



**République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'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 : Réseaux Électrique**

Thème

**Compensation de l'énergie réactive et
filtre les harmoniques par filtre actif**

Réalisé par:

**Khaled Zobaidi
Ali azzi**

Encadré par:

Dr. ZELLOUMA Laid

Soutenu en Juin 2021

Laboratoire d'Exploitation et de Valorisation Des Ressources Énergétiques Sahariennes

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١٤٣٨

A decorative border with a light beige background, a thin brown line, and gold speckles. It features illustrations of dark green leaves on the left and bottom-left, and golden-yellow leaves on the top-right and bottom-right.

Dédicace

Au propriétaire d'une biographie parfumée et d'une pensée éclairée ;

Ils ont été les premiers à être crédités de notre obtention de l'enseignement supérieur

(Nos chers parents), que Dieu leur donne longue vie.

A celui qui nous a mis sur le chemin de la vie et nous a apaisés,

Elle a pris soin de nous jusqu'à ce que nous devenions vieux

(Nos chères mamans), que Dieu les bénisse.

A nos frères et sœurs et à tous nos amis

*A tous nos honorables professeurs ;
Qui n'a pas hésité à nous tendre la main*

je te dédie cette recherche

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Dieu pour la plus grande miséricorde de nous avoir permis de présenter ce projet sous la meilleure forme que nous voulions être, nous tenons à remercier notre superviseur de ce projet, le Dr (ZELLOUMA Laid) pour son aide précieuse et conseils pour sortir de ce projet. Nous remercions nos professeurs et médecins qui nous ont fourni toutes les connaissances. Surtout, nous sommes tous reconnaissants envers nos familles pour leur amour, leur aide, leur soutien et leurs encouragements sans fin. Et à nos amis pour leur compréhension et leur soutien pour nous permettre de mener à bien ce projet.

Résumé :

Un des phénomènes important entraînant la dégradation de la qualité de l'énergie électrique est la présence de la pollution harmonique générée par des charges dite « non linéaires ». Ces charges absorbent des courants non sinusoïdaux qui circulent vers le réseau à travers les impédances de lignes et engendre la déformation de la tension d'alimentation du réseau. Les déformations du courant et de la tension ont bien entendu des conséquences néfastes sur les équipements électriques, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Parmi les solutions efficaces de mitigation, le filtre actif est considéré par les spécialistes des réseaux comme étant la solution avant-gardiste pour filtrer les harmoniques.

L'objectif de ce mémoire est l'étude théorique avec simulation numérique d'un filtre actif parallèle destiné pour le but d'éliminer les harmoniques de courants, de compenser la puissance réactive et le déséquilibre. Le coeur du filtre est un onduleur de puissance (deux et trois niveaux) à base d'interrupteurs de puissance IGBT qui sont commandable en ouverture et en fermeture.

La méthode d'identification de la puissance active et réactive instantanée a été choisie pour générer les courants de références suite leur meilleurs performances. La commande de l'onduleur de puissance est faite par les techniques hystérésis, MLI naturelle et MLI vectorielle.

Les résultats obtenus par simulation numérique des modèles du filtre deux et trois niveaux pour les différentes stratégies de commande citées précédemment et les deux cas de charge étudiées (résistive R et résistiveinductive RL) montrent que le filtre actif parallèle capable de dépollue le réseau électrique des harmoniques de courant générés par la charge non linéaire, de corriger le facteur de puissance et de compenser le déséquilibre.

Mots clés : courants harmoniques, charge non linéaire, méthode d'identification, modulation de largeur d'impulsion, filtre actif parallèle, onduleur de puissance deux et trois niveaux,

ملخص:

إن ظاهرة التلوث التوافقي المنبعثة من الحمولات الغير خطية تعد من اهم العوامل التي تعمل على اضعاف جودة الطاقة الكهربائية لان هذه الحمولات تمتص تيارات غير جيبية تنتقل بدورها الى الشبكة عبر ممانعات خطوط النقل الكهربائي وتسبب تشوه موجة التوتر. هذه التشوهات في موجة التيار او التوتر لها نتائج وخيمة على التجهيزات والآلات الكهربائية الموصولة بالشبكة تصل لحد اتلافها الكلي. لذلك وجب البحث عن حلول فعالة للحد من هذه الظاهرة حيث اقترح مختصو الشبكة مرشح الطاقة الفعال كأهم وسيلة يمكنها ان تعمل على تنظيف الشبكة من التيارات او التوترات التوافقية وكذلك على تعويض الطاقة الغير فعالة الضائعة وإعادة توازن النظام.

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة نظرية مرفقة بمحاكاة رقمية لمرشح الطاقة الفعال المتوازي المقترح في إطار إزالة التيارات التوافقية، تعويض الطاقة الغير الفعالة الضائعة وإعادة توازن النظام. يحتوي قلب هذا المرشح على محول ثنائي وثلاثي المستوى يعمل بمركبات انصاف النواقل المتحكم بها عند الفتح وعند الاغلاق.

تعتبر عملية تبيان التيارات التوافقية المرجعية اهم مرحلة في أنظمة التحكم في المرشح الفعال المتوازي لذلك تم استخدام طريقة التبيان المعتمدة على نظرية الاستطاعة الفعالة والغير فعالة للحظية نظرا للإيجابيات التي تتمتع بها كما تم التحكم في محول المرشح بتقنيات التحكم التخلفية، تقنية تشكيل عرض النبضة الطبيعية والشعاعية.

النتائج التي توصلنا اليها عبر المحاكاة الرقمية لمختلف طرق التحكم المشار اليها سابقا ومن اجل حالتين للحمولة غير الخطية التي تمت دراستها حمولة مقاومة وحمولة مقاومة ذاتية (اثبتت فعالية المرشح الفعال المتوازي في إزالة توافقيات التيار المتولدة من الحمولة غير الخطية وكذلك فعاليته في تصحيح معامل الاستطاعة وإعادة توازن النظام.

كلمات مفتاحية: تيارات توافقية، حمولة غير خطية، طريقة تبيان، تشكيل عرض النبضة، مرشح طاقة فعال متوازي، محول طاقة ثنائي وثلاثي

SOMMAIRE

Dédicace	
Remerciements	
RESUME	I
SOMMAIRE	II
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES SYMBOLES	VIII
LISTE DES ABREVIATIONS	XI
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I	
Généralités sur les perturbations des réseaux électriques	
I.1 Introduction	04
I.2 Perturbation électrique	04
I.2.1 Creux et coupures de tension	04
I.2.2 Fluctuations des tensions	05
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.	05
I.2.4 Variation de fréquence.	06
I.2.5 Harmonique et inter harmonique	06
I.3 Origines des harmoniques	07
I.3.1 Effets instantanés	07
I.3.2 Effets à terme	08
I.4 Normes et réglementation de perturbation	10
I.5 Les solutions traditionnelles	10
I.5.1 Compensation des courants harmoniques.	11
I.5.1.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique	11
I.5.1.2 Transformateurs à couplage spécial	11
I.5.1.3 Inductances (selfs) série	11
I.5.1.4 Filtre passif	11
I.5.2 Compensation de la puissance réactive	11
I.5.3 Rééquilibrage des courants du réseau électrique	12
I. 6 Solutions modernes de dépollution.	12
I.6.1 Filtrage actif	12
I.6.1.1 Filtre actif parallèle	12
I.6.1.2 Filtre actif série	12
I.6.2 Filtrage hybride	14
I.6.2.1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	14
I.6.2.2 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	15
I.6.3 Les redresseurs MLI	16
III	

I.6.3.1 Redresseur de tension	16
I.6.3.2 Redresseur de courant	16
I.7 Conclusion	17
Chapitre II Structure du filtre actif parallèle de puissance et principe de fonctionnement	
II.1 Introduction	19
II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance	19
II.3 Structure du filtre actif parallèle	20
II.3.1 Etude de la partie puissance	20
II.3.1.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle	21
II.3.1.2 circuit de stockage d'énergie	23
II.3.1.3 Filtre de sortie	24
II.3.2 Etude de la partie commande	25
II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courant perturbés	25
II.3.2.1.2 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées	26
II.3.2.2 Système a PLL .	29
II.3.2.3 Commande de onduleur	29
II.3.2.3 .1Commande par hystérésis	29
II.3.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	31
II.3.2.4 Régulation de la tension continue	32
II.3.2.5 Régulations du courant du filtre actif	33
II.4. Conclusion	34
Chapitre III MODELISATION ET SIMULATION DE L'ENSEMBLE RESEAU ELECTRIQUE, CHARGE POLLUANTE ET FILTRE ACTIF PARALLELE	
III.1 Introduction	36
III.2 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante	36
III.3 Modélisation de l'association réseau-Filtre actif-Charge polluante	36
III.3.1 Modélisation du réseau électrique	36
III.3.2 Modélisation de la charge polluante (<i>Redresseur à diode</i>)	37
III.3.3 La modélisation du filtre actif (<i>ou de l'onduleur</i>)	37
III.4.1 Résultats de simulation et Interprétation	41
III.4.2 Interprétations des résultats	44
III.5 Conclusion	45
conclusion générale	47
bibliographie	48

LISTE DES FIGURES

Figure	Titer	Page
Chapitre I:		
Généralités sur les perturbations des réseaux électriques		
Fig.(I.1)	Creux et coupures de tension	05
Fig.(I.2)	déséquilibre du système triphasé.	05
Fig.(I.3)	Variation de fréquence	06
Fig.(I.4)	Exemple des harmoniques	07
Fig.(I.5)	Filtre actif parallèle connecté à un réseau	13
Fig.(I.6)	Filtre actif série	14
Fig.(I.7)	Conditionneur actif de puissance UPQC	14
Fig.(I.8)	Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.	15
Fig.(I.9)	Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	15
Fig.(I.10)	Redresseur à MLI de tension	16
Fig.(I.11)	Redresseur à MLI de courant.	16
Chapitre II		
Structure du filtre actif parallèle de puissance et principe de fonctionnement		
Fig.(II.1)	principe de la compensation active des harmoniques	19
Fig.(II.2)	Structure générale de filtre actif parallèle.	20
Fig.(II.3)	Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension	21
Fig.(II.4)	Structure d'un onduleur triphasé.	21
Fig.(II.5)	Structure filtre active parallèle à tension.	22
Fig.(II.6)	Interrupteurs équivalents du filtre actif à source de tension.	22
Fig.(II.7)	Structure de filtre actif à courant.	23
Fig.(II.8)	commande du fap.	25
Fig.(II.9)	Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives p et q	28
Fig.(II.10)	Algorithme réactives instantanées d'identification de la méthode Des puissances actives et réactive instantané	28
Fig.(II.11)	Principe de commande par MLI	30
Fig.(II.12)	Commande des interrupteurs par hystérésis	30
Fig.(II.13)	principe de commande des courants par MLI	31
Fig.(II.14)	Boucle fermée de réglage de la tension continue	32
Fig.(II.15)	Boucle de régulation du courant.	33

Chapitre III modélisation et simulation de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif parallèle		
Fig.(II.1)	Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluant.	36
Fig.(II.2)	Schéma de principe d'un réseau triphasé	37
Fig.(II.3)	Schéma de principe de la charge polluante	37
Fig.(II.4)	Présentation schématique d'un onduleur triphasé	38
Fig.(II.5)	représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur	40
Fig.(II.6)	Courant de la source avant filtrage	41
Fig.(II.7)	i_f : courant de filtre actif,	42
Fig.(II.8)	I_s : Courant de source. Après filtre.	42
Fig.(II.9)	Courant et tension de la source après filtrage	42
Fig.(II.10)	Courant de source i_s avant filtre et l'analyse spectrale.	43
Fig.(II.11)	Courant de source i_s après filtre et l'analyse spectrale.	43
Fig.(II.12)	Tension du bus continu	43
Fig.(II.13)	Puissances instantanées active p , puissance réactive q avant filtrage.	44
Fig.(II.14)	Puissances instantanées active p , puissance réactive q après filtrage	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	page
Chapitre I Généralités sur les perturbations des réseaux électriques		
Tableau(I.1)	Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension(Norme CEI 61000-2-2).	10
CHABITRE III		
Tableau (III -1):	Tensions fournies par l'onduleur sous fourmes vectorielles.	39
Tableau(III-2)	les valeurs des éléments construisant la structure étudiée.	41

LISTE DES SYMBOLES

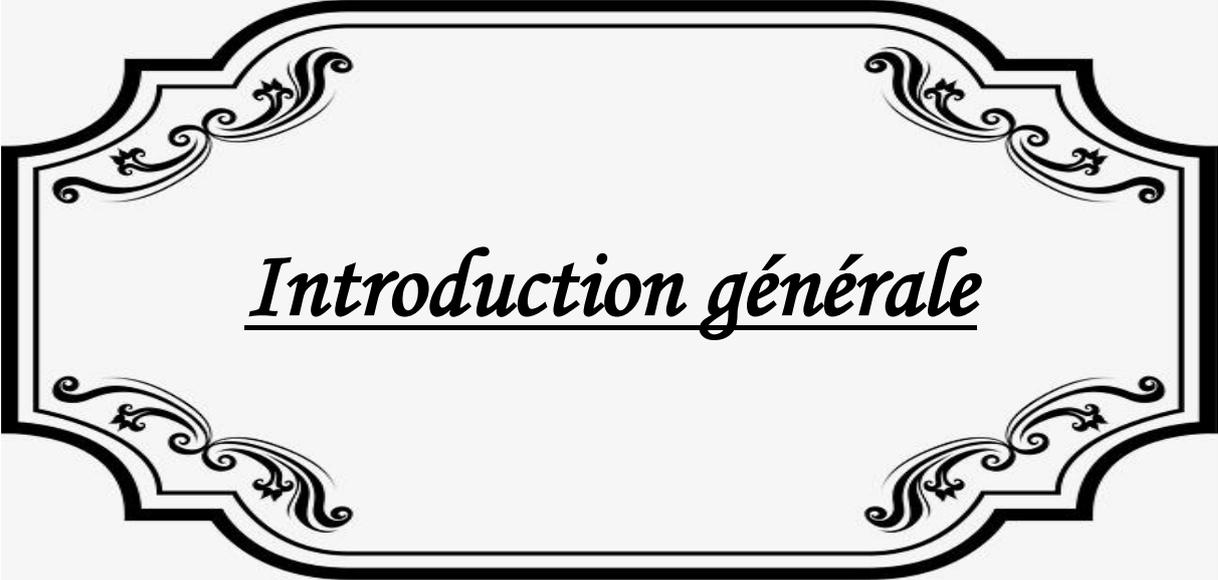
Symbole	Désignation
U	La tension de fourniture(V
U_n	La tension nominale de réseau électrique (V).
h ou k	La range des harmoniques.
α	La pente de la porteuse triangulaire
ΔT	La période de variation du courant du filtre
$V_{s_{max}}$	La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre(V).
ΔV_{dc}	Différence entre les tensions du condensateur $V_{dc1}, V_{dc1},$
ω_n	La pulsation la plus faible des harmoniques à compenser (rad/s).
α, β	Paramètres du repère de <i>Clark</i> .
C	{1,2,3} Etats logiques de la commande de l'onduleur.
C_f	Capacité de filtre de sortie(F).
S	{1,2,3,4,5,6} Etats des interrupteurs de l'onduleur.
C_{dc}	Capacité du condensateur (F).
V_{dc}	Tension aux bornes du condensateur(V).
$\{1,2,3\} R_f$	Les résistances de couplage(Ω).
$\{1,2,3\} L_f$	Les inductances de couplage(H).
$\{1,2,3\} V_S$	Tension de source(V).
I_n	Le courant de charge coté continu(A).
$\{1,2,3\} L_S$	Inductance du réseau coté source(H)
$\{1,2,3\} E_S$	Tensions simples du réseau au début
$\{1,2,3\} R_S$	Résistance du réseau coté source(Ω).de la ligne (V).
U_d	La tension de charge coté continu(V).
I_h	Courant de la charge harmonique(A).
I_{Cr}	Courant de la charge réactive(A).
I_{Ca}	Courant de la charge active (A).
P_{Cc}	Point de couplage commun.
I_{dc}	Courant aux bornes du condensateur(A)
γ	Le déphasage entre S_1 et S .
R	Le résistance(Ω).

P	Indice de pulsation.
C	le condensateur(F).
f	Fréquence de résonance ($z H$).
M	Sera à indice de pulsation.
φ	Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S .
N	Un nombre de convertisseur triphasé
S_1	la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire.
I_n	Courant de la charge harmonique(A).
$I_f\{1,2,3\}$	Le courant fournit par le filtre actif (A).
I_{ca}	Courant de la charge active (A).
I_{cr}	Courant de la charge réactive(A).
D	La tension (V).
I_{effh}	La valeur efficace du courant de l'harmonique(A).
T	Un période (S).
$\omega_s; \omega$	La pulsation de réseau (rad).
D	La puissance déformante
Q	La puissance réactive(Var)
P	La puissance active (W).
S	La puissance apparente (VA
S_{effh}	Les valeurs efficaces des différentes harmoniques du signales.
S_{eff}	La Valeur efficace d'une grandeur d'harmonique.
$a_n; a_0$ ou $b_n; b_h b$	Sont les coefficients de la série de Fourier.
C_{eff}	La valeur efficace de l'amplitude l'harmonique de rang h .
θ_h	Phase de l'harmonique de rang h ($^\circ$).
C_h	L'amplitude l'harmonique de rang h .
a_0	Composante continue de la signal $S(t)$ périodique.
L	L' inductance(H).
$S(t)$	Un signal périodique peut représenter un courant(A)ou une tension(V).
T	Un période (S).
ε	Amplitude de l'onde triangulaire.
k	Constant du FMV.
f_h	La fréquence de la composante harmonique de rang h (). $z H$

I_d	Le courant continu du redresseur
ω	Pulsation du réseau
Z_S	Impédance de la source
I_S	courant de la source

LISTE DES ABREVIATIONS

UPQC	En anglais: Unified Power Quality Conditioner.
CEI	En anglais: Commission Electrotechnique Internationale.
THD	En anglais: Taux de Distorsion Harmonique.
FAS	Filtre Actif Série.
MOSFET	En anglais: Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor.
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion (En anglais: <i>PWM</i> , Pulse Width Modulation).
IGBT	En anglais: Insulâtes Gâte Bipolaire Transistor.
GTO	En anglais: Gate Turn-Off Thyristor .
FAP	Filter Active Parallel.
PLL	En anglais: Phase -LockedLoop (Boucle de verrouillage de phase).
FP	Farceur de puissance.



Introduction générale

Introduction générale

La prolifération de la connexion au réseau de distribution des charges non-linéaires, telles que les redresseurs, les gradateurs, le matériel informatique, les appareils de climatisation ou encore les éclairages à base de tubes fluorescents, etc...., est la cause principale de la dégradation de l'énergie électrique. Par conséquent, les distributeurs de l'énergie électrique se voient contraints d'imposer des normes afin de se protéger contre ces perturbations.

Du point de vue de la qualité de l'énergie on entend par perturbation électrique tout écart de la tension réseau par rapport à sa valeur et à sa forme nominale. Par extension, on peut aussi considérer comme perturbations les phénomènes agissant sur la forme du courant, car ils ont une influence directe sur la tension. Les différentes perturbations qu'on rencontre sont surtout des fluctuations de tension, le déséquilibre, la variation de la fréquence du réseau, les harmoniques et les transitoires. Les perturbations ont des effets néfastes sur les équipements électriques qui se manifestent généralement par des échauffements causant la dégradation du fonctionnement jusqu'à même la destruction totale de ces équipements. A cet effet, Pour faire face au phénomène des perturbations harmoniques, des solutions ont traditionnelles et modernes de dépollution été proposées. Toutefois, les solutions traditionnelles, à base de circuits passifs LC calculés en concordance avec les rangs d'harmonique à filtrer, sont souvent pénalisées en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et de la charge polluante et donc des solutions d'efficacité moyenne.

Les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance ont favorisé la mise en œuvre de filtres actifs : les filtres actifs parallèles, séries, et hybrides. Les filtres actives à base de convertisseurs statiques sont moins encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante. Leur objectif principal consiste à compenser les harmoniques produits dans le réseau et parfois l'énergie réactive consommée par les charges non-linéaires.

Le travail présenté dans ce mémoire, consiste à l'étude des perturbations harmoniques et la dépollution du réseau électrique à base de filtre actif parallèle, solution moderne retenue pour la compensation des perturbations en courants harmoniques.

Pour faire face à ce problème, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation des filtres passifs. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère mais le filtrage passif pose certains problèmes : manque

d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau.



CHAPITRE I

Généralités Sur Les Perturbations

Des Réseaux Electriques

I.1 Introduction

Généralement, le distributeur d'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale. Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la source des harmoniques, l'influence du raccordement des convertisseurs statiques sur les réseaux électriques et leurs environnements et enfin les normes. Ensuite, nous présentons les solutions classiquement mises en oeuvre pour. [2].

I.2 Perturbation électrique

Pour un réseau électrique les tensions doivent être alternatives triphasées, caractérisées par les paramètres suivantes : la fréquence, les amplitudes des tensions doivent être égales, une forme d'onde proche d'une sinusoïde, et les déphasages entre les phases égaux. En effet, la qualité de la tension est affectée, par des défauts qui se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant au moins un des quatre paramètres précédents.[10].

I.2.1 Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur 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 transformateur, 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 10ms. La figure (I.1) montre un exemple de creux et de coupure de tension [19].

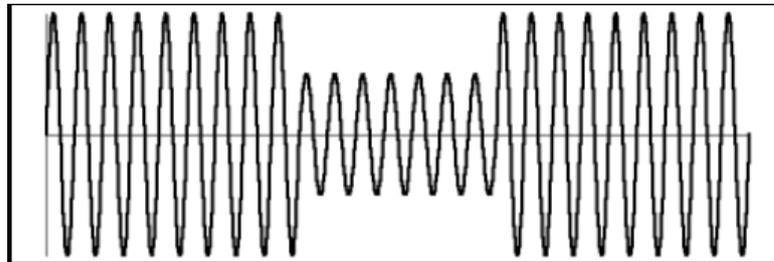


Fig.(I.1) Creux et coupures de tension

I.2.2 Fluctuations des tensions.

Pour les fluctuations de la tension, les solutions consistent à changer le mode d'éclairage; installer des alimentations sans interruption; modifier le perturbateur (le changement du mode de démarrage des moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités), augmenter la puissance de court-circuit; éloigner électriquement la charge perturbatrice des circuits d'éclairage [2]

I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension figure.1.2 dus à la circulation de courant sont équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés en basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire.

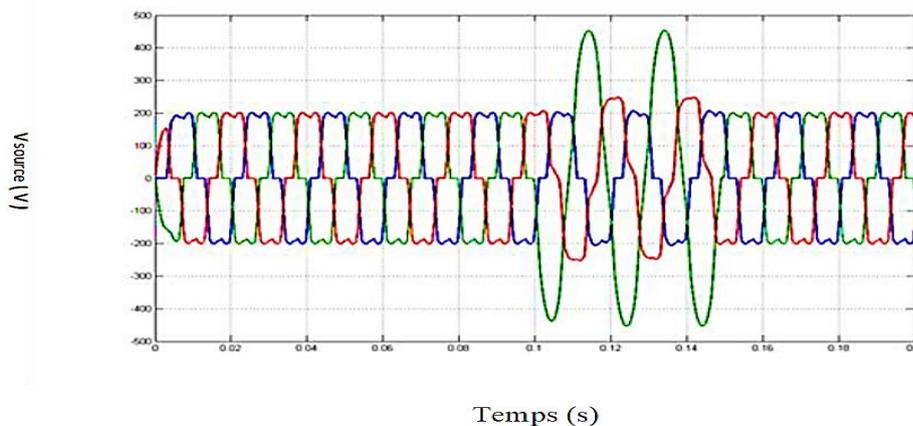


Fig.(I.2): déséquilibre du système triphasé.

Le degré de déséquilibre est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue

par le rapport de la composante inverse (U_{1i}) (ou homopolaire (U_{1o})) du fondamental à celui de la composante directe (U_{1d}) du fondamental.

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \quad \text{et} \quad \Delta U_o = \frac{|U_{1o}|}{|U_{1d}|} \quad (I1)$$

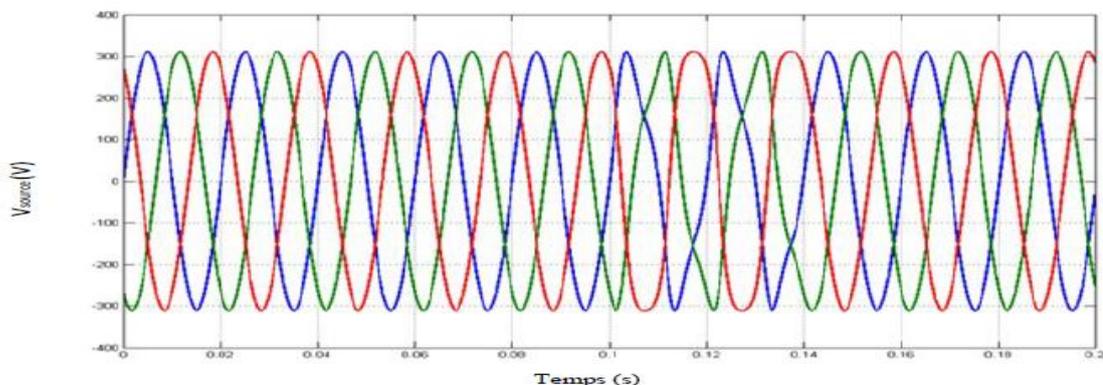
Avec V_i = tension de la phase i et $V_{moy} = (V_1 + V_2 + V_3)/3$.

La tension inverse (ou homopolaire) est provoquée par les chutes de tension le long des impédances du réseau dues aux courants inverses (ou homopolaire) produits par les charges déséquilibrées qui conduisent à des courants non identiques sur les trois phases.

I.2.4 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. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau.

Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$.



Fig(I.3.)Variation de fréquence

I.2.5 Harmonique et inter harmonique

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 HZ, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamentale.

La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors et de transistors.

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale, mais ne sont pas des multiples entières de la fréquence du réseau. L'apparition des inter-harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquences, les variateurs

de vitesse et d'autres équipements similaires de commande électrique. [9].

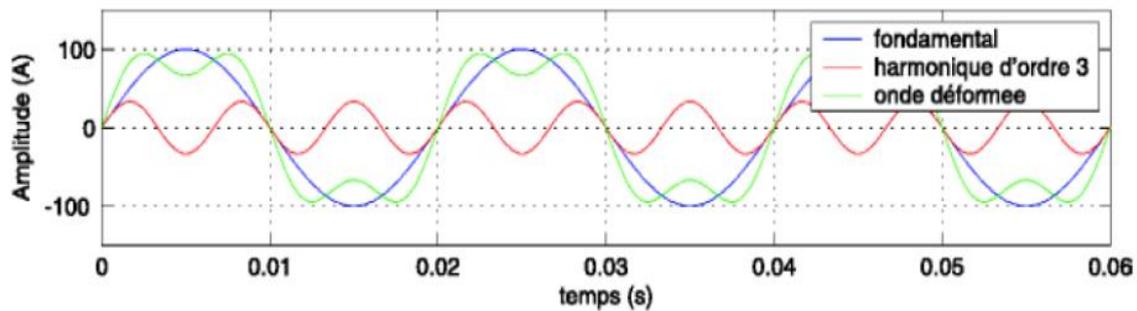


Fig.

(I.4): Exemple des harmoniques

I.3 Origines des harmoniques.

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse...), que du type tertiaire (informatique ou éclairage dans les bureaux, commerces,...) ou domestique (téléviseurs, appareils électroménager en grand nombre). [18]

I.3.1 Effets instantanés

On peut citer les effets instantanés des harmoniques comme suite :

- ✓ dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation (détection du passage par zéro, ... etc.).
- ✓ pertes de précision dans les appareils de mesure.
- ✓ vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatiles dus aux champs tournants harmoniques.
- ✓ vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques.
- ✓ perturbations induites dans les liaisons par courant faible sous forme de bruits par couplage électromagnétique (contrôle-commande, télécommunication, téléphonie, réseaux locaux, ... etc.).

- ✓ Interférences avec les systèmes de télécommande à distance utilisés par les distributeurs d'énergie.
- ✓ effets de papillotement (flicker) au niveau des éclairages et des affichages des appareils électroniques.

I.3.2 Effets à terme.

Les effets à long terme des harmoniques sont récapitulés comme suite

- ✓ vieillissement prématuré des moteurs électriques alternatifs du fait des pertes cuivre et fer supplémentaires, dû à la différence importante de la vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. [8]
- ✓ échauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipements entraînant des déclassements du matériel avec des surdimensionnements. [9]
- ✓ 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 dû au sur échauffement du neutre et les éléments bobinés (transformateurs, moteurs, etc.). [10]
- ✓ surchauffe du neutre. En effet dans un système triphasé équilibré, les tensions sont déphasées de 120° si bien que lorsque les charges sont égales, le courant résultant dans le neutre est nul. Toutefois, si les courants de phases s'annulent, ce n'est pas le cas des courants harmoniques. Ces courants qui sont des multiples impairs de la fréquence du courant de phase s'ajoutent dans le conducteur neutre. Ainsi le courant résultant dans le neutre représente l'addition des courants harmoniques de rang trois et multiple de trois [15]
- ✓ fatigue mécanique des équipements à cause des vibrations et des couples pulsatiles, [15]
- ✓ vieillissement des isolants. Il peut être dû soit à une contrainte en tension consécutive à la présence de tensions harmoniques, et donc à une augmentation locale des courants de fuite, soit à l'échauffement exagéré provoqué par l'échauffement des conducteurs. [8]
- ✓ pertes supplémentaires dans les transformateurs ou les inductances dues à l'effet de peau dans le cuivre, à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique [9].
- ✓ Se rapportent essentiellement aux machines tournantes, aux transformateurs et aux condensateurs, ce qui se manifeste par des échauffements supplémentaires et l'augmentation du niveau sonore. Il en découle la destruction de matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.

La liste suivante donne une idée de l'impact des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent qui font partie intégrante du réseau électrique, tels que les : [16]

a. alternateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements statiques et dans les amortisseurs liées à l'augmentation de la valeur efficace du courant absorbé. Ces pertes provoquent un échauffement supplémentaire et réduisent également le rendement de ces machines ;

b. câbles électriques : pertes Joule supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques homopolaires et corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation de courants harmoniques pairs associés à une composante continue.

La présence des harmoniques dans le réseau diminue aussi la capacité de transport en puissance active des lignes ;

c. transformateurs : ils sont les constituants les plus directement affectés par les courants harmoniques. Ces derniers produisent des pertes additionnelles dans les enroulements. Ces pertes ne sont pas seulement dues à l'effet Joule pelliculaire, mais aussi à des courants induits dans les bobinages, le noyau et les pièces métalliques par les composantes à hautes fréquences des champs de fuite;

d. moteurs à courant alternatif : la déformation de la forme d'onde de la tension du réseau, due à l'interaction entre les courants harmoniques et l'impédance équivalente du réseau, influe sur le fonctionnement des machines électriques à courant alternatif en général et sur celui des moteurs asynchrones en particulier (pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements et pulsation du couple);

e. condensateurs : ils sont aussi très affectés par les courants harmoniques. Les condensateurs branchés en parallèle sur les réseaux pour la compensation de la puissance réactive (correction du facteur de puissance) ont des impédances d'autant plus faibles que la fréquence est élevée.

Les courants harmoniques se superposent au courant fondamental et causent des pertes supplémentaires qui peuvent excéder la capacité thermique des condensateurs et réduire idéalement leur durée de vie. De plus, des phénomènes de résonance peuvent survenir et soumettre les condensateurs à des surtensions, lesquelles sont susceptibles de les dégrader, voir de perforer leur isolation] .

f. équipements à base d'électronique de puissance : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension qui peut créer des faux passages par zéro (perte de synchronisation).

g. ordinateurs : troubles fonctionnels liés à la distorsion de la tension du réseau ;

h. réseaux de télécommunication : génération de bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication. Dans des cas particuliers, surtout lors de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut

être rendue inutilisable.

I.4 Normes et réglementation de perturbation.

Afin de limiter l'influence d'une charge polluante sur les autres charges connectées au réseau et en même temps éviter la modification des caractéristiques de ce dernier, les distributeurs d'énergie électrique ont été amenés à émettre des recommandations. Ces recommandations concernent les exigences au point de raccordement de l'utilisateur sur le réseau électrique dans le but :

- D'épargner à l'utilisateur de l'énergie électrique, les désagréments engendrés par la présence des harmoniques.
- D'assurer la longévité et la sécurité des différents équipements constituant le réseau et ceux qui sont branchés à ce dernier.

Des normes fixant un seuil d'injection harmonique maximale à ne pas dépasser, ces normes ont été élaborées par différents organismes, ils peuvent être soit nationaux, notamment UTE-CEF (Union Technique de l'Electricité- Comité Electrotechnique Français), régionaux, notamment le CENELEC (Comité de normalisation Electrotechnique(EN 50160)) en Europe ou internationaux, notamment CEI (Comité Electrotechnique International). Le tableau 1.1, repris de la norme CEI 61000-2-2, présente les caractéristiques et le niveau de compatibilité pour les harmoniques au point de raccordement du client pour un réseau satisfaisant la norme CEI 1000-2-4.: [15]

Rangs impairs non multiple de 3		Rangs impairs multiple de 3		Rangs pairs	
Rang	Tension harm (%)	Rang	Tension harm (%)	Rang	Tension harm (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+1.3*25/h				

Tableau(I.1). : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-2-2).

I.5 Les solutions traditionnelles.

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électrotechniciens. 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. Parmi ces techniques on peut citer [9]

I.5.1 Compensation des courants harmoniques.

I.5.1.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.

L'utilisateur ne souhaite pas résoudre les problèmes de pollution mais seulement le souci de la bonne santé de ses équipements. Cette approche, économiquement très contraignante ne s'applique que pour des nouvelles installations. On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur [2].

I.5.1.2 Transformateurs 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. [22].[23]

I.5.1.3 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 nonlinéaire. Peu onéreuse, la self a cependant efficacité limitée. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux. [22].

I.5.1.4 Filtre passif

Il s'agit des premiers dispositifs utilisés pour l'élimination des harmoniques [AMA06], [ABD08], [KAR09], [ALA02]. Ils sont composés par des éléments passifs comme les inductances, les condensateurs et les résistances. En général, les filtres d'harmoniques sont connectés en parallèle avec les charges génératrices d'harmoniques (les redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arcs électriques, etc...). On différencie quatre types de filtres passifs : les filtres réglés à des fréquences déterminées, les filtres passe-haut, les filtres passe-bas et les filtres passe-bande. Le choix le plus commun pour le redresseur à thyristors de haute puissance consiste à utiliser une combinaison de plusieurs filtres réglés à une seule fréquence (sur les harmoniques 5, 7, 11 et 13) et un filtre passe haut du deuxième ordre réglé autour de la fréquence de l'harmonique 17 [AKA05], [AMA06]. Les filtres harmoniques passifs ont

l'avantage de pouvoir corriger le facteur de puissance en dimensionnant correctement les condensateurs afin d'échanger une quantité déterminée de puissance réactive avec le réseau. Cependant, ces filtres présentent quelques inconvénients :

- L'impédance du réseau en présence des filtres 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.[7].

I.5.2 Compensation de la puissance réactive.

La puissance réactive est majoritairement consommée par moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Le but des méthodes décompensation est d'améliorer le facteur de puissances. La solution classique la plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin D'autres inconvénients prépondérantes seront discutés par la suite. [12]

I.5.3 Rééquilibrage des courants du réseau électrique.

C'est une solution qui permet de répartir les charges d'une manière identique sur les trois phases. En effet, les charges monophasées et biphasées mal réparties engendrent des courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension. [9]

I. 6 Solutions modernes de dépollution.

I.6.1 Filtrage actif.

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles que présentent les filtres passifs (non adaptabilité aux variations de la charge et du réseau, apparition des résonances). Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en parallèle (FAP), soit en série (FAS) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les courants ou les tensions harmoniques, soit associé à des filtres passifs pour constituer ce qu'on appelle les filtres hybrides [ABD08], [ALA02], [YUE07].

Les avantages les plus importants des filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants [AKA05]:[7].

- Le volume physique du filtre est plus réduit,

- La capacité de filtrage est supérieure,
- La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils ont aussi quelques inconvénients :

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

I.6.1.1 Filtre actif parallèle:

Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de filtres actifs parallèles a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations de courant. Fig.(I.5) affiche un filtre actif parallèle connecté à un réseau électrique. [13]

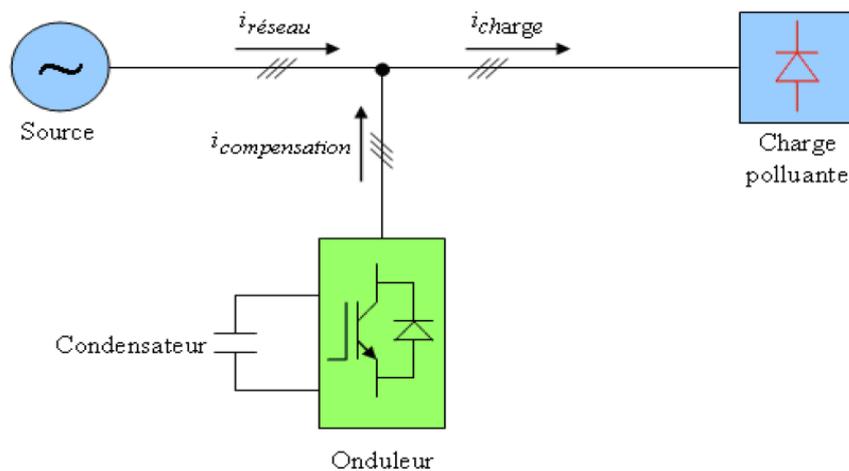


Fig.(I.5):Filtre actif parallèle connecté à un réseau.

I.6.1.2 Filtre actif série.

La solution moderne la plus flexible qui permet la dépollution des réseaux électriques des perturbations de tension est l'utilisation des filtres actifs séries. Ce filtre est connecté en série avec le réseau de distribution comme le montre la Fig.(I-6), il se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibre, etc...) venant de la source et également à celle provoquée par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge (sensible) à protéger est purement sinusoïdale [ABD08], [MEK07], [TAD08], [AMA06].[7].

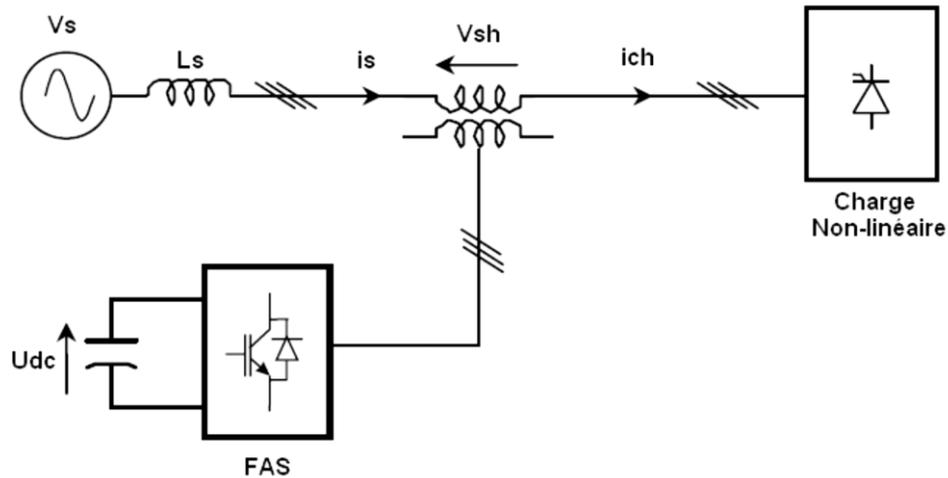


Fig.(I-6) Filtre actif série

I.6.2 Filtrage hybride

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif Fig.(I.7). Est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et; une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation (HF) car il présente une haute impédance à cette fréquence [15]

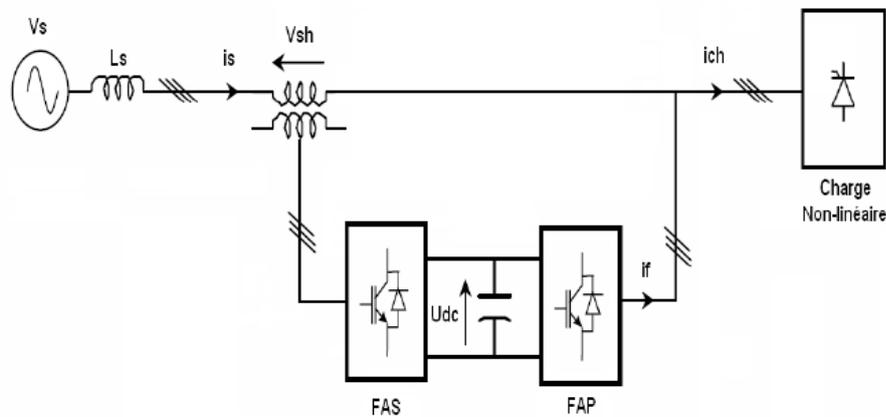


Fig.(I.7).Conditionneur actif de puissance UPQC

I.6.2.1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme le décrit la Fig.(I.8) [16].

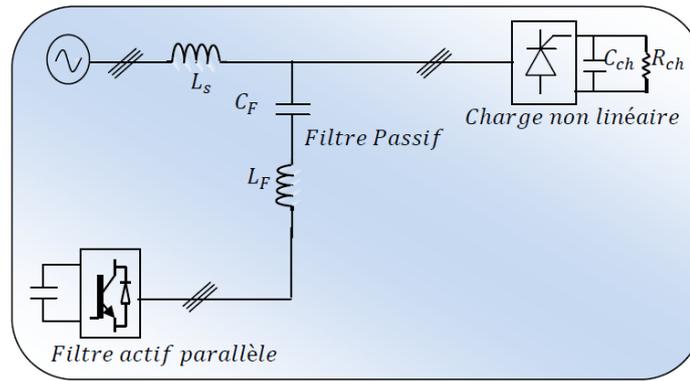


Fig.(I.8):Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge . [16].

I.6.2.2 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous deux sont également en parallèle avec la charge. Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences

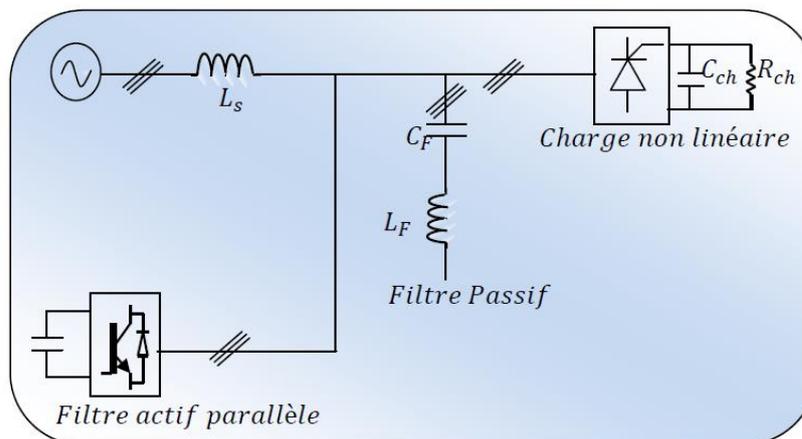


Fig.(I.9):Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Parmi les configurations présentées dans ce paragraphe, nous nous intéressons dans ce mémoire à la première structure Fig.(I.9), notamment pour ses avantages non seulement en termes de dimensionnement des composants passifs et des semi-conducteurs de puissance mais également pour la simplicité de sa commande .

I.6.3 Les redresseurs MLI.

I.6.3.1 Redresseur de tension.

Le redresseur à *MLI* de tension est basé sur une structure d'onduleur de tension représenté sur la figure Fig. (I.10). 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 sinusoïdale, 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 [25].

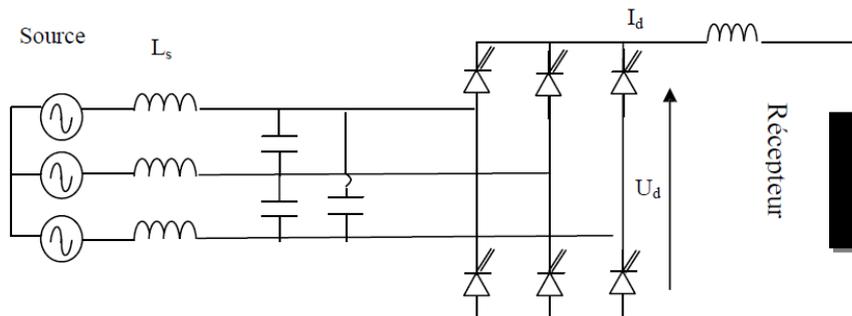


Fig.(I.10) : Redresseur à *MLI* de tension.

I.6.3.2 Redresseur de courant.

Son schéma de principe est présenté sur la fig. (I.11). Les composants de puissance disponibles (*IGBT*, *GTO*) étant unidirectionnels en courant, le courant dI sera également. La réversibilité en puissance s'effectue par l'inversion de la tension redressée U_d . Le contrôle de la puissance réactive est obtenu par action sur la phase du courant réseau par rapport à la tension [2].

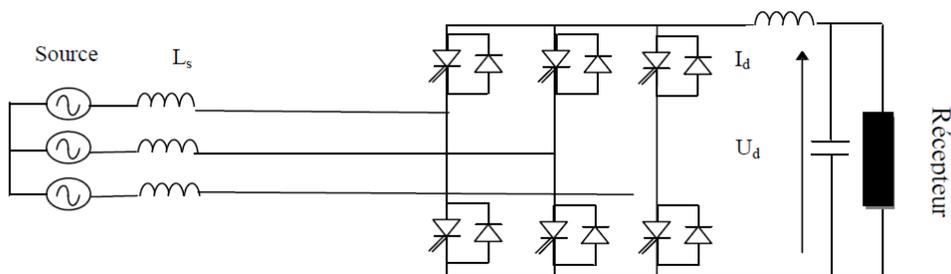


Fig.(I.11) : Redresseur à *MLI* de courant.

I.7 Conclusion.[1].

Dans ce chapitre, nous avons présenté la distorsion harmonique et les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique ainsi que leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements. Les normes imposées ont été également présentées. Elles fixent les limites de la génération d'harmonique.

Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème ; les technologies mises en œuvre, telles que les filtres passifs, sont souvent pénalisantes en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et des charges polluantes. En ce qui concerne les solutions modernes, nous avons présenté les deux topologies utilisées, le filtre actif et le filtre hybride. Ces topologies ont pour but de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau redeviennent sinusoïdaux. En effet, grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.



CHAPITRE II:
structure du filtre actif
parallèle 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 principaux blocs, soit l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue et du courant du filtre actif parallèle,

II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance.

La Fig. II.1 présente le principe d'un compensateur actif de type parallèle qui permet de compenser les harmoniques de courant de la charge polluante à l'aide d'une source de courant mise en œuvre. [13]

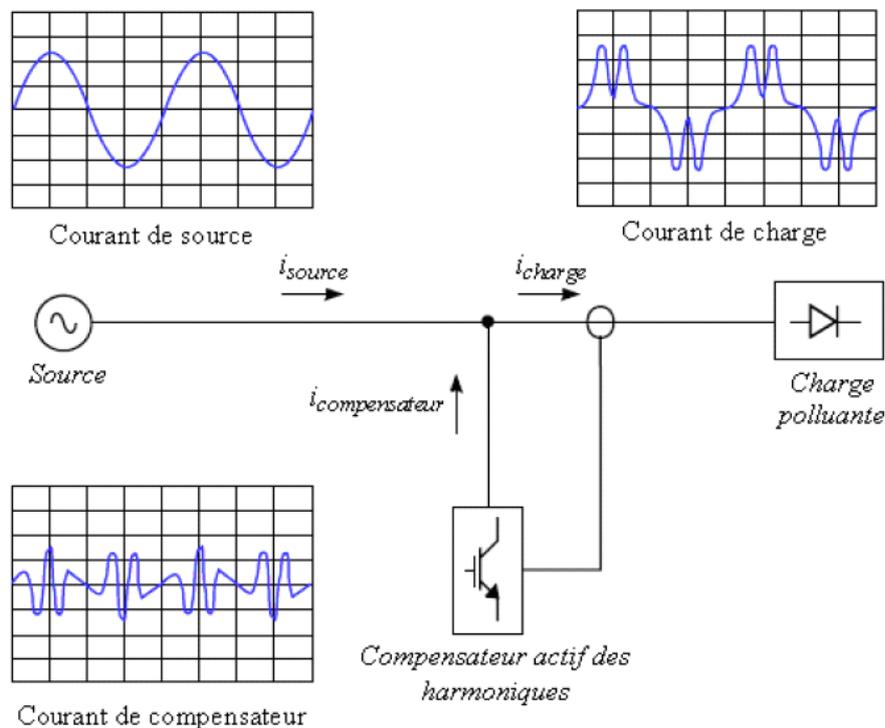


Fig.(II.1): principe de la compensation active des harmoniques.

Le principe est d'injecter un courant en opposition de phase avec les courants de la charge afin d'obtenir un courant le plus sinusoïdal possible au niveau de la source. En général, la présence d'une charge polluante sur le réseau électrique entraîne la circulation de trois

composantes de puissance active, réactive et déformante, le filtre actif peut alors compenser la puissance réactive et la puissance déformante mais cela nécessite une commande lui associée.

II.3 Structure du 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.

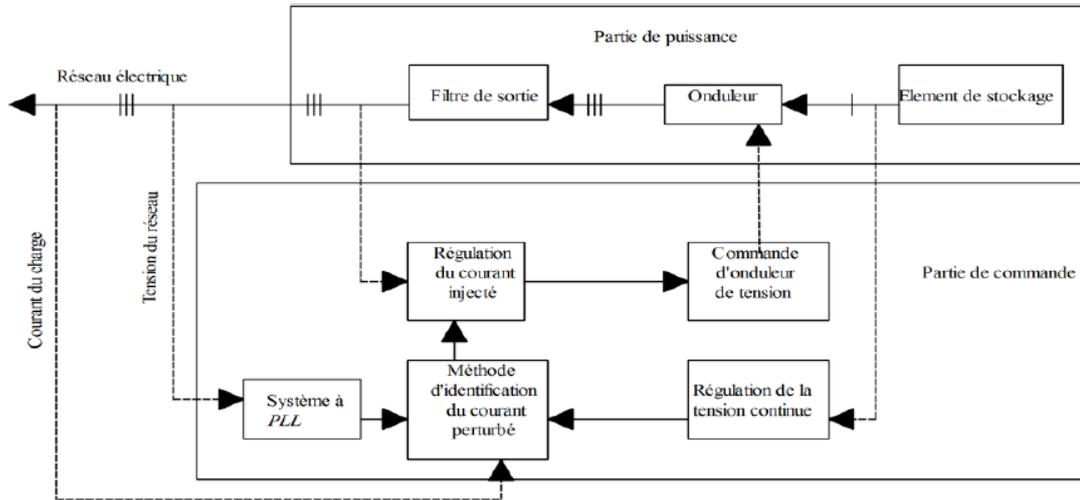


Fig.(II.2): Structure générale de filtre actif parallèle.

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 [26].

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.

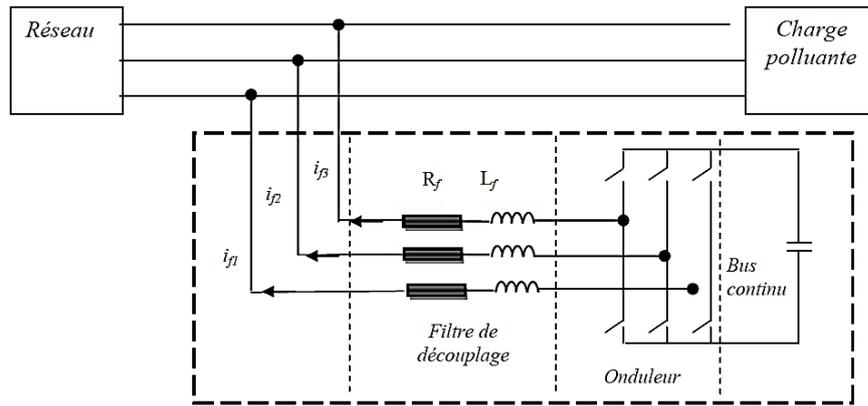


Fig.(II.3): Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.

II.3.1.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle

• Structure générale

L'onduleur est la partie essentielle du filtre actif [29]. 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 [34],[30].

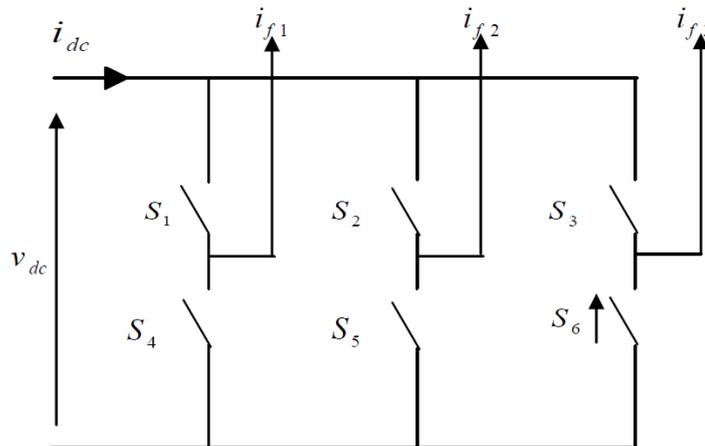


Fig.(II.4): Structure d'un onduleur triphasé.

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 [32].

• 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 [27],[36].

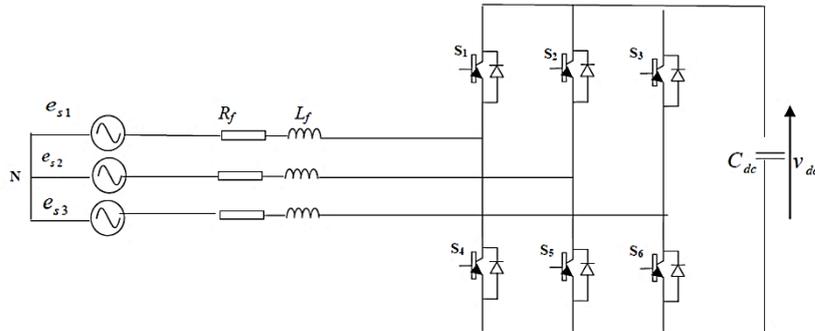


Fig.(II.5): Structure filtre active parallèle à tension.

L'onduleur utilise des interrupteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture associés à des diodes montés. L'onduleur de tension utilise des interrupteurs réversibles en courant 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 [32].



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 fig (II.7). On insère entre l'onduleur et le réseau un filtre d'entrée (d'un filtre passebas) 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 [22],[27].

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 [36].

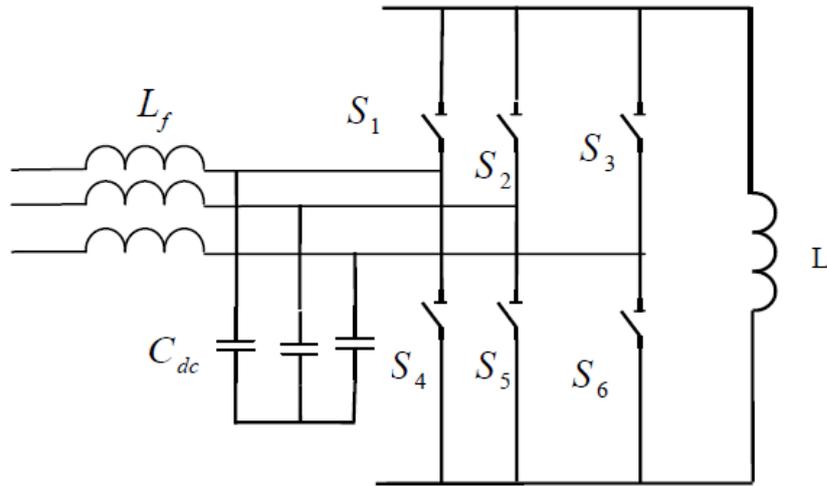


Fig.(II.7): Structure de filtre actif à courant.

• **Comparaison des deux structures**

- a) 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.
- b) 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 [9]. Par conséquent, nous avons retenu cette structure par la suite.

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} [23].

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 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 [22],[33].

Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux

méthodes peuvent être utilisées [34]:

* 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:

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

où: $d I$ représente le courant de charge coté continu.

Le fondamental du courant de la charge est donné par :

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

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:

$$\sum_{h=2}^{\infty} I_h = \sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2} = 0.43 I_s \quad (\text{II.3})$$

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 :

$$C_{dc} \geq \frac{0.43 I_s}{6 f_s (V_{dsmax}^2 - V_{dsmin}^2)} \quad (\text{II.4})$$

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} [35].

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

$$C_{dc} = \frac{I_h}{V_{dc} \Delta V_{dc} \omega_h} \quad (\text{II.5})$$

où: ω_h la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser

II.3.1.3 Filtre de sortie.

Le rôle principal du filtre de sortie est de permettre la connexion du convertisseur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du convertisseur et le réseau [NIA96], [ALA02]. Ce filtre à un double rôle, il limite la dynamique du courant et réduit aussi la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations.

Dans le cas du FAP, ce filtre est composé d'une inductance L_f de résistance interne R_f . Notons toutefois que des filtres de découplage du troisième ordre, de type L-C-L, pourraient

également être utilisés. [13]

II.3.2 Etude de la partie commande.

La commande est mise en oeuvre en trois étapes. Dans la première étape, la tension de réseau et le courant de la charge sont détectés à l'aide de transformateurs de mesures (le TC et le TP). Dans la deuxième étape, on détermine le courant de référence à partir des méthodes d'identifications approuvées. Dans la troisième étape de commande, les signaux de commutation de semi-conducteur de l'onduleur de l'FAP sont générés en utilisant, l'hysteresis, MLI classique ou vectorielle, en mode glissant, ou des techniques de contrôle à base de logique floue. Donc la commande d'un filtre actif parallèle triphasé est basée sur la division du système en deux boucles. Le premier sert à générer les courants de références, que l'onduleur doit injecter dans le point de raccordement, quant au deuxième, il sert à contrôler les courants injectés par l'onduleur de sorte qu'ils suivent le plus fidèlement possible ceux de la référence. [2]

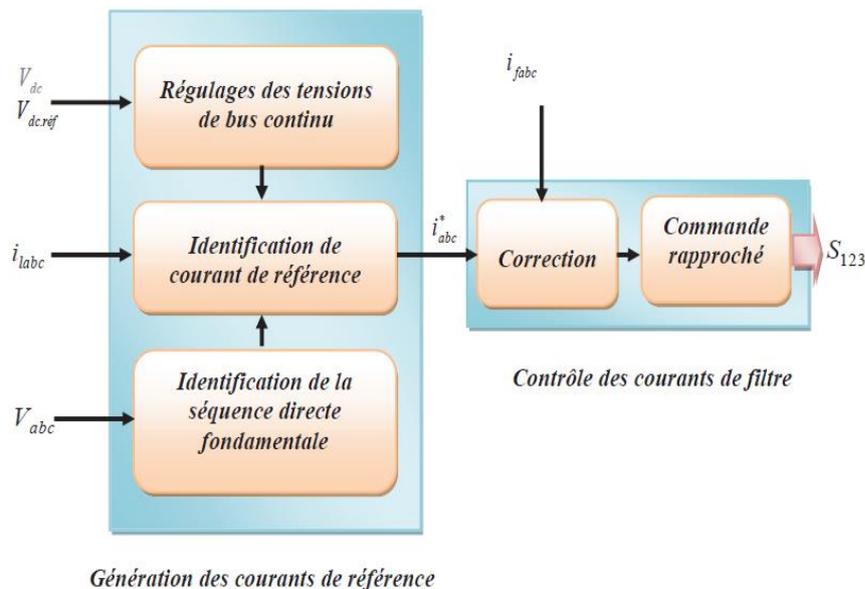


Fig.(II.8):commande du fap

La commande du filtre actif parallèle est basée sur la nature de l'onduleur qui produit le courant à injecter dans le réseau et la commande choisi pour contrôler cet onduleur.

II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courants perturbés

Les performances du filtre actif dépendent des semi-conducteurs de puissance utilisés pour réaliser l'onduleur et le choix de la méthode utilisée pour compenser la composante harmonique du courant de charge. Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme

références du filtre actif parallèle. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées:

- a) Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.
- b) Identification à partir de la détection du courant de la source.
- c) 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

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles [22],[32],[33],[36],[28].

◆ Les stratégies de commande dans le domaine fréquentiel sont basées sur le principe de l'analyse de Fourier et nécessitent la périodicité de l'onde polluante. Parmi ces stratégies, La transformée de Fourier rapide (*FFT*), la transformée de Fourier discrete (*DFT*), la transformée de Fourier discrète récursive (*RDFT*) et le filtre de *Kalman* sont les méthodes usuellement utilisées dans le domaine fréquentiel

◆ Les stratégies de commande temporelle sont basées sur le principe de maintenir la tension ou le courant instantané proche d'un signal sinusoïdal, ce avec une tolérance raisonnable. Parmi ces stratégies, on peut citer:

La méthode des puissances instantanées(*pq*): Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation, la théorie de référentiel lié au synchronisme (*dq*), la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (*pqr*) et enfin la méthode du filtre coupe-bande.

Une autre méthode, appelée la méthode de détection synchrone et reposant sur la transformée de *Park*, a été proposée. Cette méthode se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une *PLL*. Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés.

La méthode de puissance instantanée est la méthode la plus connue et 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 [32], [34], [36], [19].

II.3.2.1.2 . Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées

a- Généralités sur la théorie des puissances active et réactive instantanées:

Le principe de cette méthode est basé sur le passage de système triphasé constitué par les tensions simples et les courants de lignes à un système biphasé (α, β) en utilisant la transformation de Concordia.

Notons que (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) et $(I_{cha}, I_{chb}, I_{chc})$ les tensions simples et les courants de lignes du système triphasé équilibré dans le repère abc.

(α -Les expressions des tensions $(V_{s\alpha}, V_{s\beta})$ et des courants $(I_{ch\alpha}, I_{ch\beta})$ dans le repère biphasé β) calculées en utilisant la transformation de Concordia sont données par les relations suivantes : [9].

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_{ch\alpha} \\ I_{ch\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{cha} \\ I_{chb} \\ I_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 7})$$

I_0 et V_0 les composantes homopolaires de la tension et du courant du système. La puissance active instantanée est calculée par la relation suivante :

$$\mathcal{P}(t) = V_{sa}.i_{cha} + V_{sb}.i_{chb} + V_{sc}.i_{chc} = \mathcal{P}(t) + \mathcal{P}0(t) \quad (\text{II. 8})$$

Avec :

$\mathcal{P}(t)$ est la puissance active instantanée.

$\mathcal{P}0(t)$ est la puissance homolaire instantanée.

$$\mathcal{P}(t) = V_{s\alpha}. i_{ch\alpha} + V_{s\beta}. i_{ch\beta}$$

$$\mathcal{P}0(t) = V_0 \cdot I_0$$

On peut séparer les composantes homopolaires du courant ou de tension du système triphasé et les expressions matricielles précédentes deviennent :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 9})$$

De même, on peut calculer la puissance réactive instantanée de la relation suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sa} - V_{sb}). i_{chc} + (V_{sb} - V_{sc}). i_{cha} + (V_{sc} - V_{sa}). i_{chb}]$$

$$q(t) = V_{s\alpha}. i_{ch\beta} - V_{s\beta}. i_{ch\alpha}$$

En utilisant les relations (II.5), (II.7) et (II.8), nous pouvons exprimer les puissances actives et réactives instantanées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ch\alpha} \\ I_{ch\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

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

$$\begin{cases} p = \bar{P} + \tilde{P} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

p et q sont les composantes continus de p et q liées aux fondamentaux,

\tilde{p} et \tilde{q} sont les composantes alternatives de p et q liées aux harmoniques.

b- Séparation des puissances :

Il est évident, d'après la relation (II.13), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances actives et réactives doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux artifices de filtrage illustrés sur la figure(II.8). [9].

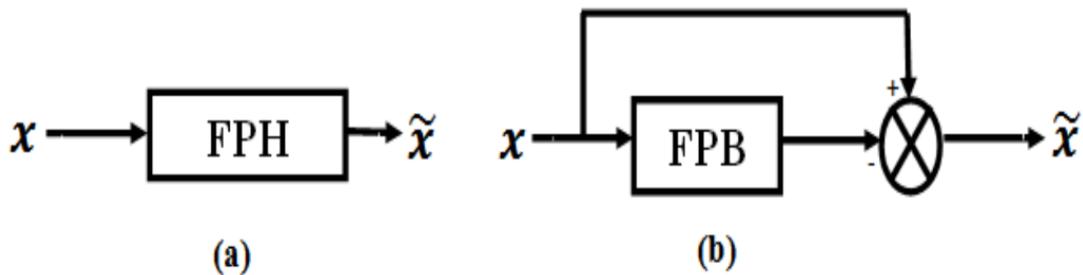


Figure (II.9) : Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives p et q

c- Algorithme d'identification :

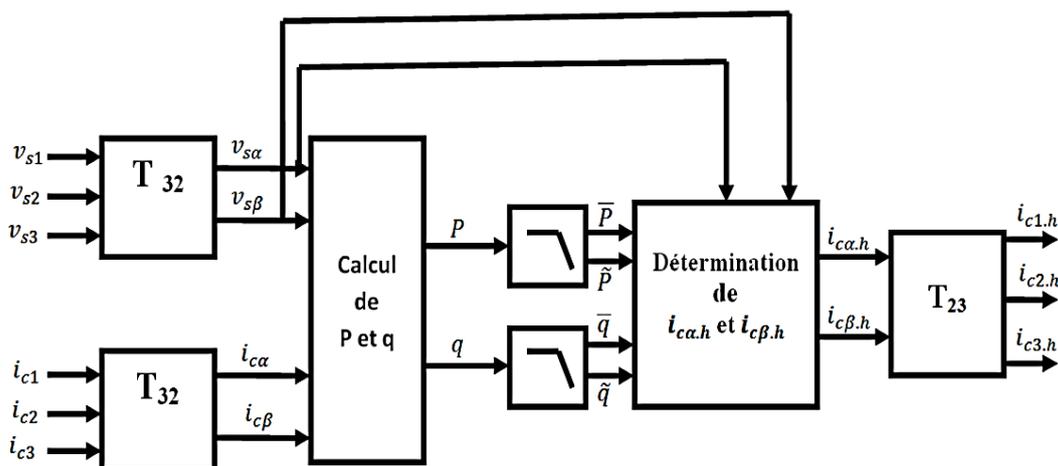


Figure (II.10) : Algorithme réactives instantanées d'identification de la méthode Des puissances actives et réactive instantané

II.3.2.2 Système a PLL.

La tension appliquée dans la méthode d'identification est une tension triphasée fournie par un système à base de PLL (Phase Locked Loop ou Boucle Verrouillage de Phase). En effet, comme nous l'avons montré précédemment, la tension du réseau doit être saine (sinusoïdale et équilibrée), sinon la méthode des puissances instantanées n'est pas applicable. Puisque la tension du réseau est souvent perturbée et / ou déformée, et afin de généraliser l'application de la méthode d'identification que nous avons adopté à tout type de tension. Il est utilisé dans cette méthode pour la compensation de toutes les perturbations en tension. La PLL est utilisée pour extraire la phase de la composante fondamentale directe de tension. Son fonctionnement sur la transformation de Park dans le repère dq . Les tensions V_{s123} subissent dans un premier temps la transformation (C - P). Les tensions ainsi obtenues sont exprimées dans le repère de Park par une rotation. L'angle de cette rotation, issu de l'intégration de la pulsation déterminée par le régulateur, représente l'angle de la composante directe de tension. Nous souhaitons que l'angle de rotation soit égal à l'angle réel de la tension directe. Cela peut être réalisé en désirant la valeur de V_{dref} qui satisfait cette condition. La PLL sera verrouillée lorsque l'angle de vue sera égal à la tension directe. [13]

II.3.2.3 Commande de onduleur

II.3.2.3 .1 Commande par hystérésis .

L'objectif de la commande par hystérésis, encore connue sous la dénomination de commande en tout ou rien, est de contrôler les courants de compensation en les forçant à suivre ceux de référence. Un système de base pour le contrôle de la bande d'hystérésis est représenté sur la Fig.(II.9). [2]

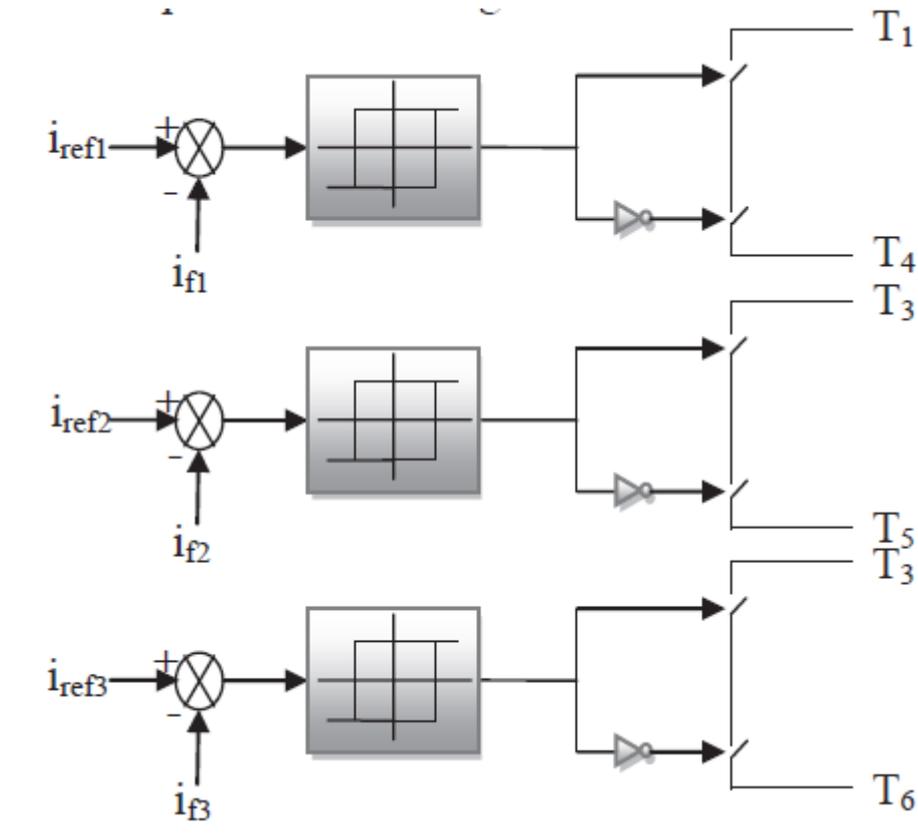


Fig.(II.11): Principe de commande par MLI

Les courants de charge réels sont détectés et comparés avec leurs composants non actifs. Cette technique peut être caractérisée par une bande d'hystérésis qui est le seul paramètre de contrôle de courant de chaque bras de l'onduleur. Les signaux de sortie des comparateurs à hystérésis sont utilisés pour commander l'ordre de commutation des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur. Le courant de compensation va rester dans une bande autour du signal de référence, voir la Fig.(II.4)

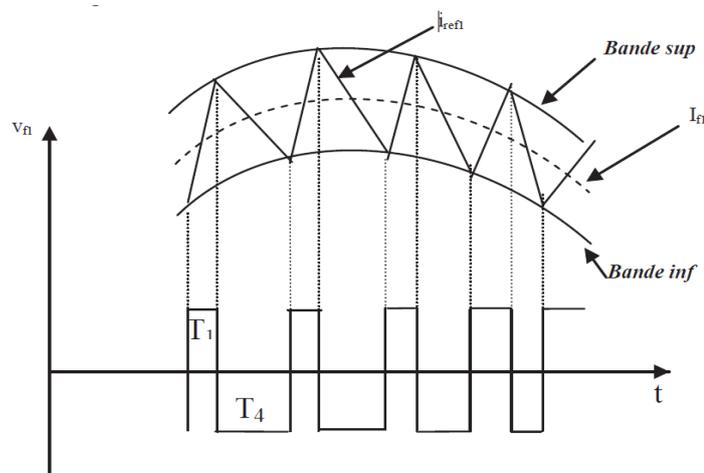


Fig.(II.12):Commande des interrupteurs par hystérésis

La simplicité de la mise en œuvre, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluent librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser

correctement le spectre de haute fréquence dû aux fréquences de commutations

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

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. [14].

Le schéma de principe est donné par la Fig.(II.13.)

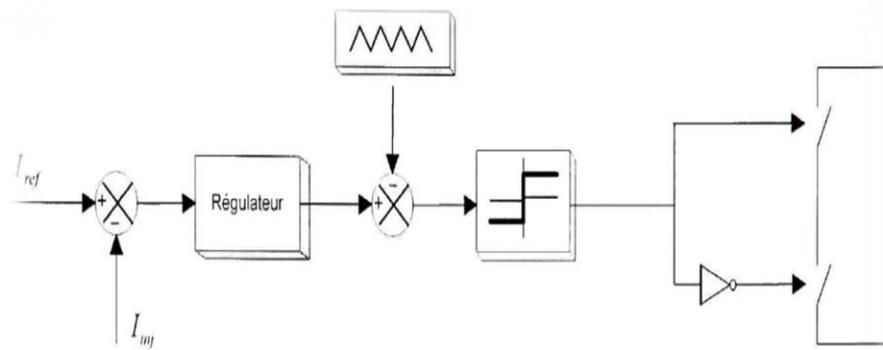


Fig.(II.13):principe de commande des courants par MLI

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

- la MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse,
- la MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse. Finalement, nous avons choisi, dans la suite de notre étude, la technique de commande à
- MLI à échantillonnage naturel. Cette technique représente en réalité la MLI analogique et pourra être employée dans la partie de simulation profitant en cela de sa facilité de modélisation.

II.3.2.4 Régulation de la tension continue.

La tension continue (V_{dc}) doit être régulée pour qu'elle soit maintenue constante. Sachant que le changement de cette tension est cause, principalement, lors l'échange de puissance active avec le réseau. En supposons que les pertes au niveau de l'onduleur et du le filtre de sortie soient négligeable. La relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses.[10].

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.12})$$

D'où sous la forme de *Laplace*, on a :

$$P_{dc}(s) = \frac{1}{2} S C_{dc} V_{dc}^2(s) \quad (\text{II.13})$$

Alors, on déduit la tension aux bornes du condensateur:

$$V_{dc}^2 = \frac{2P_{dc}}{S C_{dc}} \quad (\text{II.14})$$

A partir de cette dernière relation(II.12), la boucle fermée de réglage de (v_{dc}) est montrée par la figure suivante :

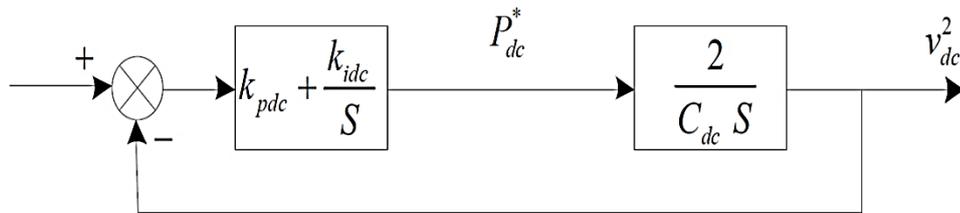


Fig.(II.14):Boucle fermée de réglage de la tension continue

On déduit :

$$\frac{\left(1 + \frac{K_{P_{dc}} S}{K_{i_{dc}}} \right)}{S^2 + 2 \frac{K_{P_{dc}}}{C_{dc}} S + 2 \frac{K_{P_{i_{dc}}}}{K_{i_{dc}}}} \quad (\text{II.15})$$

Donc, par identification avec la forme standard de la fonction de transfert de deuxième ordre, on déterminée les expressions des coefficients du régulateurs PI soient :

$$K_{i_{dc}} = \frac{1}{2} C_{dc} \omega_c^2 \quad (\text{II.16})$$

$$\omega_c = 2\pi f_c \quad (\text{II.17})$$

$$K_{P_{dc}} = \xi \sqrt{2 C_{dc} K_{i_{dc}}} \quad (\text{II.18})$$

On choisit, alors $\xi = 0.707$ est $= 20f_c$ pour assure un amortissement optimum et un bon filtrage.

II.3.2.5 Régulations du courant du filtre actif

Le dimensionnement des gains de la boucle de commande du courant dépend du modulateur sélectionné. Comme précédemment décrit, dans le cas de la technique de la porteuse triangulaire, afin de générer les signaux de gâchettes, l'erreur du courant passe d'abord par un correcteur Proportionnel-Intégral *PI*, puis elle est comparée avec une onde triangulaire à amplitude et fréquence fixées.

Dans le cas où le filtre actif est à base d'un onduleur de tension, le courant alternatif de sortie est défini par la tension de sortie. La boucle de commande du courant est présentée dans la Fig. (II.15)

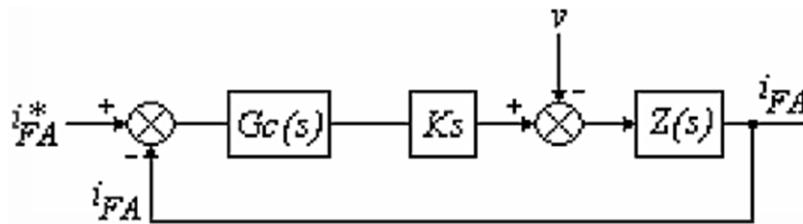


Fig.(II.15):Boucle de régulation du courant.

Avec:

v , tension donnée par l'équation (II.14),

$Z(s)$, impédance du côté alternatif du filtre actif,

Ks , gain du convertisseur,

$Gc(s)$, gain du régulateur.

Les valeurs de Ks et $Gc(s)$ sont données par les équations (II.13) et (II.14)

$$Ks = Vdc2\xi \quad (II.19)$$

$$Gc(s) = kp + \frac{ki}{s} \quad (II.20)$$

A partir de la Fig. (II.13) (cas d'un filtre de sortie RL), et de l'équation (II.14), les expressions suivantes sont obtenues pour un module de Z égal en instantané à $\sqrt{R_{FA}^2 + (L_{FA}\omega)^2}$, R_{FA} , L_{FA} étant respectivement la partie résistive et la partie inductive de Z

$$I_{FA} = \frac{[Ks.(Kp+(Ki/s))]/(R_{FA}+S.L_{FA})}{1+[Ks.(Kp+(Ki/s))]/(R_{FA}+S.L_{FA})} \cdot I_{FA} - \frac{1/(R_{FA}+S.L_{FA})}{1+[Ks.(Kp+(Ki/s))]/(R_{FA}+S.L_{FA})} v \quad (II.21)$$

L'équation caractéristique de la boucle du courant est donnée par:

$$H = 1 + \frac{(kp.S + \frac{Ki}{S})}{S.(R_{FA} + S.L_{FA})} \quad (II.22)$$

L'analyse de cette équation prouve que la boucle de courant est stable pour toutes les valeurs de k_p et k_i . En plus, l'analyse montre que k_p détermine la rapidité de la réponse, et k_i définit le facteur de dépassement de la boucle de commande. Si k_p est trop grand, l'erreur peut excéder l'amplitude de la porteuse triangulaire, affectant ainsi la fréquence de commutation de l'onduleur, et si k_i est trop petit, le gain du correcteur PI diminue, ce qui implique que le courant généré ne sera plus apte à suivre exactement sa référence. La réponse transitoire du filtre actif peut être améliorée en ajustant le gain du PI de manière à ce que le k_p soit égal à 1 et que le k_i soit égal à la fréquence de la porteuse triangulaire

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 réelle et imaginaire avec (FPB et FMV) 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 qu'une boucle de régulation de la tension continue dc v du filtre actif afin d'assurer un fonctionnement plus stable.



CHAPITRE III:
modélisation et simulation
De l'ensemble réseaux électrique,
charge polluante et filtre actif parallèle

III Introduction.

L'objectif principal de ce travail est la compensation des courants harmoniques en utilisant le filtrage actif à base d'un convertisseur statique onduleur de tension à deux niveaux.

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 n'est rien d'autre qu'un onduleur de tension commandé en courant, qui possède une source dite flottante (condensateur) et qui est connecté au réseau perturbé par un filtre inductif. La figure (v-1) donne le schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante [36].

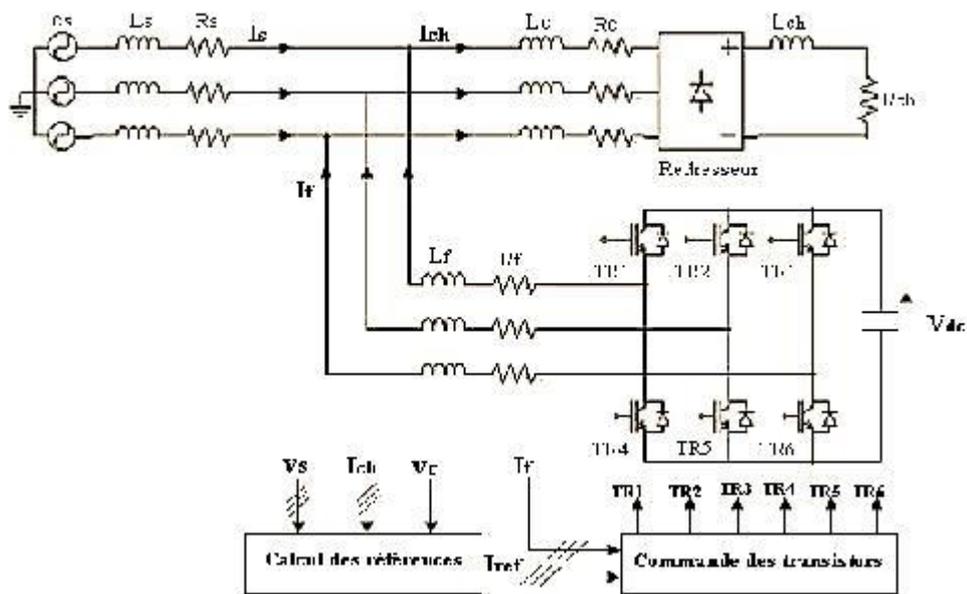
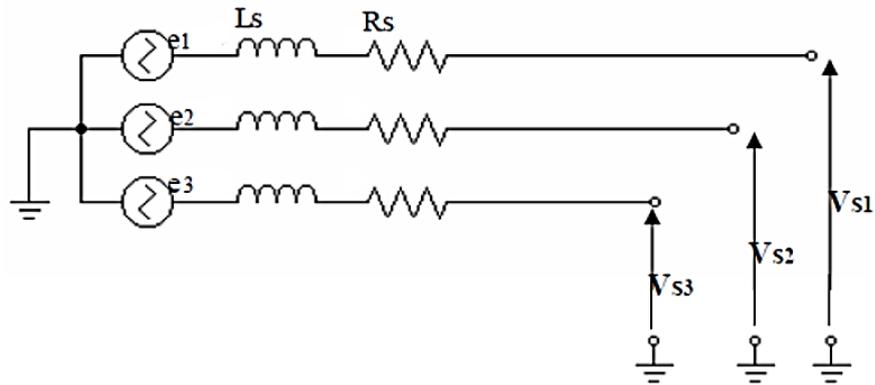


Fig.(III.1): Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.

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

III- 3- 1 Modélisation du réseau électrique:

Le réseau est une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance de court-circuit (Z_s) comme décrite la figure (III 2). [9]



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

Les tensions triphasées et équilibrés du réseau sont exprimées par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} e_{s1} \\ e_{s2} \\ e_{s3} \end{bmatrix} = \sqrt{2} v_n \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t - 4\pi) \end{bmatrix} \quad (\text{III1})$$

V_n est la valeur efficace de la tension simple d'alimentation du réseau .

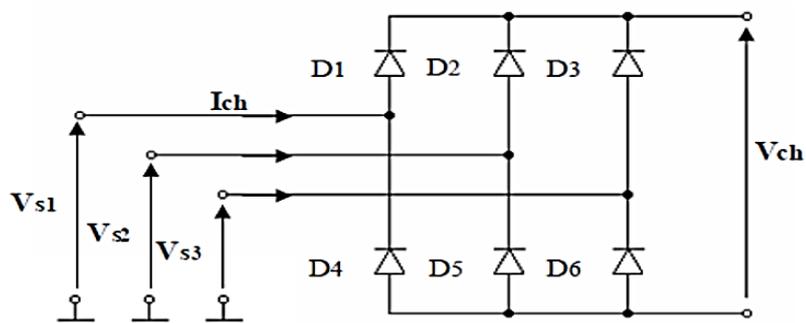
l'impédance de court-circuit est exprimée par la relation suivant

$$Z_s = R_s + j\omega L_s \quad (\text{III2})$$

III.3.2 Modélisation de la charge polluante (redresseur a diode)

Dans ce travail, on considère comme une charge polluante, un pont redresseur triphasé non commandé a diodes qui génère des courants harmoniques de l'ordre $6k \pm 1$.

La figure (III.3) donne le schéma de principe de cette charge. cette charge est modélisée comme étant sources de courant parfaites. [9].



Fig(III.3): Schéma de principe de la charge polluante

III-3-3 Modélisation du filtre actif (ou de l'onduleur).

Dans notre étude, on choisit un onduleur de tension commandé en courant. ce dernier est constitué de trois bras dont chacun est constitué de deux cellules, contenant chacune un interrupteur bicommandable (mosfet), aux bornes duquel est monté une diode en antiparallèle,

la cellule ainsi définie forme un interrupteur bidirectionnel (figure(III -4)) .[36].

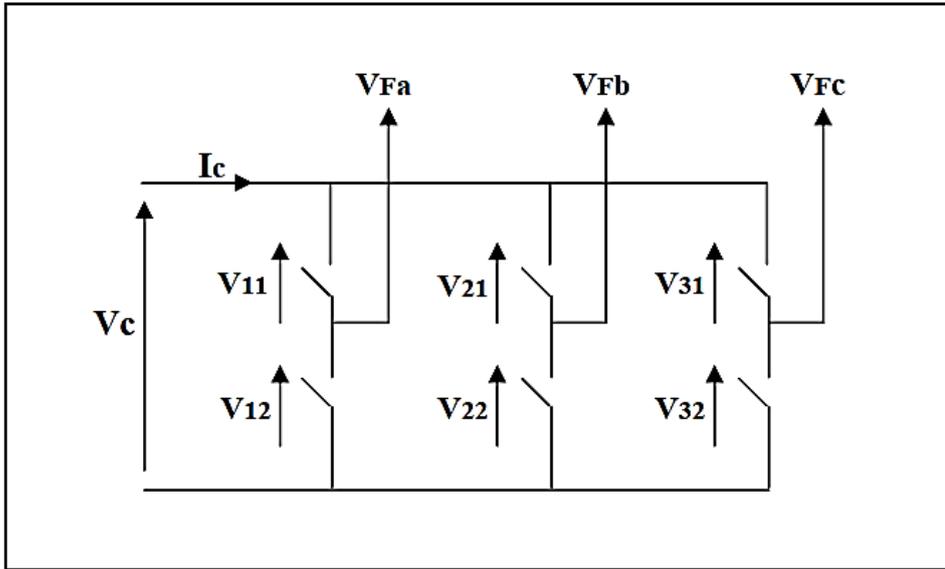


Fig (III.4): Présentation schématique d'un onduleur triphasé.

- fonction de connexions

soit $i = 1, 2, 3$

$j = 1, 2$

on associe a chaque interrupteur une fonction f_{ij} dite de connexion, tel que :

$$f_{ij} = \begin{cases} \text{si l'interrupteur est fermé} \\ \text{si l'interrupteur est ouvert} \end{cases}$$

d'où

$$\begin{cases} I_{ij} = F_{ij} I_c \\ V_{ij} = (1 - F_{ij}) V_c \end{cases}$$

tel que i_{ij} représente le courant qui traverse l'interrupteur k_{ij} et v_{ij} la tension aux bornes de ce dernier [20].

- fonctions de conversions composées :

soit V_{fab} , V_{fbc} , V_{fca} les tension composées délivrées par l'onduleur.

$$\begin{cases} V_{fab} = V_{21} - V_{11} \\ V_{ij} = (1 - F_{ij}) V_c \end{cases} \quad (III.3)$$

$$\begin{cases} cV_{21} - V_{11} \\ V_{fab} = V_{31} - V_{21} \\ V_{fab} = V_{11} - V_{31} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{fab} = (F_{21} - F_{11}) \cdot V_c \\ V_{fab} = (F_{31} - F_{21}) \cdot V_c \\ V_{fab} = (F_{11} - F_{31}) \cdot V_c \end{cases} \quad (III.4)$$

d'où

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

les fonctions de conversions composées sont :

$$\begin{cases} F_{ab} = F_{11} - F_{21} \\ F_{bc} = F_{21} - F_{31} \\ F_{ca} = F_{31} - F_{11} \end{cases} \quad (\text{III6})$$

- fonctions de conversions simples

dans l'hypothèse que les tensions simples vfa , vfb , vfc forment un système triphasé équilibré nous avons :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{III7})$$

d'où

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_C \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_C \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \quad (\text{III8})$$

les fonctions de conversion simples s'écrivent alors :

- représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur

dans le plan biphasé (α, β) en considérant vf(k) le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur vf(k) sont donnés par la figure(III -5) .

k	0	1	2	3	4	5	6	7
mod(V_f)	0	$\sqrt{2/3}V_C$	$\sqrt{2/3}V_C$	$\sqrt{2/3}V_C$	$\sqrt{2/3}V_C$	$\sqrt{2/3}V_C$	$\sqrt{2/3}V_C$	0
arg(V_f)		0	$\pi/3$	$2\pi/3$	π	$4\pi/3$	$5\pi/3$	2

Tableau(III -1): Tensions fournies par l'onduleur sous formes vectorielles.

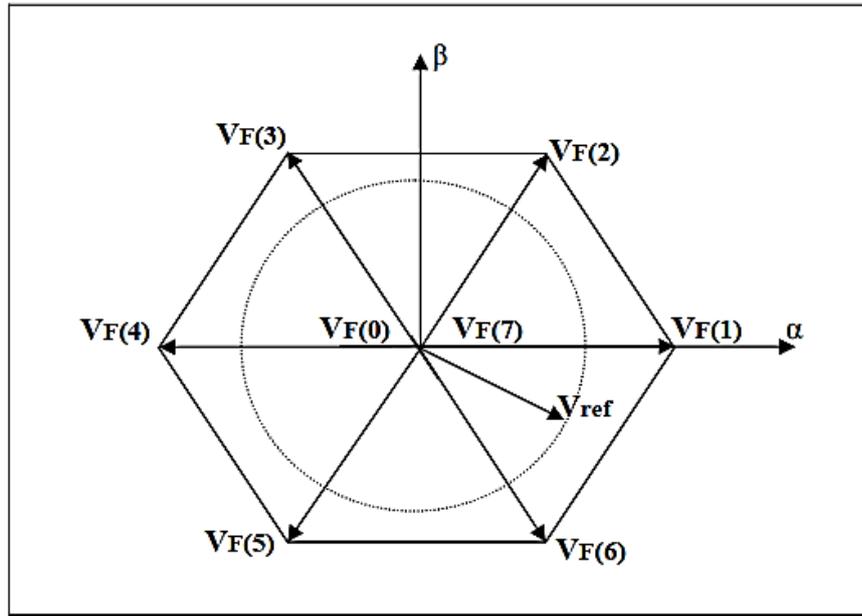


Fig (III.5): représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

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 :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} + R_F \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} + l_f \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} \quad (III.9)$$

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} - R_{cc} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} - l_{cc} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

avec :

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

tension aux points de raccordement.

$$\begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} \quad (III .12)$$

courants délivrés par l'onduleur.

$$\begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

courants fournis par le réseau

Les valeurs des éléments caractérisant l'ensemble réseau-filtre actif et charge polluante sont regroupées dans le tableau(III -2).

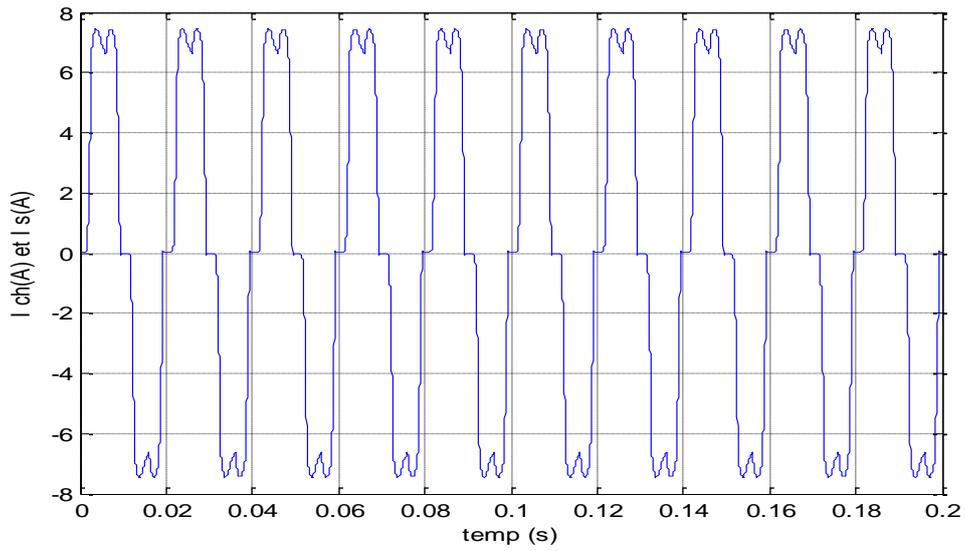
réseau électrique
vs max = 58 v, f = 50 hz , (rs = 0.45 mΩ , ls = 0.25mh)
charge polluante
puissance 740 kva ,(rd = 0.6 Ω , ld = 2 mh),(rc = 0.6 Ω , lc = 1mh)
filtre parallèle
vdc = 120 v, (rf = 0.9Ω , lf = 4mh)
commande hystérésis
Δi = ±20 a

Tableau(III-2): les valeurs des éléments construisant la structure étudiée.

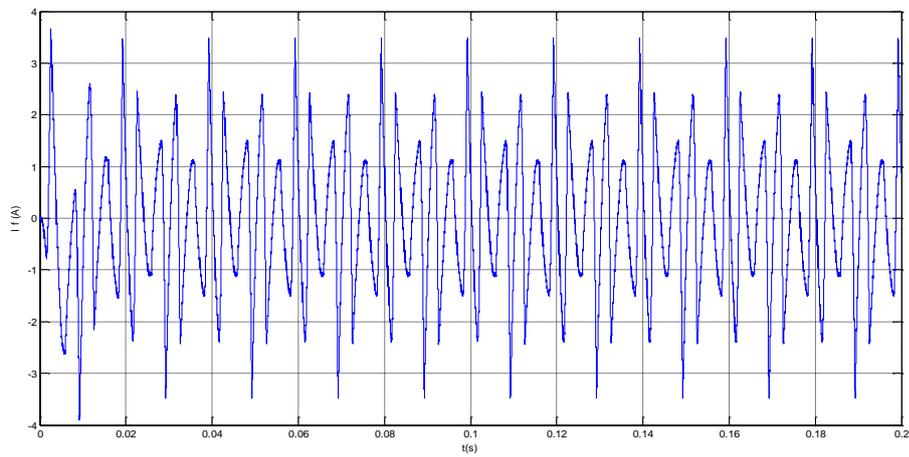
III.4. Résultats de simulation et interprétation.

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)



Fig(III.6):Courant de la source avant filtrage



Fig(III.7): i_f : courant de filtre actif,

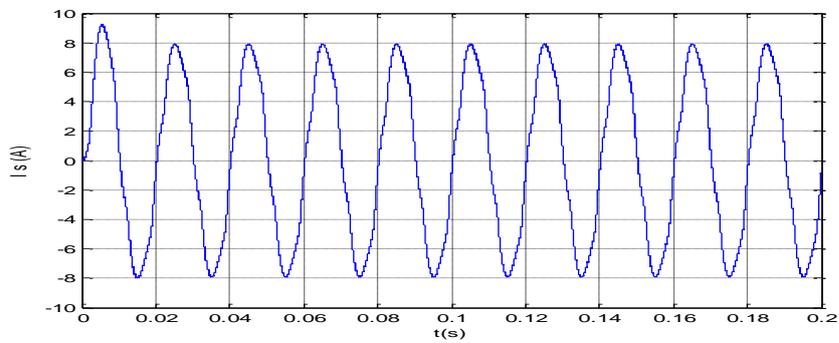


Fig (III.8): i_s : Courant de source.après filtre.

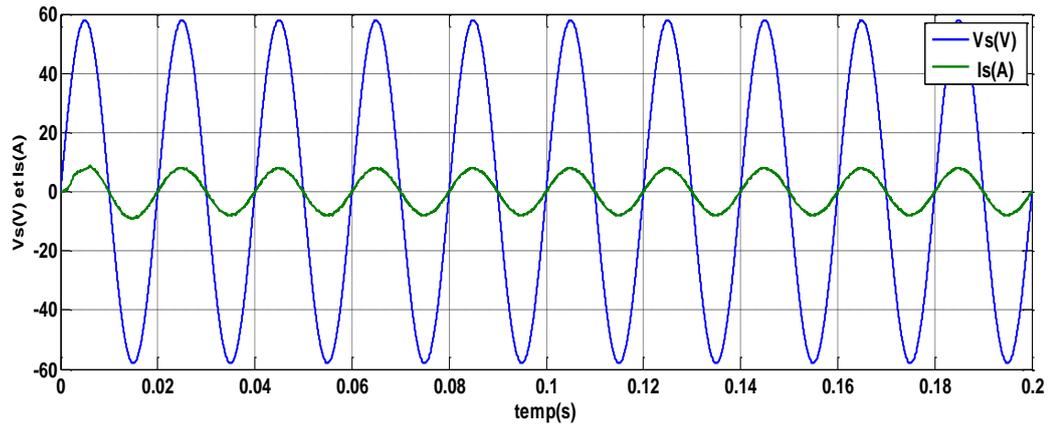


Fig (III.9): Courant et tension de la source après filtrage

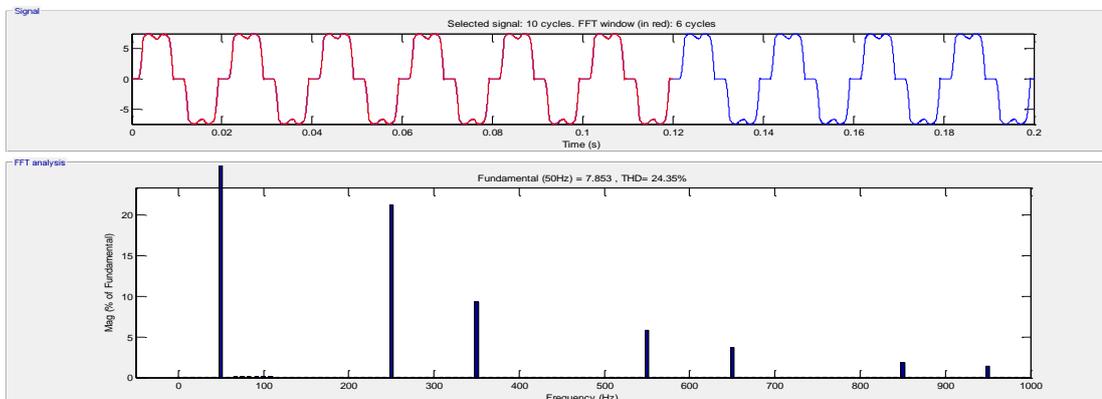


Fig.(III.10): Courant de source i_s avant filtre et l'analyse spectrale.

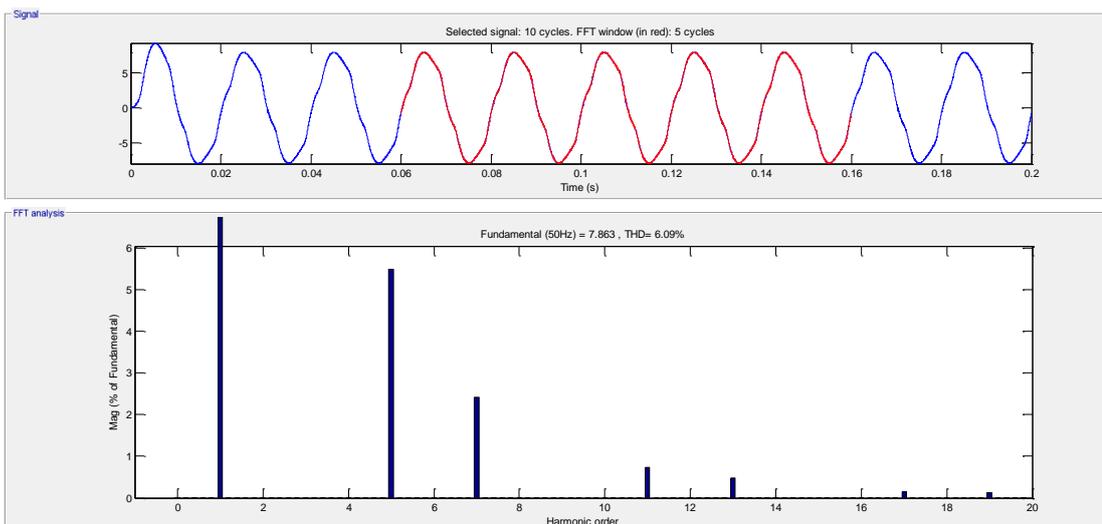


Fig.(III.11): Courant de source i_s après filtre et l'analyse spectrale.

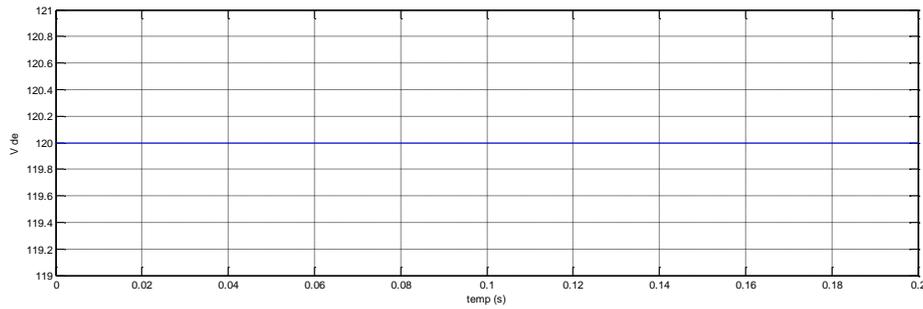


Fig.(III.12):Tension du bus continu

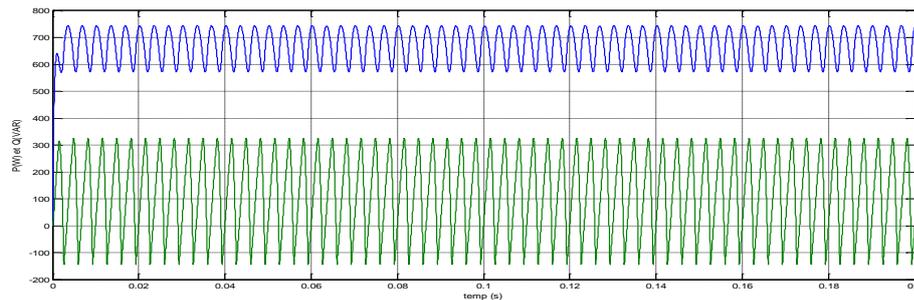


Fig.(III.13): Puissances instantanées active p, puissance réactive q avant filtrage.

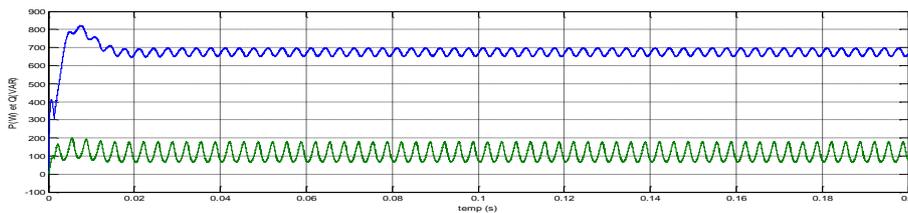


Fig.(III.14): Puissances instantanées active p, puissance réactive q après filtrage

III.4.1 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, on remarque que:

avant filtrage actif :

- avant l'insertion du filtre actif, la figure (III.6) montre la déformation de l'onde du courant de source i_{sa} . cette distorsion est confirmée par le spectre harmonique d' i_{sa} (figure III.8) qui mesure un thdi de 24.35%. la tension de la source v_{sa} et le courant i_{sa} ne sont pas en phase figure (7) ce qui signifie l'existence d'un déphasage considérable entre eux, ce qui a pour effet de réduire le facteur de puissance et de le rendre loin de sa valeur admissible.
- 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.

après filtrage actif :

Si on utilise un pont de Gaetz à diodes débite sur une charge RL, on peut conclure :

- l'insertion de l'inductance L_{ch} lisse le courant de la charge (figure III.6) et par conséquent, la forme d'onde du courant i_s sera parfaitement sinusoïdale (figure III.8), ce qui traduit par la réduction du contenu harmonique du courant i_{sa} (figure III.9).
- le nouveau THDI est de 6.05% cette valeur acceptable conformément aux normes internationales montre que le courant généré par le filtre suit bien sa référence (figure III.7).
- les figures (III.10) et (III.11): 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 redevient stable.
- 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

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé le comportement du système étudié : réseau d'alimentation, charge polluante et le filtre actif parallèle

Les résultats obtenus après des simulations numériques sous l'environnement matlab/simulink démontrent l'efficacité du filtre actif parallèle à deux niveaux de compenser les harmoniques de courant générés par les charges non linéaires, en particulier, l'amélioration de la forme d'onde du courant de source ainsi que la réduction de leur THDI.



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire on s'est intéressé à l'étude des différentes possibilités de filtrage actif des harmoniques des réseaux électriques. Dans un premier temps, après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, on a présenté les solutions traditionnelles pour les réduire, notamment le filtrage passif. Le filtrage actif est une nouvelle solution pour la dépollution harmonique.

Un filtre actif peut être connecter sur le réseau en série ou en parallèle et avoir deux structures électrotechniques différentes : tension ou courant. En raison de simplicité de sa commande, presque la totalité des filtres dans le monde sont de structure tension, c'est la raison principale pour laquelle on a retenu cette structure. On a ensuite étudié le contrôle de ce filtre actif. Pour identifier les courants harmoniques, on a choisi la méthode des puissances réelles et imaginaire instantanées que donne de bon résultats en statique et en dynamique. Les deux principes de commande pour contrôler le courant du filtre, MLI et hystérésis, sont étudiés. La commande hystérésis est très simple à mettre en œuvre mais dans ce type de commande la fréquence instantanée de commutations n'est pas contrôlable. Par contre, en commande MLI, la fréquence des commutations peut être imposée et par conséquent le filtrage passif des harmoniques dues au découpage est plus simple.



Bibliographie

Bibliographie

- [1]GhadbaneIsmail"Commande d'un Filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs" ,Mémoire de magister, Université de Biskra.
- [2]Nekkar Djamel " Contribution A L.Etudedes Strategiesde commande des filtres actifs triphases" ,Memoirede magister, Universitede Souk Ahras.
- [3]Nassar Hanna Mendalek " Qualitede l'onde electriqueet moyens de mitigation"Thesede doctorat A L'ecolede Technologie superieure 2002.
- [4]Melle Hinddjeghloud"Filtrage actif de puissance"Thesede doctorat, UniversiteMentouri Constantine 2007
- [5] DOURA HAKIM"Evaluation du cout des pertes genereespar les perturbation harmoniques dans les reseauxElectriques",Mémoire de magister Université de M'hmedBougara2006.
- [6]HANAN KOUARA"Applicationd'unfiltre actif serirau control de la tension d'un reseau

basse tension" ,Memoire de magister,Universite de batna2006

[7]CHENNAI Salim" Etude modelisationà commande des filtres actifs : Apport des techniques de l'intelligence artificielle ",These de doctorat Universitemohamedkhider – biskra 2013

[8]HAMOUDA NOUREDDINE "Amelioration de la qualite du reseauElectrique à l'aide de compensateurs actifs "These de doctorat,UniversitefreresmentouriConstantine 1, 2018

[9]DOUKHI NACER" Contribution à l'Étude de la qualité de l'énergie" **Mémoire de magister**,Université El-HadjLakhder Batna **2016**.

[10]MOUSSA OUSSAMA" Etude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif ", Mémoire de magister, Université de Batna 2.

[11] J.M. KAUFFMANN"Filtrage actif paralleledes harmoniques des reseauxde distribution d'Electricite", These de doctorat Universite de lorraine 1994

[12]kouzouABDELLAH "Compensation active des perturbations dans un réseau basse tension" ,Memoire de magister,Universite de M'hmedBougara 2004.

[13] Mohamed FERHAT " Commande en temps réel d'un filtre actif de Puissance " Mémoire de magister, Université ferhatabbas – Sétif 2012.

[14] MOHAMED MAGRAOUI " Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallele " Memoire de magister,Universite du Quebec 2007

[15] Mr. BENNAIDJA Tarek "Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus " Memoire de magister,UniversiteFerhat Abbas – Setif-1- 2014

[16] Kamel DJAZIA" Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus ("thèse de doctorat,Universite Ferhat Abbas – Setif 1 2015

[17] ABDELMADJID CHAOUI" Filtrage actif triphase pour charges non linéaires "These de docteur de l'Universite de poitiers 2010.

[18]BENABDELKADER" Abdallah Intitulé FILTRAGE ACTIF SERIE Etude et implémentation"

[19] YOUSFI ABDELKADER"Ameliorationde la qualitéd'energie Electrique en utilisant un onduleur de tension avinqniveaux " **Mémoire de magister**universitéHassibaBenboulide Chlef.

[20]H. Melle, "Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éolienne", Mémoire de Magister, Université Setif 1, 2013.

[21]H. DOUAR, "Evaluation du cout des pertes générées par les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques", Mémoire de Magister, Université M'hamedBougara-Boumerdes ,2006.

- [22] 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.
- [23] Z. CHELLI, "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique", Thèse de doctorat en sciences, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.
- [24] K. 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, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1995.
- [25] A. BOUAFIA, "Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI", Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas-Setif, 2010.
- [26] M. MAGRAOUI, "Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle, Mémoire présentée à l'école de technologie supérieure, Université du Québec, 2007.
- [27] 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.
- [28] D. NEKKAR, "Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés", Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia-Souk-Ahras, 2014.
- [29] 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.
- [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] A. OMEIRI, " Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant", Thèse de doctorat d'état, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2007.
- [32] 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.
- [33] A. RABIE, "Contribution à l'étude du filtre actif parallèle de puissance à trois niveaux", Mémoire de Magister, Université d'El-Oued, 2012.
- [34] M.A.E. ALALI, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension ", Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.
- [35] S. Hafsia, "Commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées", Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider -Biskra, 2015.

[36]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

[37] 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