent alors :

$$\begin{cases} F_a = \frac{1}{3}(2F_{11} - F_{21} - F_{31}) \\ F_b = \frac{1}{3}(-F_{11} + 2F_{21} - F_{31}) \\ F_c = \frac{1}{3}(-F_{11} - F_{21} + 2F_{31}) \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

III.3.3.3 Représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur

Dans le plan biphasé (α, β) en considérant $V_F(k)$ le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur $V_F(k)$ sont donnés par la Figure(III.5) [36].

Tab (III.1) Tensions fournies par l'onduleur sous formes vectorielles

K	0	1	2	3	4	5	6	7
Mod(V_f)	0	$\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot V_c$	$\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot V_c$	$\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot V_c$	$\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot V_c$	$\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot V_c$	$\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot V_c$	0
Arg(V_f)		0	$\pi/3$	$2\pi/3$	π	$4\pi/3$	$5\pi/3$	

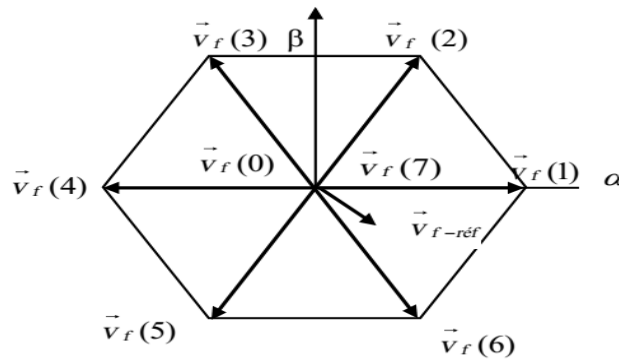


Fig.(III.5): Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

Où V_{ref} représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la figure(III.5).

L'onduleur est lié au réseau par un filtre inductif l_f , parce que deux sources de tensions ne peuvent être directement connectées, d'où :

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} + R_f \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} + l_f \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} + R_{cc} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} + L_{cc} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{Tension aux points de raccordement.}$$

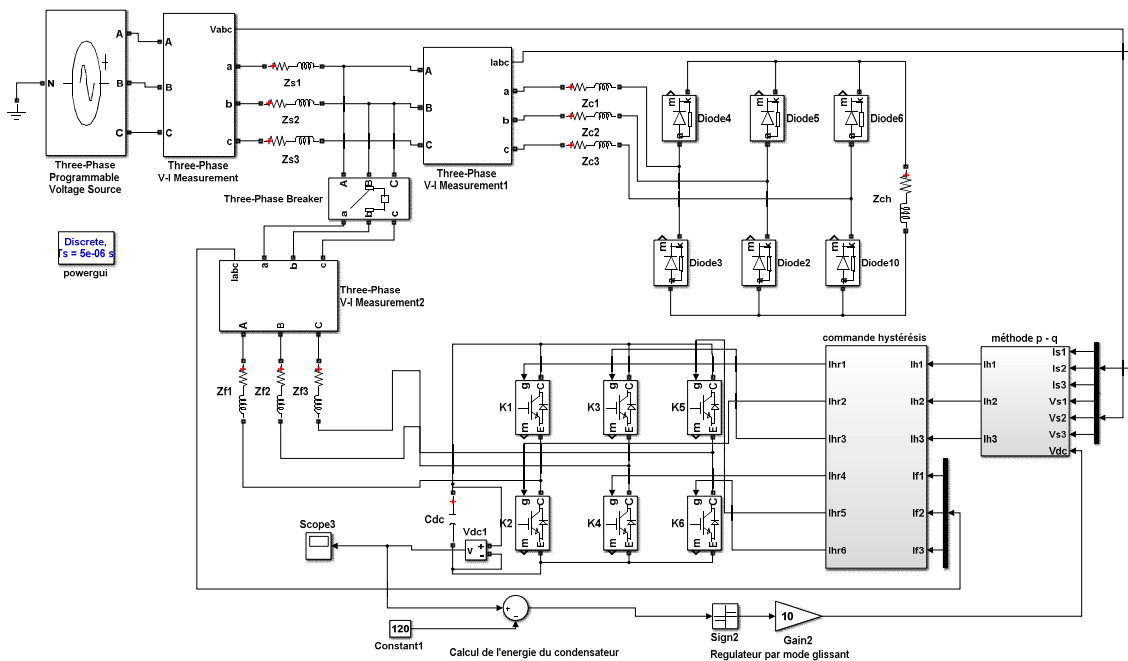
$$\begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} \quad \text{Courants délivrés par l'onduleur.}$$

$$\begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} \text{ Courants fournis par le réseau.}$$

III.4 Simulation de l'ensemble du réseau, filtre actif parallèle et la charge polluante

Après avoir étudié les différents algorithmes d'identification des courants harmoniques, les stratégies de commande, et de régulation de filtre actif parallèle dans les chapitres précédents, nous allons présenter toutes les résultats de simulations dans ce travail.

Les programmes de simulation développés ont été effectués en utilisant le logiciel Matlab/Simulink qui permettent de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et de la tension dans les différentes branches du circuit de la figure (III.6),[1],[23].



Fig(III.6): Schéma de simulation d'un filtre actif parallèle de puissance.

Le schéma de simulation de la figure (III.6) constitue d'un réseau électrique alimente une charge non-linéaire, un filtre actif parallèle à commande hystérésis, la méthode de PQ pour la détection des courants harmoniques de référence, et un régulateur par mode glissant pour la régulation de la tension continue aux bornes du condensateur, nous ajoutons un filtre passe-haut du premier ordre à la sortie du régulateur par mode glissant.

Remarque:

Quel que soit la topologie et la commande utilisées, nous présentons toujours un filtre d'extraction passe-haut du deuxième ordre, avec une fréquence de coupure 35Hz. Les valeurs des éléments caractérisant cette structure ont été regroupées dans le tableau (III.2).

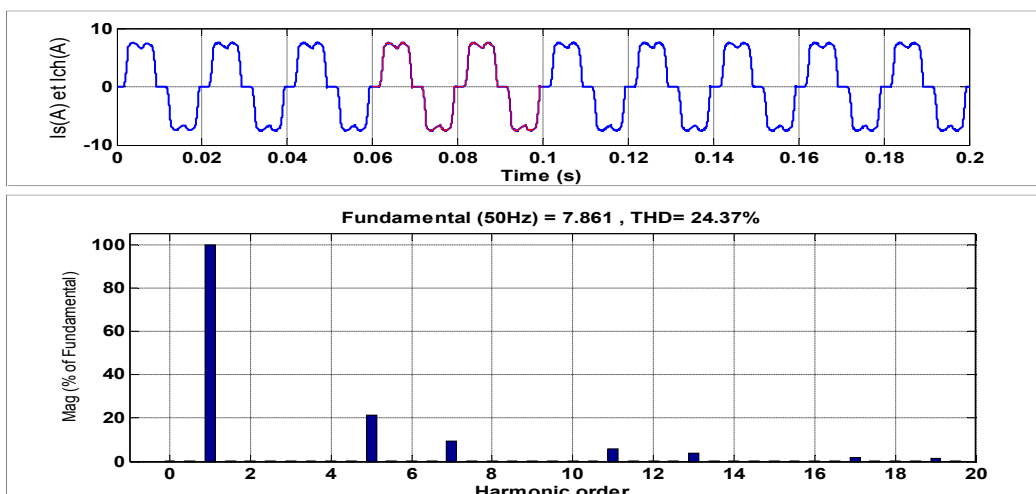
Tableau (III.2): Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.

Réseau électrique	
$V_{s_{max}} = \frac{10^0}{\sqrt{3}} V$, $f_s = 50Hz$, $R_s = 0.45 \Omega$, $L_s = 0.25e-3(H)$.	
Charge polluante	
Résistance et inductance de l'entrée du redresseur: $R_c = 0.4 \Omega$, $L_c = 1e-3(H)$.	
Pont de Gréât alimentant une charge R-L série: $R_{ch} = 11\Omega$, $L_{ch} = 3e-3H$.	
Filtre parallèle	
$V_{dc} = 100 V$, $C_{dc} = 1.1e^{-3}F$, $R_f = 0.6\Omega$, $L_f = 4e - 3H$, $f_c = 35Hz$	
Regulateur de bus continue	Commande hystérésis
$K = 10$, $V_{dcref} = 120 V$	$I\Delta = \mp 0.02A$

III.4.1 Résultats de simulation et Interprétation

En utilisant les paramètres précédents sur notre bloc simulink pour l'extraction des courbes (avant et après le filtrage), donc les résultats de simulation sont présentés sur les figures suivante:

On prendre le temps de la simulation ($t=0.2s$)

III.4.1.1 Comportement du FAP en régime permanent**✓ Compensation des courants des harmoniques****Fig(III.7):** courant de source avec spectre d'harmonique avant le filtrage

Le courant de source a la même forme du courant de la charge non linéaire et il manque la sinusoidalité des ondes.

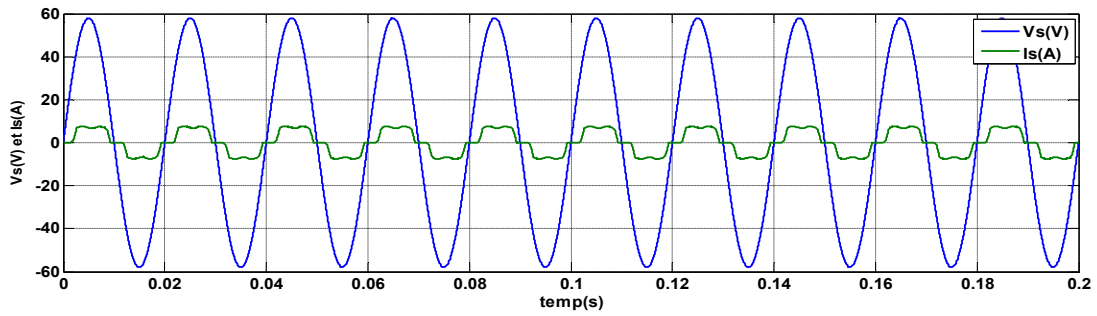


Fig (III.8): courant et tension de la source avant le filtrage

Le taux de distorsion d'harmonique à été mesuré, **THD= 24.37%**

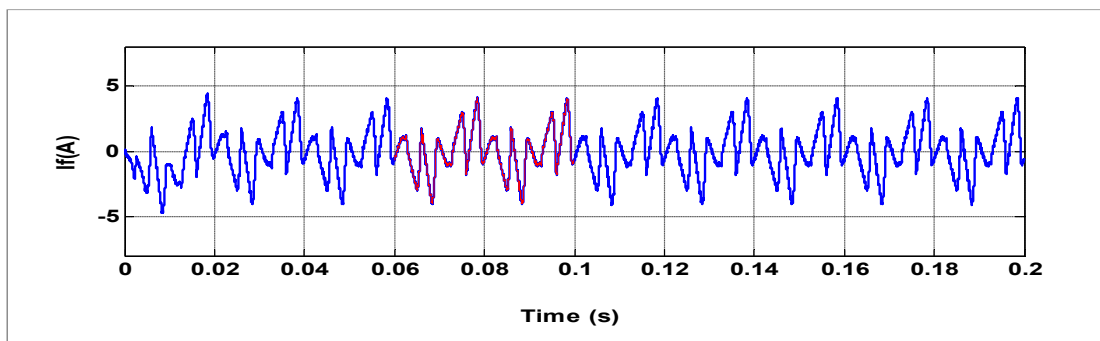


Fig (III.9): le courant injecté par le filtre actif

On peut dire que le courant injecté a la même forme du courant harmonique.

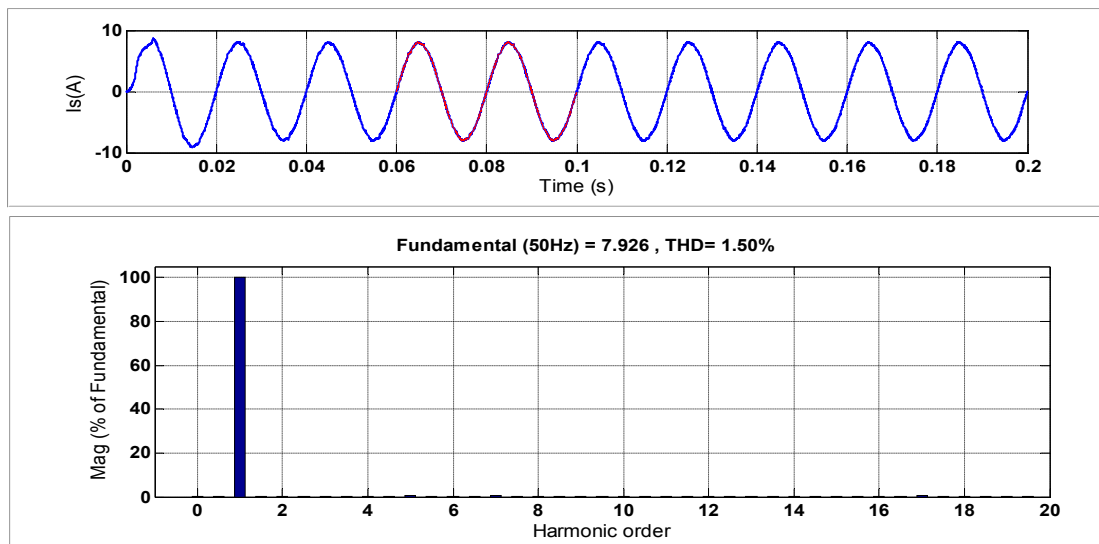


Fig (III.10): courant de source avec spectre d'harmonique après filtrage

Le taux de distorsion d'harmonique à été mesuré **THD= 1.50%**.

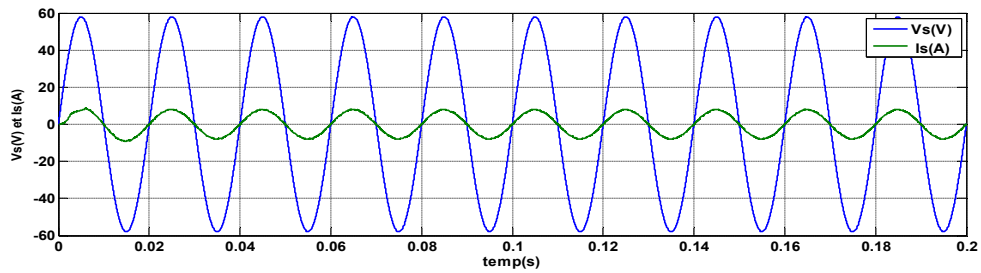


Fig (III.11): courant et tension de la source après filtrage

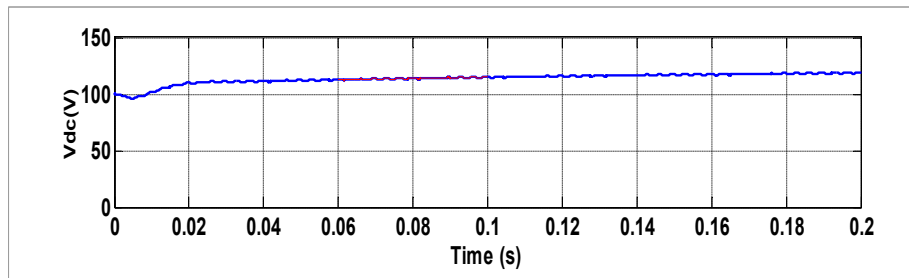


Fig (III.12) la tension continu de la condensateur de l'onduleur

On remarque que la tension aux bornes du condensateur est bien réglée à sa valeur de référence.

✓ Compensation de puissance réactive

On va avoir dans la figure suivante la compensation de puissance réactive avant et après l'injection du courant du filtrage. Pour compenser la puissance réactive, nous utilisons un interrupteur appelé (three-phases breaker) connecté en série avec notre FAP, après simulation les courbes suivantes sont obtenues:

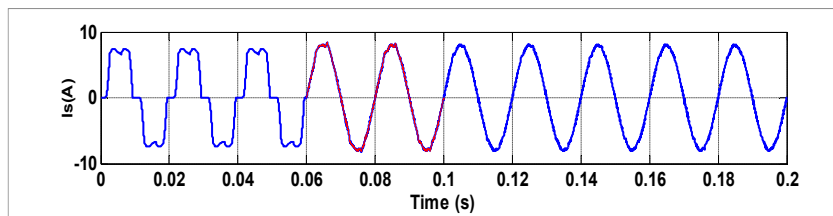


Fig.(III.13): Courant de la source I_s , avant/après du FAP.

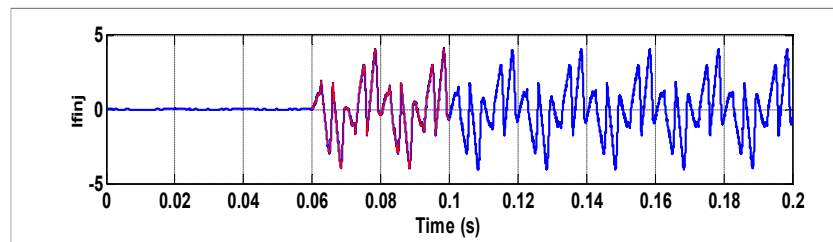


Fig (III.14): le courant injecté par le filtre, avant/après du FAP.

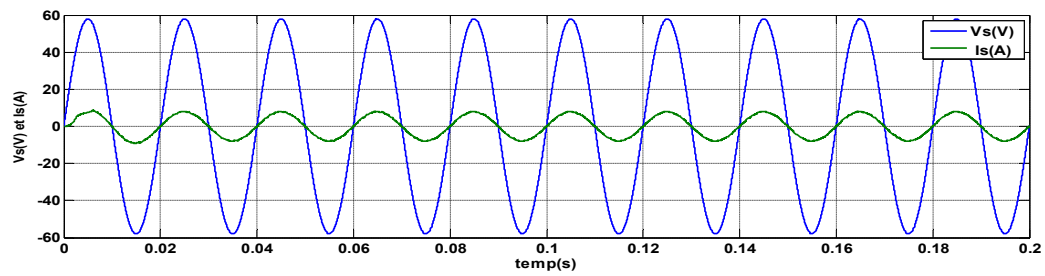


Fig (III.15): courant et tension de la source après filtrage

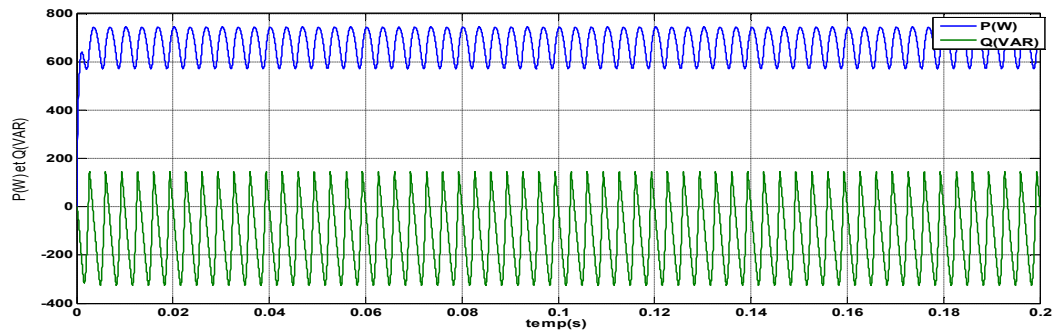


Fig.(III.16): Puissances instantanées active p et réactive q avant filtrage

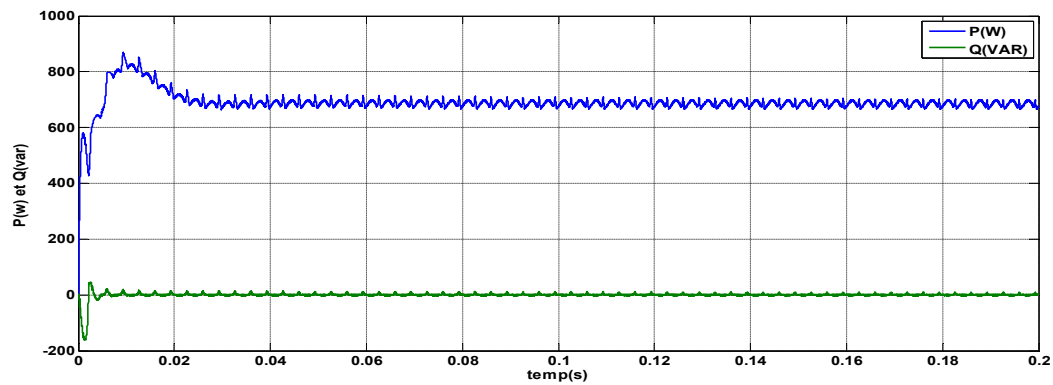


Fig.(III.17): Puissances instantanées active p et réactive q après filtrage.

On remarque que : La compensation des courants harmoniques permet de retrouver la forme sinusoïdale du courant sans la suppression du déphasage. Par la compensation conjointe des harmoniques et de la puissance réactive, le courant coté réseau est désormais en phase avec la tension.

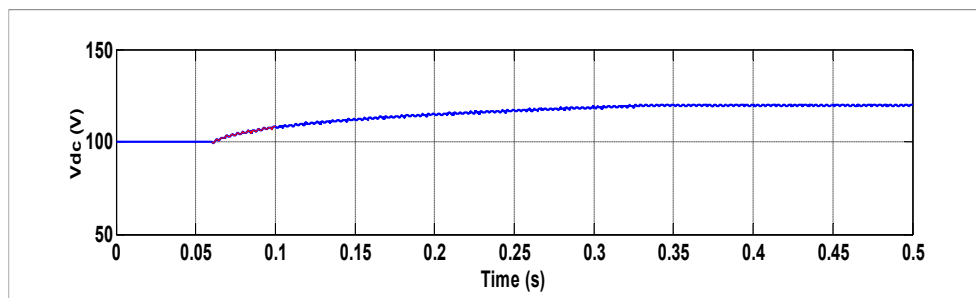


Fig (III.18): la tension de la condensateur avant/ après le filtrage

III.4.1.2 Comportement du FAP en régime dynamique (Changement de la charge)

Pour étudier l'adaptation et le comportement du FAP en régime dynamique, nous avons procédé à une variation de la charge non linéaire. Le passage de la charge(1) à la charge(2), se fait à l'instant $t=0.2\text{sec}$. Comme le montre les figures suivants:

- ✓ La charge RL1: $R = 11\Omega$, $L = 3\text{mH}$
- ✓ La charge RL2: $R = 14\Omega$, $L = 4\text{mH}$

A. Changement de la charge (RL1 \rightleftharpoons RL2)

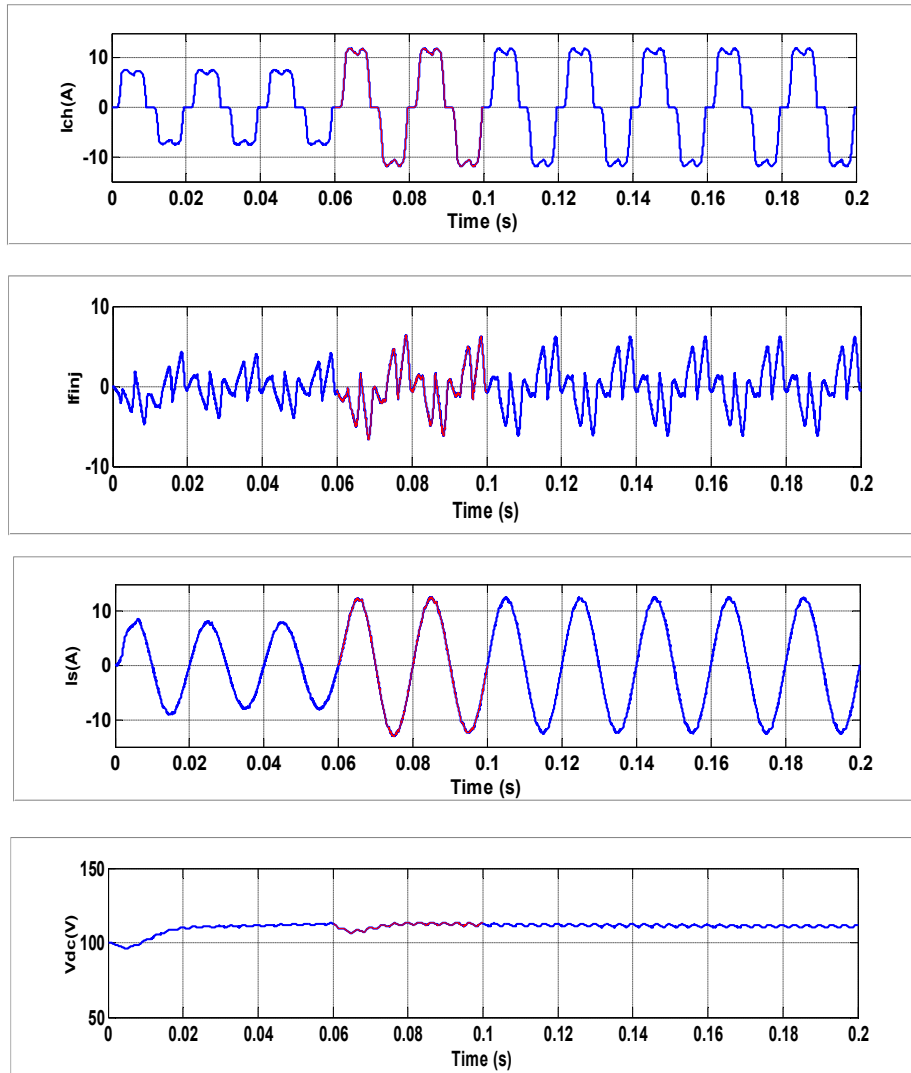


Fig (III.19) changement de la charge

III.4.2 Interprétations des résultats

D'après les résultats de simulation obtenus sur les figures ci-dessus montrant la compensation des courants d'harmoniques, et la puissance réactive en utilisant la méthode de p-q comme une méthode d'identification des courants harmoniques des références appliquée à un filtre actif de puissance, et régulateur par mode glissant; on remarque que:

A) En régime permanent

- ❖ la figure (III.7) montre que le courant « I_s » est quasi-sinusoïdal, néanmoins un pic apparaissant dans le première temps. En autre côté, le courant de source après la compensation est presque sinusoïdale et en phase avec la tension de source, ce qui signifie la correction du facteur de puissance, ce qui prouve une bonne qualité du filtrage avec FAP.
- ❖ On remarque que aussi, le courant du filtre actif suit bien sa référence. Néanmoins il est masqué par les composantes dues à la fréquence de commutation.
- ❖ La tension du bus continu de l'onduleur est bien régulée à sa valeur de référence avec présente des légères d'ondulations autour de sa référence. Donc le régulateur de tension régule parfaitement la tension du bus continu, c.-à-d. il assure la tension aux bornes condensateur est presque stable.
- ❖ La figure (III.7) et la figure (III.10): représente la forme d'onde du courant source avant/après filtre et son analyse spectrale, on remarque que le courant source avant filtre est très riche en harmoniques de rang $(6k \pm 1, k = 1, \dots, \infty)$, ainsi que son taux de distorsion harmonique est mesurée sur 2 périodes (colorés en rouge) entre les instants 0.06 et 0.1 (sec) et un $THDi = 24.37\%$ (avant le filtrage) et $THDi = 1.50\%$ (après le filtrage).
- ❖ La figure (III.18): montre que la tension du bus continu est régulée par un régulateur par mode glissant. On voit qu'avant la filtrage, la tension du bus est d'environ 100 (V) cette la valeur de la capacité telle que la capacité du bus continue est chargée initialement; à l'instant 0.1(sec) après le filtrage « V_{dc} » se stabilise à 120 (V), valeur de la tension « $V_{dc-réf}$ ».
- ❖ les figure (III.16) et (III.17): présentent les puissances instantanées active p (w) et réactive q (Var), nous remarquons que à l'instant 0.06(sec) dès que le FAP compense l'énergie réactive de source qui a été consommée par la charge non-linéaire, aussi la puissance active redevenir stable.

III.4.2.B) En régime dynamique

En régime dynamique les figure (III.12) et (III.13): montrent des résultats très satisfaisants du point de vue dépassement est temps de réponse, aussi montre que le courant de source est toujours quasi-sinusoïdal malgré la variation de la charge.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation et la simulation de l'ensemble réseau, filtre actif, et charge polluante.

Avec ce filtre actif, le THDi du courant de source réduit de 24,37 % à 1,50 % avec la commande hystérésis (pour une charge R-L). Avec une bonne compensation de la puissance réactive et s'adapte parfaitement aux variations de la charge (reste son fonctionnement stable). D'après les résultats obtenus par simulations on peut dire que la méthode p-q présente des bonnes performances dans la détection des courants des harmoniques de référence.

CONCLUSION GENERALE

La pollution harmonique est l'un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler.

Dans un premier temps, après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, les normes en vigueur, et les solutions ont été proposées permettant pour remédier à chaque type de perturbation, on distingue deux types: les solutions traditionnelles notamment le filtrage passif et les solutions modernes particulièrement le filtrage actif est une nouvelle solution pour le filtrage des harmoniques.

Dans ce contexte, notre travail présente dans ce mémoire a été consacré à d'étude d'un filtre actif parallèle de puissance afin d'améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique et particulièrement compenser les harmoniques et la puissance réactive.

Pour atteindre notre objectif dans ce travail nous choisissons la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaire que nous donne des bons résultats et cette méthode s'est avérée très efficace dans le cas de la connexion des charges non-linéaires, pour la commande de l'onduleur triphasé nous utilisons la commande hystérésis, puisqu'elle est une commande très simple à mettre en œuvre. Concernant la régulateur de bus continu nous avons utilisé un simple régulateur par mode glissant, avec un filtre à passe haut de première ordre.

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

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

Finalement, dans ce travail plusieurs perspectives peuvent être évoquées. Nous pouvons citer:

Application d'autres techniques de commande du filtre actif comme on cite d'abord la commande MLI ou la commande proportionnel, la commande non-linéaire de puissance (commande par backstepping, commande adaptative).

Application d'autre technique de régulation de bus continu par exemple des méthodes d'intelligence artificielle comme la logique floue (Fuzzy Logic), PSO....etc.

Développement d'autres structures du filtre actif de puissance (multi-niveaux, multi-bras) afin d'allier les points forts d'une structure aux avantages reconnus d'une commande.

Utilisation un autre méthode d'identification les courants des harmoniques des références par exemple la méthode SRF....etc.

Bibliographies

- [1] **Omeiri.Amar.**"Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant "Thèse Doctorat. Université Annaba 2007.
- [2] **Canadian National Power Quality Survey:** Frequency of Industrial and Commercial Voltage Sags; D.O Koval, M.B Hughes; IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 33, No. 3, MAY/JUNE 1997, Page(s):622- 627.
- [3] **D.Ould Abeslam,** « techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basses tension», Thèse de doctorat, université de Haute Alsace, décembre 2005.
- [4] **Yousfi Abdelkader** , "Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension à cinq niveaux " , Mémoire de Magister en Electrotechnique . Université Chlef 2008.
- [5] **Saddik Bacha** , " Command avancées des système dédiés a l'amélioration de la qualite de l'énergie :de la basse tension a la montée en tension " , Thèse de Doctorat INPG , 2006.
- [6] **Cour master II.**"Principes de Compensation des harmoniques".
- [7] **COLLOMBET, C., LUPIN, J. M., et SCHONEK, J.** Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement, cahier technique n 152. *Schneider Electric*.
- [8] **FERRACCI, Philippe.** La qualité de l'énergie électrique. *Cahier technique*, 2001, no 199, p.13.
- [9]**Thierry GOURAUD.** "Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique", Thèse de doctorat, à l'Ecole Centrale de Nantes le 7 Janvier 1997.
- [10] **Leila MERABET.**"Étude par simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des courants harmoniques générés par un pont redresseur triphasée ". Thèse de magistère. L'université Badji Mokhtar Annaba, 2001.
- [11] **Tarek GHENAM.** "Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP".Thèse de magister. Ecole militaire polytechnique, 2004.
- [12] **Eric BETTEGA et Jean Noël FIORINA.**" Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs". Cahier Technique Schneider Electric n° 183, janvier2000.
- [13] **Serge BERNARD, Gérard TROCHAIN.** "Deuxième génération de compensateur actif d'harmoniques forte capacité basé sur le mode d'injection du courant ". MGE UPS SYSTEMS, MGE0121UKI -06/1998.
- [14] **CHELLI Zoubir.** "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique". Thèse de doctorat, université de ANNABA, 2015.
- [15] **Hanane KOUARA.** "Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension". Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 08/02/2006.

- [16] **J AUVRAY**. "Systèmes électroniques". Université Pierre et Marie Curie IST SETI 2001.
- [17] **Thierry GOURAUD**. "Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique". Thèse de doctorat, à l'Ecole Centrale de Nantes le 7 Janvier 1997.
- [18] **Mohamad Alaa Eddin ALALI**. " Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension ". Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur –Strasbourg I, 12 Sep 2002.
- [19] **Kamel ALIOUANE**. «Contribution à l'étude du filtrage d'harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de l'association de filtres actif et passif parallèle». Thèse de Doctorat de l'I.N.P.L, 1995.
- [20] **H. DOUAR**, "Evaluation du cout des pertes générées par les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques", Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara-Boumerdes ,2006.
- [21] **A. BOUAFIA**, "Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs a MLI, Thèse de doctorat en science , Université Ferhat Abbas-Setif, 2010.
- [22] **T. BENSLIMANE**, "Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome", Mémoire de magister, Ecole Militaire polytechnique, 2004.
- [23] **L. ZELLOUMA**, "Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé", Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2006.
- [24] **T. MAHNI**, "Etude et conception d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils en vue de sa commande par des méthodes d'intelligence artificielle", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [25] **S. CHENNAI**, "Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs: Apport des techniques de l'intelligence artificielle", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2013.
- [26] **A. BOUSSAID**, "Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique", Thèse de doctorat troisième cycle LMD, Université Des Frères Mentouri-Constantine, 2017.

- [27] **L. Zellouma et al.**, "Etude de l'auto-adaptivité du filtre actif parallèle au variations de la charge", Revue Synthèse ,ANNABA, N° 17,pp. 64-72, 2007.
- [28] **Alali Mohamad Alaa Eddin** "Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension" , THÈSE École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur ULP – ENSAIS – ENGEES – URS, 2002
- [29] **M. MAGRAOUI**, "Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle, Mémoire présente à l'école de technologie supérieure, Université du Québec, 2007.
- [30] **M. BENGOURINA**, "Etude et mise au point d'un filtre actif parallèle d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique", Mémoire de Magister, Université des Sciences et de Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [31] **S. MOUTTOU**, "Nouvelles Approches de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Source De Courant", Mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2002.
- [32] **X. JIANHONG**, "Filtrage actif' parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité", Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'I.N.P.L, 1994.
- [33] **Chibani Rédha**, " Application de l'automatique aux cascades à onduleurs à cinq niveaux à structure NPC", Thèse de doctorat, ENP, Alger 2007.
- [34] **A. RABIE**, "Contribution à l'étude du filtre actif parallèle de puissance à trois niveaux", Mémoire de Magister, Université d'El-Oued, 2012.
- [35] **D. NEKKAR**, "Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés", Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia-Souk-Ahras, 2014.
- [36] **Boutraa Leila**, « Filtrage actif des harmoniques des réseau électriques », Thèse de Magister de l'Université de Batna, 2005.
- [37] **Chouaf Fathi**,« L'adaptation du filtre actif parallèle aux variations de la charge», Thèse de Magister de l'Université de Annba, 2004.
- [38] **D.OULD ABDESLAM, P. WIRA, J. MERKLE, Y-A. CHAPUIS, D. FLIELLER** , Stratégie neuromimétique d'identification et de commande d'un filtre actif parallèle. Revue des Systèmes, Série Revue Internationale de Génie Electrique (RSRIGE), vol. 9, no. 1, pp 35-64, 2006.

- [39] **Abdelaziz Chaghi**, « Contribution au contrôle du courant sur un réseau de distribution électrique Application d'un compensateur actif », Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, 2004.
- [40] **M. BENGOURINA**, "Etude et mise au point d'un filtre actif parallèle d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique", Mémoire de Magister, Université des Sciences et de Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [41] **L. ZELLOUMA**, "Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif ", Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2010.
- [42] **M. BOUKAIS et B. MAHIDDINE**, "Etude et réalisation d'un filtre actif triphasé", Mémoire d'ingénieur d'état, Ecole Militaire polytechnique, 2001.
- [43] **I. Etxeberria-Otadui**, "Sur les Systèmes de l'Electronique de Puissance dédiés à la Distribution Electrique-Application à la Qualité de l'Energie", Thèse de Doctorat de l'Institut Nationale Polytechnique de Grenoble-France, 2003.
- [44] **Ould-Ouali Samy Hassani**, "Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle commandé par Logique Floue ", Thèse de Magister de l'Ecole Militaire Polytechnique, 9 Janvier 2002.
- [45] **Ab. Hamadi , S. Rahmani and K. Al-Haddad**, Fellow, « A Hybrid Passive Filter Configuration for VAR Control and Harmonic Compensation » International Symposium on Industrial Electronics , TIE-0235-2009.R3