

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique
Spécialité: Electrotechnique

Mémoire de Fin de Cycle

En vue d'obtention du diplôme Master II en Electrotechnique

Sous le thème

**Etude et simulation d'un filtre actif d'harmonique à
base
D'onduleur trois niveaux**

Réalisé par :

Mr. BOUCHOUCHA Anis.
Mr. MESSAOUDI Hamza.

Encadré par :

Mr. HAMOUDI Farid.

Année Universitaire : 2018/2019

Remerciements

Nous remercions DIEU, le tout-puissant de nous avoir donné la foi qui nous a guidée jusqu'à la réalisation et l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr HAMOUDI Farid pour son orientation, ses conseils, ses encouragements, son aide précieux, et le temps qu'il nous a accordé tout au long de notre travail, nous exprimons notre profond remerciement et respect.

Nous adressons nos plus sincères remerciements les membres du jury d'avoir accordé de leur temps et d'avoir accepté de juger notre travail.

Nos chers parents, pour leurs patiences et leurs sacrifices pour voir ce jour. Ils ont tout donné pour notre réussite.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce travail.

Nos fidèles amis(es) particulièrement Zinou, tous nos remerciements pour vous, pour avoir participé soit de près soit de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACES

*Je dédie ce travail à
Mes parents :*

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit. Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous.

Mon cher binôme Hamza.

Ma grande famille BOUCHOUCHA du petit au grand, mon frère ADEL, mes sœurs AMINA, TIZIRI et AIDA pour leur soutien.

Mes amis(es), mes collègues, toute la famille d'électrotechnique de l'université de Béjaia.

ANIS

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents et ma grande-mère, que dieu les garde et les protège pour leurs soutiens moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mon cher binôme Anis

A tous mes amis (es) et mes Collègues étudiants, chacun à son nom et à tous ceux qui m'ont encouragé le long de ce travail.

HAMZA

Liste des symboles

f_1	Fréquence de la composante fondamentale.
THD	Taux de Distorsion Harmonique.
X_h	Composant harmoniques de rang.
X_1	Composant fondamentale.
h, n	Rang harmonique.
F_p	Facteur de puissance.
I_n	Courant efficace de la charge.
I_1	Courant efficace du fondamentale.
I	Courant de charge.
i_s	Courant du réseau.
F_{dis}	Facteur de distorsion.
P	Puissance active.
Q	Puissance réactive.
S	Puissance apparente.
D	Puissance déformante.
Φ	Déphasage entre le courant fondamental et la tension.
$\cos(\varphi)$	Déphasage.
C	Condensateur.
L	Inductance.
R	Résistance.
$I_{a,b,c}$	Courants de la charge.
I_{inj}	Courant injecté par FAP.
V_{inj}	Tension injecté par le FAS.
L_s, R_s	Impédance du réseau.
C_{dc}	Condensateur du bus continue.
ω_h	Pulsation de l'harmonique de rang h.
I_h	Courants harmoniques de rang h.
V_{dc}	Tension du bus continue.
L_c	Filtre de raccordement.
L_f	Inductance du filtre de sortie.
R_f	Résistance du filtre de sortie.
C_f	Capacité du filtre de sortie.
L_s	Inductance de la ligne.
R_s	Résistance de la ligne.
LCL	Filtre de raccordement du troisième ordre.
M	Point neutre.
T	Interrupteur.
D	Diode.
F_K^b	Fonction de connexion, k : nombre de bras.
F_{k1}^b	Demi-bras du haut.

F_{bk0}	Demi-bras du bas.
V_{abcM}	Tensions de l'onduleur.
U_{abcM}	Tensions composées.
$V_{a,b,c,n}$	Tensions simples.
V	Tension du réseau électrique.
$C_{\alpha\beta}$	Matrice de Concordia.
$C_{\alpha\beta}^{-1}$	Matrice inverse de concordia.
V_{α}, V_{β}	Tensions dans le repère (α, β) .
I_{α}, I_{β}	Courants dans le repère (α, β) .
p, q	Puissance réelle, imaginaire.
\bar{p}, \bar{q}	Puissances continues.
\tilde{p}, \tilde{q}	Puissances alternatives.
$I_{ref a,b,c}$	Courant de référence.
$I_{h\alpha}, I_{h\beta}$	Courants harmoniques.
I_f	Courants injectés par le filtre.
m	Indice de modulation.
ε	Taux d'ondulation admissible.
FT	Fonction de Transfer.
K_i	Coefficient d'action intégral.
K_p	Coefficient d'action proportionnel.
U_S	Tension entre phase.
α	Angle d'amorçage des thyristors
Δh	Bande hystérésis.
V_{dcref}	Tension de référence
P_{loss}	Puissance de compensation des pertes dans le filtre actif.
Th	Thyristor.

Nomenclatures

<i>AC</i>	Courant alternatif.
<i>DC</i>	Courant continu.
<i>THD</i>	Taux de Distorsion Harmonique.
<i>FAP</i>	Filtre Actif Parallèle.
<i>FAS</i>	Filtre Actif Série..
<i>CEI</i>	Commission Electrotechnique Internationale.
<i>IGBT</i>	Transistor bipolaire à grille isolée.
<i>FPB</i>	Filtre passe bas.
<i>PI</i>	Proportionnel Intégral.
<i>MLI</i>	Modulation de la largeur d'impulsion.
<i>UPQC</i>	Unified Power Quality Conditioner.
<i>NPC</i>	Neutral Point Clamped.
<i>VAI</i>	Volt-Ampère Imaginaire.

Liste des figures

Figure I.1. *Creux et coupures de tension*..... 3

Figure I.2. *Fluctuation de l'amplitude de la tension*. 3

Figure I.3. *Déséquilibre du système triphasé de tension*..... 4

Figure I.4. *Variation de la fréquence*. 5

Figure I.5. *Harmoniques d'ordre 3, l'Onde fondamentale et déformée*..... 5

Figure I.6. *Distorsion harmonique*. 7

Figure I.7. *Charge non linéaire*..... 9

Figure I.8. *Charge linéaire*..... 9

Figure I.9. *Structure du filtre résonant*. 11

Figure I.10. *Filtre passif amorti : (A) 1er ordre, (B) filtre amorti de 2ème ordre, (C) filtre amorti de 3ème ordre*. 12

Figure I.11. *Montage d'un filtre actif parallèle*. 13

Figure I.12. *Montage d'un filtre actif série*. 13

Figure I.13. *Combinaison parallèle-série actif (UPQC)*.....14

Figure I.14. *Combinaison filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle*15

Figure II.1. *Filtre actif parallèle*19

Figure II.2. *Structure générale du filtre actif parallèle*.....20

Figure II.3. *Schéma électrique de l'onduleur triphasé à trois niveaux de type NP*. 23

Figure II.4. *Schéma électrique d'un bras d'onduleur trois niveaux*.....23

Figure II.5. *Interrupteur bidirectionnel équivalent à la paire transistor-diode*..... 24

Figure II.6. *Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type NPC*.....24

Figure II.7. *Schéma représentant le principe de séparation* 28

Figure II.8. *Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées* . 30

Figure II.9. *Commande par hystérésis*. 31

Figure II.10. *Boucle de régulation de la tension continue*. 32

Figure III.1. *Schéma global de l'association filtre actif-réseau-charge polluante*. 35

Figure III.2. *Courants de charge avant filtrage*. 38

Figure III.3. *Analyse spectrale de courants de charge pour une phase*. 38

Figure III.4. *Courants de références qu'on souhaite injecté dans le réseau* 39

Figure III.5. *Courant de référence et le courant réel* 39

Figure III.6. *Tension V_{dc} aux bornes du bus continu* 40

Figure III.7. *Courants de source après le filtrage*..... 40

Figure III.8. <i>Courant de la source après filtrage</i>	41
Figure III.9. <i>Courant de charge après filtrage avec une variation de la charge</i>	41
Figure III.10. <i>Courant de la source avec une variation de la charge</i>	42
Figure III.11 <i>Spectre de courant de la source</i>	42
Figure III.12 <i>Courant injecté dans le réseau</i>	42
Figure III.13 <i>Tension V_{dc} du bus continu</i>	43

Liste des tableaux

Tableau I.1 *Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).....10*

Tableau I.2 *Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).....10*

Tableau II.1. *Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un bras k.....24*

Tableau III.1. *Paramètre de simulation.....37*

Liste des symboles	
Nomenclatures	
Liste des figures	
Introduction général	

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES PERTURBATIONS ET LES STRATEGIES DE DEPOLLUTIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES

Introduction	2
1.1 Qualité de l'énergie électrique	2
1.2 Perturbations électriques	2
1.2.1 Creux et coupures de tension	3
1.2.2 Fluctuations de tension	3
1.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension	4
1.2.4 Variation de fréquence	4
1.2.5 Harmonique et inter harmonique	5
1.3 Perturbations harmoniques	6
1.4 Sources d'harmonique	6
1.4.1 Conséquence néfastes des harmoniques	6
1.4.2 Caractérisation des perturbations harmoniques	6
1.4.3 Rang de l'harmonique	7
1.4.4 Distorsions harmoniques	7
1.4.5 Facteur de puissance F_p	8
1.5 Types de charges	8
1.5.1 Charge linéaire	9
1.5.2 Charge non linéaire	9
1.6 Réglementation de perturbation	9
1.6.1 Norme	9
1.7 Solutions de dépollution des réseaux électriques	11
1.7.1 Filtrage passif	11
1.7.2 Filtrage actif	12
1.7.3 Filtre actif série (FAS)	13
1.7.4 Filtre actif Série-parallèle	14
1.7.5 Filtrage hybride	14

CHAPITRE II: Modélisation et commande du filtre actif à trois niveaux

Introduction	19
2.1 Principe du filtrage actif parallèle.....	18
2.2 Structure générale d'un filtre actif parallèle.....	19
2.3 Etude de la partie puissance.....	20
2.3.1 Système de stockage capacitif.....	20
2.3.2 Filtre de sortie.....	20
2.3.3 Onduleur triphasé à trois niveaux.....	23
2.4 Partie commande	27
2.4.1 Identification des courants harmoniques de référence	27
2.4.2 Théorie des puissances instantanées.....	28
2.4.3 Séparation des puissances perturbatrices	29
2.4.4 Algorithme d'identification des courants harmoniques	31
2.4.5 La commande de l'onduleur du filtre actif.....	31
2.4.6 Régulation de la tension du bus continu de l'onduleur	33

CHAPITRE III:Simulation et interprétation des résultats

Introduction	37
3.1 Schéma global de l'association filtre actif-réseau-charge polluante :	37
3.2 Paramètre de simulation	38
3.3 Résultat de simulation	39
3.3.1 Avant le filtrage.....	39
3.3.2 Après filtrage	40
3.3.3 Simulation après filtrage avec une variation de la charge	42

INTRODUCTION GENERALE

Dans les années récentes, l'utilisation des circuits électroniques ayant un comportement non-linéaire augmente de plus en plus dans le milieu industriel. Ils engendrent, dans les réseaux de distribution, des courants non-sinusoïdaux provoquant une pollution harmonique notable. Ces courants harmoniques ont des effets négatifs sur le fonctionnement des équipements électriques qui peut aller jusqu'à leur destruction.

Mais à présent, les développements récents dans la technologie de l'électronique de puissance apportent une capacité sans précédent de compensation et de correction des distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires en utilisant un compensateur actif parallèle, tel que le filtre actif parallèle à trois niveaux qui est nettement plus adapté dans les applications de forte puissance vu que le taux d'harmonique est significativement inférieur comparé à la structure classique en ce qui concerne les tensions et les courants de sortie.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne particulièrement l'étude par simulation d'un filtre actif parallèle destiné à compenser les courants harmoniques générés par une charge non linéaire. Ce mémoire est organisé en trois chapitres.

Nous abordons en premier lieu les différentes perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique, ainsi que les normes visant à diminuer leurs proliférations, nous rappelons aussi les solutions de dépollution.

Dans le second chapitre, nous étudierons le filtre actif parallèle à trois niveaux (NPC) d'une façon détaillée, on a commencé par une présentation de la structure générale composée d'une partie puissance et une partie commande, dans la partie puissance nous présenterons les différents éléments constituant le filtre actif parallèle, tandis que dans la partie commande nous présentons la méthode d'identification des courants harmoniques avec la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées (p-q) ainsi que la commande en courant par hystérésis et la régulation de la tension du bus continu.

Au dernier chapitre, nous présentons le schéma global du système simulé et les résultats de simulation de compensation des harmoniques par le filtre actif parallèle.

Enfin on termine par une conclusion générale résumant les principaux résultats auxquels nous avons abouti.

CHAPITRE I

Introduction

L'objectif fondamental des réseaux électriques est de fournir aux clients de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous forme de tension sinusoïdale, avec des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies. Par contre l'utilisation intensive des convertisseurs statiques a conduit à l'augmentation de la pollution harmonique dans les réseaux électriques et une forte consommation de la puissance réactive. Cette dégradation peut être créée aussi par de dysfonctionnements de matériels sur le réseau ou des incidents climatiques (foudre) [1].

Dans ce chapitre, nous étudierons les différents perturbations qui affectent la qualité de l'onde électrique. Ensuite, nous détaillerons les limites tolérées et imposées par les normes internationales de ces perturbations.

Finalement, nous présentons les solutions utilisées pour limiter cette pollution, en particulier le filtrage actif parallèle qui est le principal sujet de toute notre étude.

1.1 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Cependant le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». La qualité de cette énergie dépend directement de la qualité de la tension aux points de raccordement de la charge au réseau.

L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions laquelle est caractérisée, dans le cas idéal, par les paramètres suivants [2], [3] :

- Équilibre et symétrie parfaite des trois tensions en amplitude et en déphasages relatifs.
- Stabilité de la fréquence.
- Forme d'onde parfaitement sinusoïdale.

1.2 Perturbations électriques

Les perturbations sont tous les phénomènes internes ou externes au réseau ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et/ou en forme des grandeurs électrique du réseau (courant, tension, fréquence). [4]

1.2.1 Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution de son amplitude pendant un temps de 10 milli secondes jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus en général à des défauts dans les réseaux publics ou ceux des utilisateurs. Ils apparaissent aussi lors des manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (Démarrage des gros moteurs, transformateurs).

Une coupure brève est une disparition totale de la tension pendant une courte durée qui n'excède pas une minute. Ces coupures sont dues au fonctionnement du système de protection des réseaux aériens évitant ainsi des coupures longues. [5]

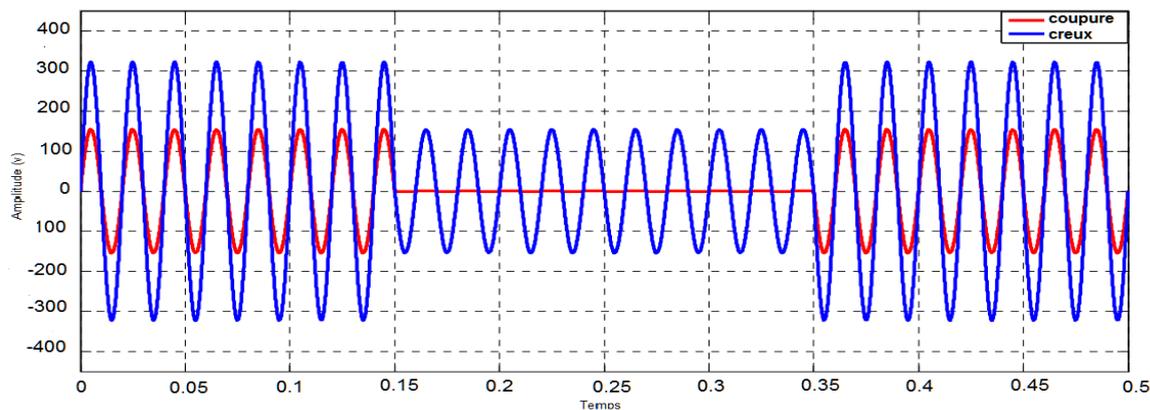


Figure II.1. Creux et coupure de tension.

1.2.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations cycliques ou aléatoires de la tension pour une durée de quelques centièmes de secondes. Elles sont dues aux variations importantes des courants d'appels circulant dans le réseau électrique, à cause des changements brusques de la puissance absorbée par certains appareils, comme les fours à arc et les machines à souder. L'impact majeur des fluctuations est le papillotement (flicker) de l'éclairage dû à une faible variation de l'intensité lumineuse, mettant à mal la vision des usagers. [6]

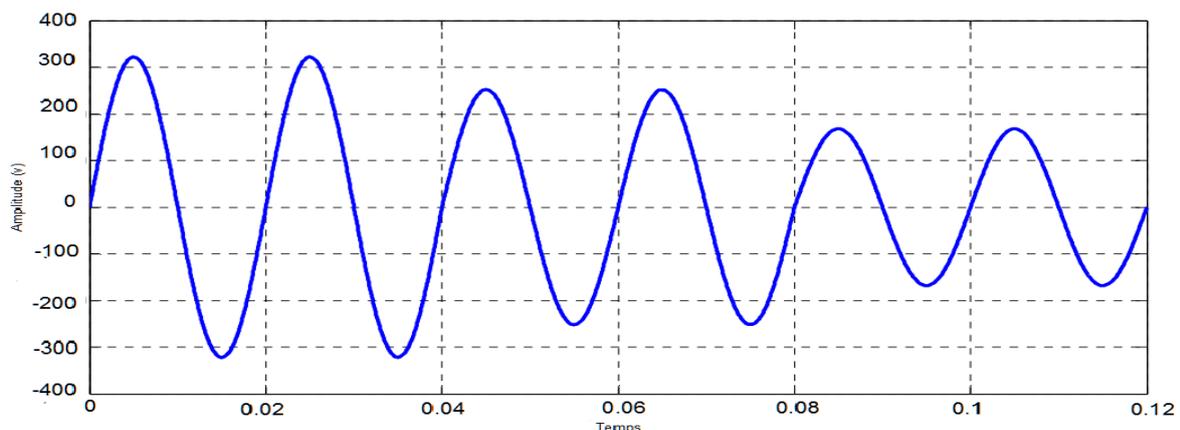


Figure I.2. Fluctuation de l'amplitude de la tension.

1.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Dans un système triphasé, on parle de déséquilibre lorsque l'égalité des modules des trois tensions ou de leur déphasage relatif n'est plus vérifiée.

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 dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Les principaux effets de ce type de perturbation sont [7] [8] :

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage).
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit.
- La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.

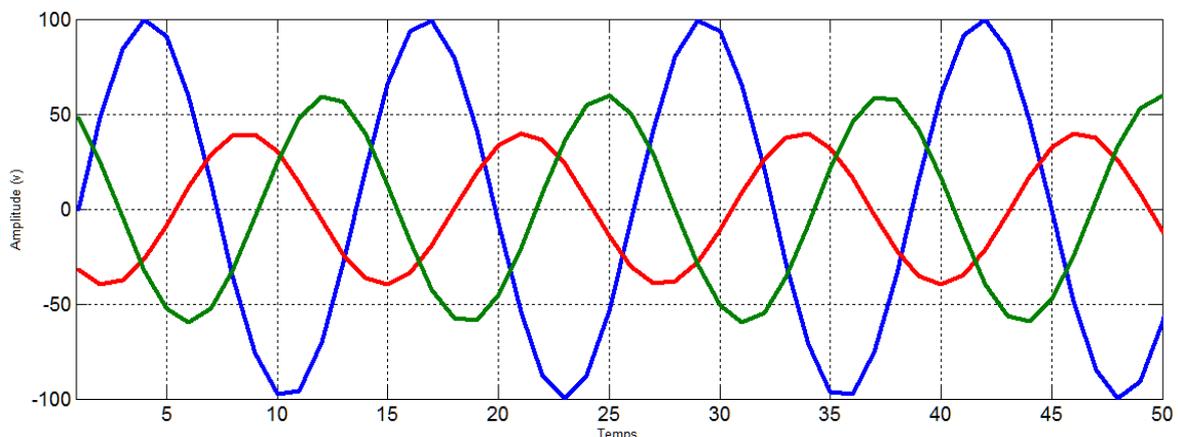


Figure I.3. Déséquilibre du système triphasé de tension.

1.2.4 Variation de fréquence

Dans les conditions normales, la fréquence du réseau de distribution doit être dans l'intervalle 50 ± 1 Hz. Elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, comme les défauts du réseau, au niveau de la production ou du transport, comme elles résultent des variations de vitesses des alternateurs dans les centrales de production, lors de démarrages ou de l'arrêt d'une charge importante. Elle peut apparaître aussi dans les réseaux électriques lors d'un déséquilibre entre la puissance demandée par la charge et celle fournie par le réseau électrique. Ces fluctuations de fréquence provoquent des variations de la vitesse des machines tournantes qui peuvent mener à des échauffements ou même à l'arrêt de ces dernières jusqu'à la destruction totale de ces équipements [4].

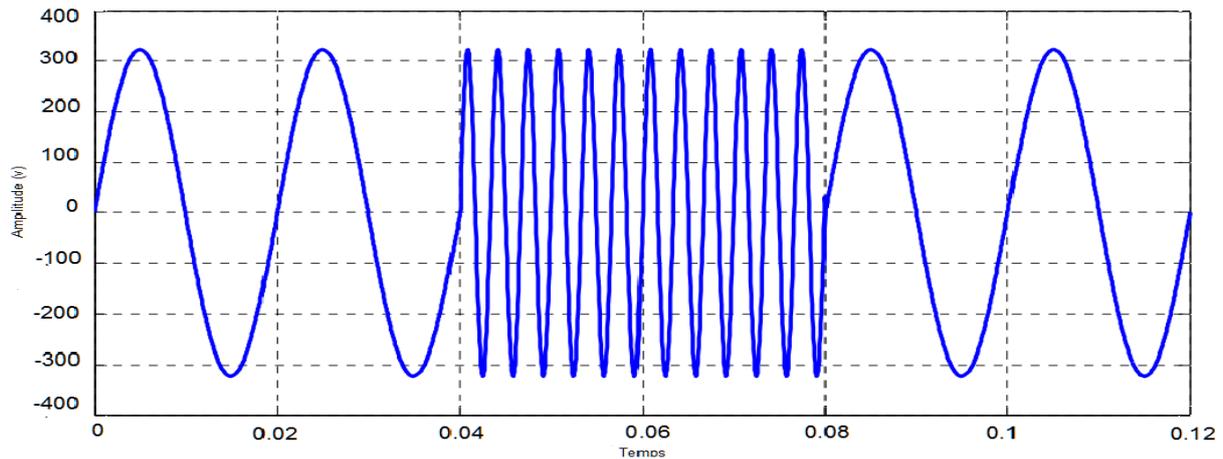


Figure I.4. Variation de la fréquence.

1.2.5 Harmonique et inter harmonique

Les harmoniques sont la superposition sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental. Les charges domestiques et industrielles non linéaires tels que les appareils d'éclairage fluorescent, les fours à arcs, les redresseurs..., représentent la plus grande majorité de sources d'harmoniques [9].

Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entières de la fréquence du réseau. [9]

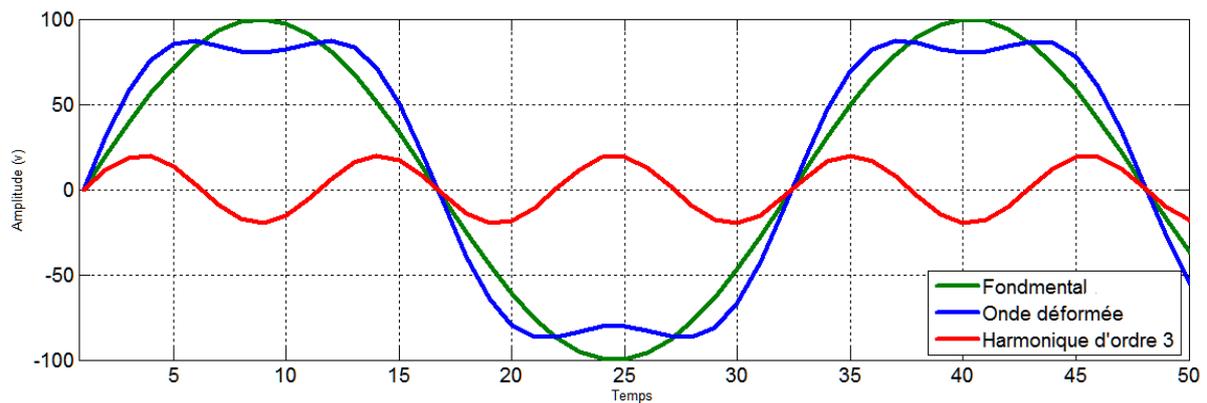


Figure I.5. Harmoniques d'ordre 3, l'Onde fondamentale et déformée.

Un signal déformé est due principalement à la superposition des harmoniques sur la composante fondamentale. Les signaux illustrés sur la figure (I.5), montrent l'effet de harmonique d'ordre 3 sur le fondamental.

1.3 Perturbations harmoniques

1.4 Sources d'harmonique

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (fours à arc transformateurs, , etc.) [2]. 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 [10] [11].

1.4.1 Conséquence néfastes des harmoniques

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déformant l'allure du Courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client. On distingue essentiellement ces effets [12] :

- La présence d'harmoniques entraîne des vibrations et des bruits dans les appareils électromagnétiques. Des couples mécaniques parasites dus aux champs tournants harmoniques donnant des vibrations dans les machines tournantes.
- Ils se manifestent par des échauffements supplémentaires (dans les transformateurs et les condensateurs, machines tournantes) ce qui entraîne la destruction du matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.
- Valeurs des courants efficaces plus élevées que celles nécessaires pour les besoins énergétiques de la charge.
- Disjonctions principales intempestives, dues aux surintensités.

1.4.2 Caractérisation des perturbations harmoniques

Le récepteur d'énergie se comporte comme une charge polluante, s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive. La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique défini pour la tension ou le courant par rapport à une onde sinusoïdale. Le facteur de puissance est utilisé généralement pour définir la consommation de l'énergie réactive [1].

1.4.3 Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle de la fondamentale (généralement la fréquence industrielle, (50 ou 60 Hz) :

$$n = f_n / f_1 \quad (I.1)$$

Le fondamental f_1 a le rang un.

1.4.4 Distorsions harmoniques

On appelle distorsion harmonique toute déviation en régime permanent, de la forme sinusoïdale idéale de l'onde tension ou de courant [4].

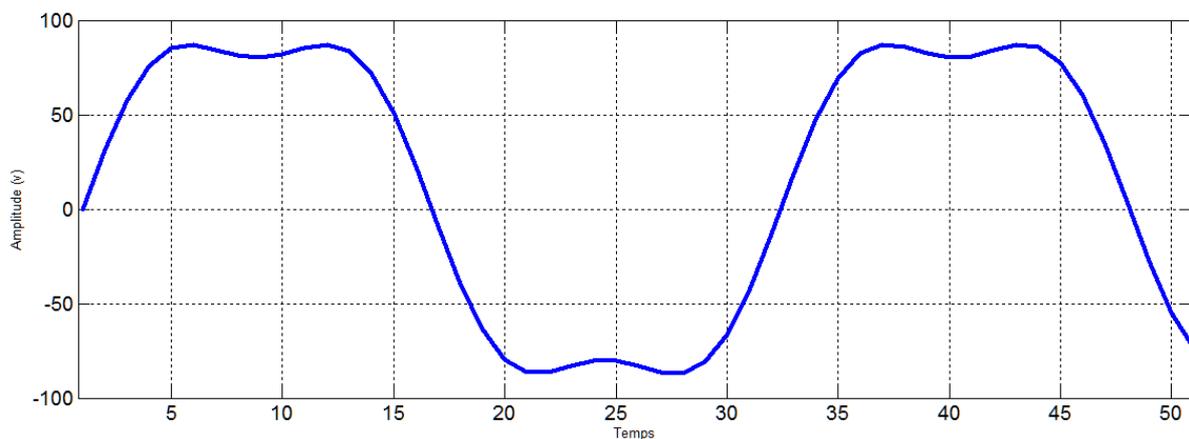


Figure I.6. Distorsion harmonique.

La perturbation harmonique est caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) (*Total Harmonique Distorsion*) défini en tension ou en courant [13].

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} (X_h)^2}}{X_1} \times 100\% \quad (I.2)$$

Avec :

- X_h : Les valeurs exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).
- X_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

1.4.5 Facteur de puissance Fp

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D) entre en considération. Elle est donnée par la relation [14] :

$$D = 3V\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

- V : la valeur efficace de la tension du réseau électrique.
- I_n : La valeur efficace du courant de la charge.
- n : Range harmonique et $n \neq 1$.

Le facteur de puissance est donc égal :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.4})$$

En posant

$$P = 3.V.I_1 \cos(\varphi) \quad (\text{I.5})$$

$$Q = 3.V.I_1 \sin(\varphi) \quad (\text{I.6})$$

On aura

$$FP = \frac{3.V.I_1 \cos(\varphi)}{3.V.I} = \frac{I_1}{I} \cos(\varphi) = F_{dis} \cos(\varphi) \quad (\text{I.7})$$

Avec :

- I_{s1} : La valeur efficace du fondamentale.
- F_{dis} : représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal.
- φ : représente le déphasage entre le courant et la tension.

1.5 Types de charges

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales [15] :

- les récepteurs linéaires (ou charges linéaires).
- les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

1.5.1 Charge linéaire

Une charge est dite linéaire si elle est alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

1.5.2 Charge non linéaire

Une charge est dite non-linéaire si l'on alimente une charge non linéaire par une tension sinusoïdale, le courant circulant dans cette charge n'est plus sinusoïdal. Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques.

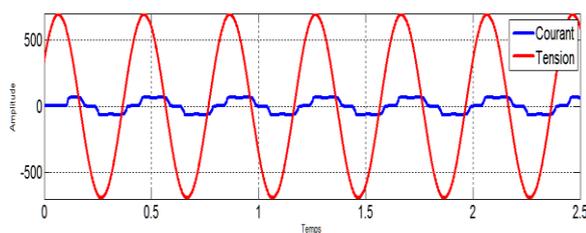


Figure I.7. Charge non linéaire.

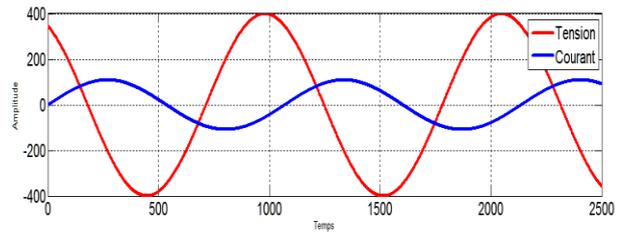


Figure I.8. Charge linéaire.

1.6 Réglementation de perturbation

1.6.1 Norme

Les normes ont pour but de limiter les distorsions harmoniques et de réduire leurs effets. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000). Ci-après, les deux normes CEI les plus importantes concernant les distorsions harmoniques [6] [4]:

La norme CEI 61000-2-2 : établit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Elle est représentée sur le tableau I.1. Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé et elle limite à 8% le THD jusqu'au 40ème rang.

La norme CEI 61000-3-2 : représentée sur le tableau I.2, elle fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A.

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Multiple de 3		Non Multiple de 3		Range h	Taux Max Admissible(%)
Range h	Taux Max Admissible(%)	Range h	Taux Max Admissible(%)		
3	5	5	6	2	2
9	5	7	5	4	1
15	0.3	11	3.5	6	0.5
21	0.2	13	3	8	0.5
> 21	0.2	17	2	10	0.5
		19	1.5	12	0.2
		23	1.5	> 12	0.2
		25	1.5		
		25	$0.2+1.3 \times 25h$		

Tableau I.1 Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Range h	Courant max Admissible (A)	Range h	Courant max Admissible
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \times 8/h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 31$	$0.15 \times 15/h$		

Tableau I.2 Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).

1.7 Solutions de dépollution des réseaux électriques

1.7.1 Filtrage passif

Le filtrage passif se fait par la mise en parallèle avec l'impédance du réseau d'un circuit de très faible impédance devant l'impédance du réseau à la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer, le courant choisit le chemin le moins résistant et de ce fait l'harmonique pour lequel le filtre a été dimensionné, sera dévié à travers ce dernier [16].

On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des courants harmoniques :

- Le filtre résonant.
- Le filtre amorti.

1.7.1.1 Filtre résonant

Le filtre résonant est constitué d'un condensateur monté en série avec une inductance. Ces éléments sont placés en dérivation sur l'installation et accordés sur un rang d'harmonique à éliminer. L'impédance de cet ensemble est très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte ainsi comme un court-circuit pour l'harmonique considéré, à savoir les deux harmoniques les plus gênantes h_5 et h_7 [17].

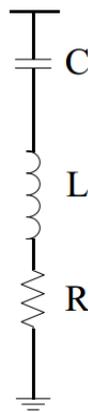


Figure I.9. Structure du filtre résonant.

1.7.1.2 Filtre amorti

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On utilise souvent un filtre passe haut pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre et non une fréquence particulière [17]. Donc est conçue pour éliminer une bande de fréquence à partir de l'harmonique h_{11} , qui correspond à la fréquence de 550 Hz. Les harmoniques h_{11} , h_{13} , h_{17} et h_{19} , pratiquement sont éliminés par ce type de filtre.

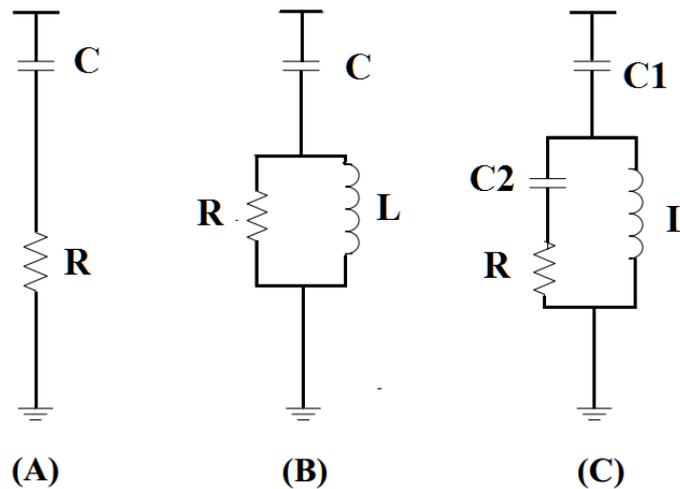


Figure I.10. *Filtre passif amorti : (A) 1er ordre, (B) filtre amorti de 2ème ordre, (C) filtre amorti de 3ème ordre.*

1.7.2 Filtrage actif

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques [8].

Le filtre actif est un convertisseur d'électronique de puissance, qui est en générale un onduleur commandé en courant ou en tension raccordé au réseau à travers des éléments passifs.

1.7.2.1 Principe de filtrage actif

Le principe de filtre actif est générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

Annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phase à l'aide d'un pont onduleur (Une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir) [8]

1.7.2.2 Filtre actif parallèle (FAP)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Figure (I.9), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de

phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actifparallèle (*FAP*) consiste à empêcher les courants perturbateurs produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau. [7]

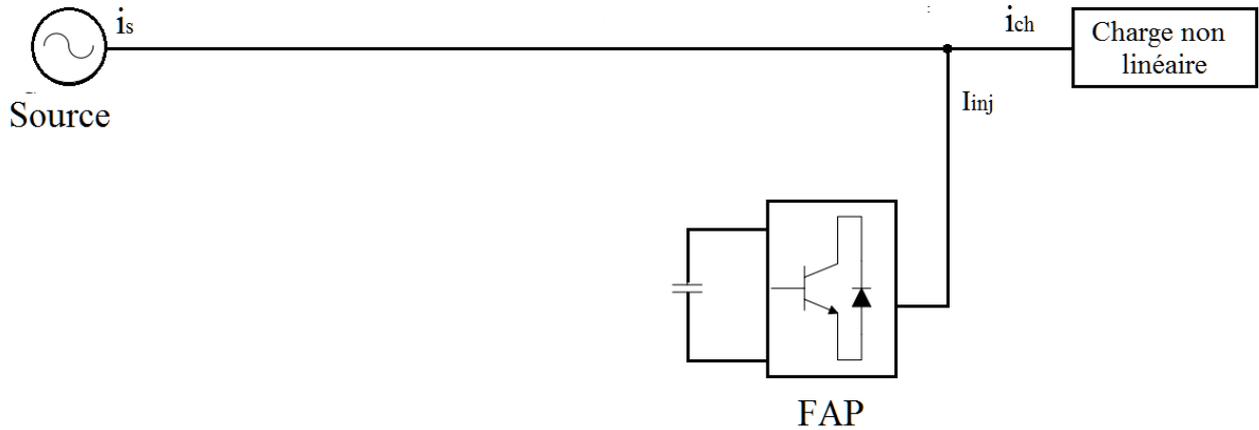


Figure I.11. Montage d'un filtre actif parallèle.

1.7.3 Filtre actif série (FAS)

Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge peut être rendue sinusoïdale. Cependant, le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [18].

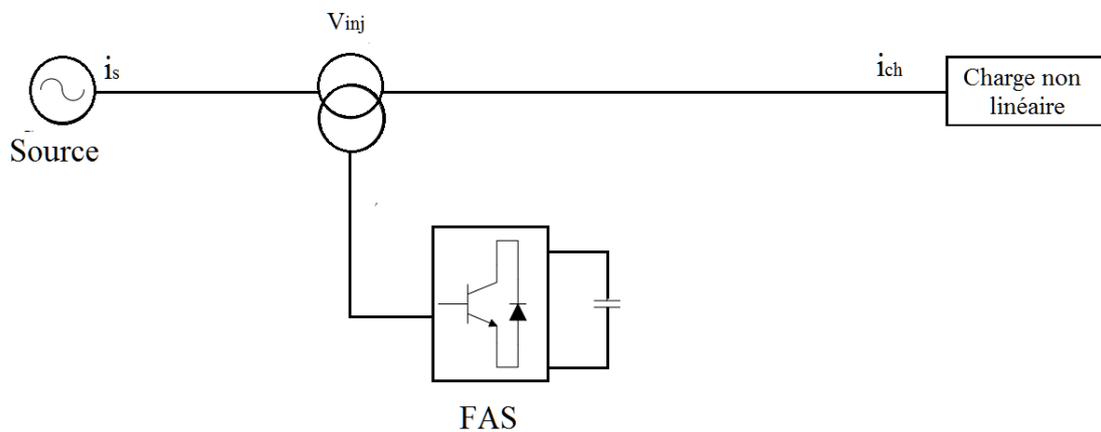


Figure I.12. Montage d'un filtre actif série.

1.7.4 Filtre actif Série-parallèle

La figure (I.13) illustre l'association de deux filtres actifs parallèle et série, également appelée «Unified Power Quality Conditioner » (UPQC). Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale. [6]

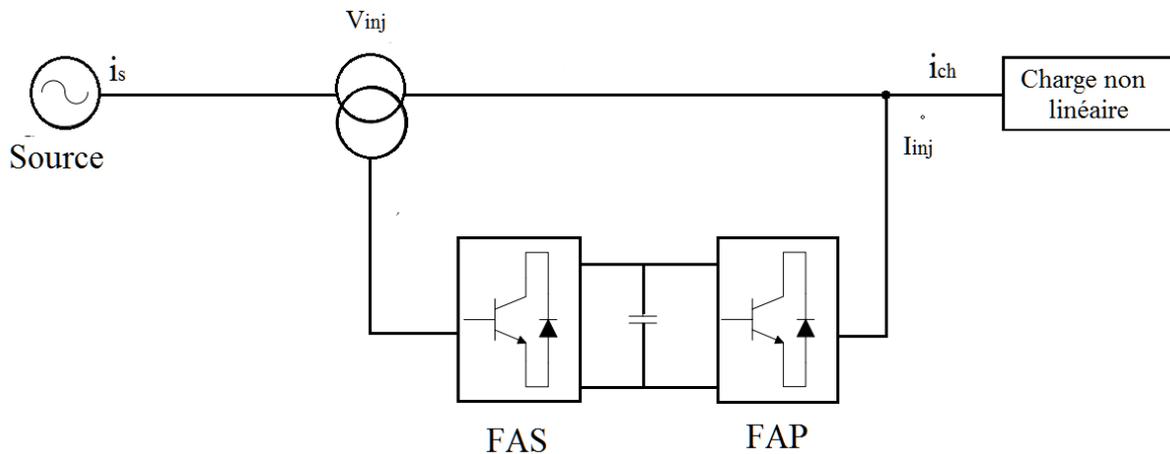


Figure I.13. Combinaison parallèle-série actif (UPQC).

1.7.5 Filtrage hybride

Afin de contourner les inconvénients des filtres passifs (résonances série ou parallèle avec la source et/ou la charge, détérioration des performances du filtre lors de variations de l'impédance du réseau,...) et de réduire le dimensionnement des filtres actifs, une nouvelle topologie de filtre commence à être de plus en plus utilisée, elle consiste en l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant [15]

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

Le filtre hybride a les performances des deux filtres, actif et passif. Un exemple filtre actif parallèle avec un filtre passif est le suivant :

1.7.5.1 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

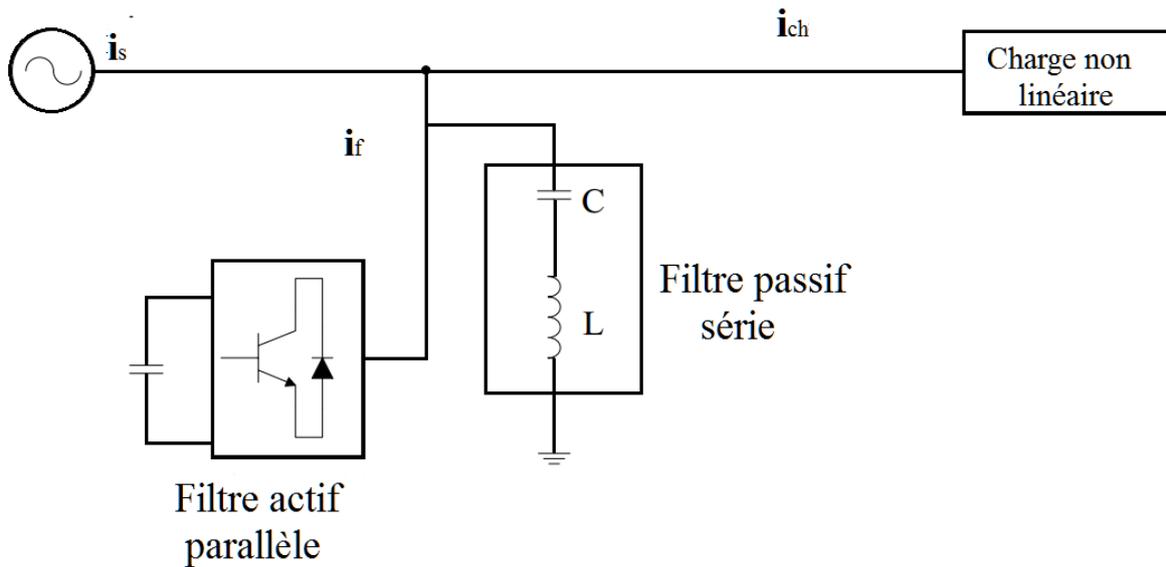


Figure I.14. *Combinaison filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.*

Une combinaison entre un filtre actif parallèle et un filtre passif série est montré sur la figure (I.14) le rôle du filtre actif parallèle est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge non linéaire, pour le filtre passif, il est accordé sur une fréquence élevée, pour éliminer les harmoniques hautes fréquences et celles créés par le FAP [8].

Conclusion

Les harmoniques sont beaucoup plus présentes au niveau des réseaux électriques et engendrent une dégradation de la qualité de l'énergie fournie. Afin de compenser ces harmoniques plusieurs méthodes ont été mises en œuvre telles que les filtres passifs et/ou actifs.

Dans ce chapitre, nous avons vu l'origine, les effets ainsi que les normes qui s'appliquent au phénomène des harmoniques sur les réseaux électriques. Cette pollution est principalement causée par la présence croissante des convertisseurs statiques qui sont vus par le réseau comme des charges non linéaires. Les dommages causés par la présence des harmoniques peuvent être plus ou moins importants.

Nous avons également présenté les moyens de filtrage d'harmoniques ; filtrage passif et actif. Ceci fera l'objet du prochain chapitre qui sera consacré à l'étude d'un filtre actif 3 niveaux.

CHAPITRE II

Introduction

Pour réduire les harmoniques au niveau de la source nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle à base d'un onduleur à trois niveaux, vu ses avantages, tel que l'adaptation aux variations de la charge et un taux de distorsion minimale présentée à sa sortie.

Le filtre actif parallèle est un onduleur de tension qui traite l'élimination des harmoniques. Il doit donc absorber des courants éliminant les harmoniques créés par le pont redresseur. Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant.

2.1 Principe du filtrage actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Figure (II.1) est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge non-linéaire, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs, produits par des charges non linéaires, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [19]

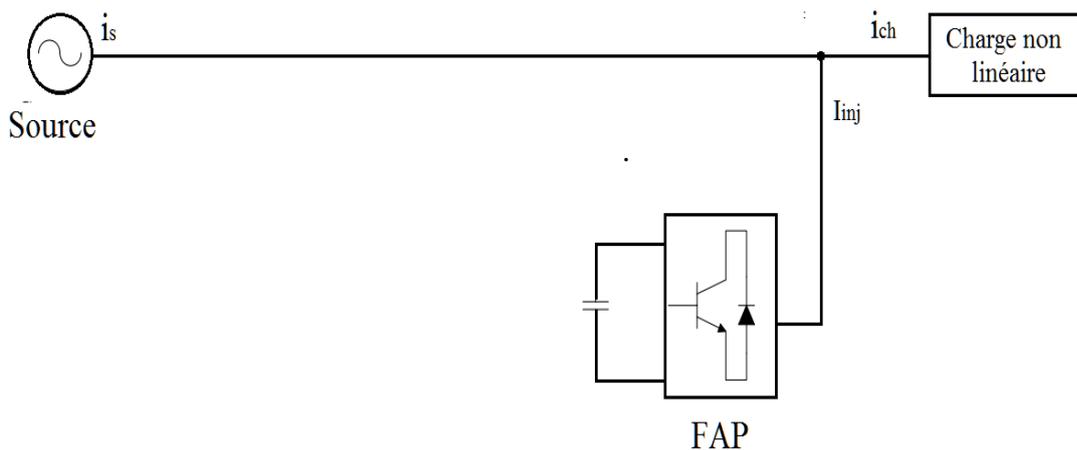


Figure II.1. Filtre actif parallèle

2.2 Structure générale d'un filtre actif parallèle

La figure (II.2) donne la structure globale du système à étudier, il se compose essentiellement de deux parties, à savoir, partie puissance et partie commande.

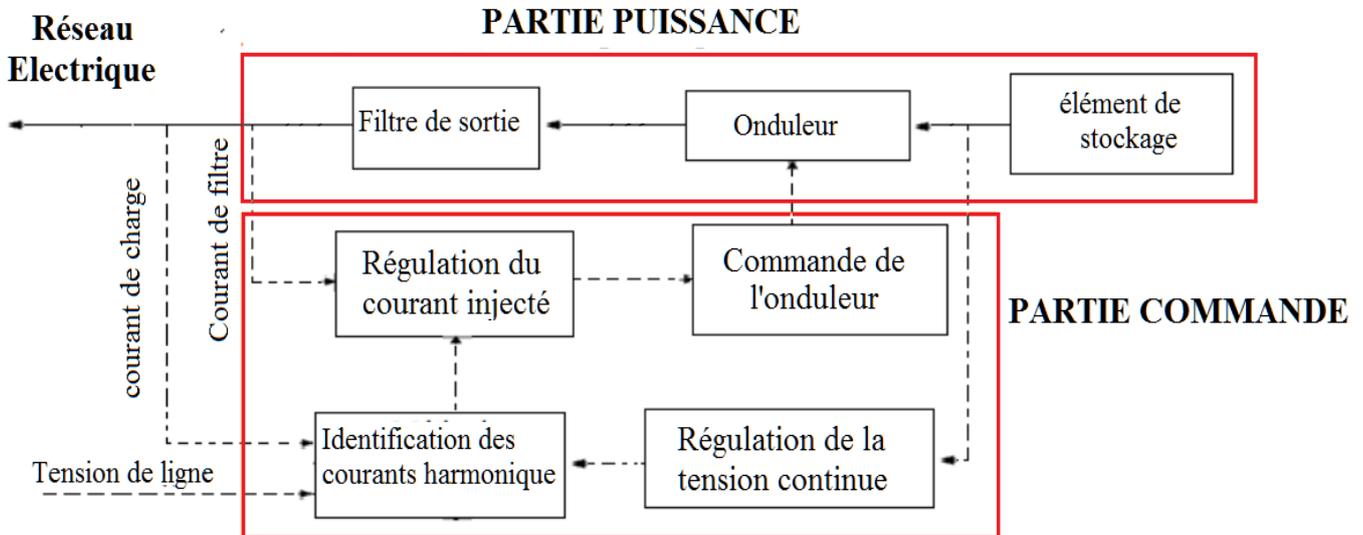


Figure II.2. Structure générale du filtre actif parallèle.

La partie puissance qui est constituée:

- D'un onduleur de tension trois niveau a structure NPC.
- D'un circuit de stockage d'énergie capacitif.
- D'un filtre de sortie.

La partie commande qui est constituée:

- D'un circuit d'identification des courants perturbés.
- D'un système de commande de l'onduleur de tension.
- 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.

Le raccordement de la charge polluante au réseau s'effectue par l'intermédiaire de l'impédance du réseau L_s et R_s . Le pont redresseur débite sur une charge h . Le couplage du filtre actif avec le réseau s'effectue par l'intermédiaire d'un filtre de raccordement [20].

2.3 Etude de la partie puissance

2.3.1 Système de stockage capacitif

Pour les petites et moyennes puissances, l'élément de stockage de l'énergie le plus adapté est une capacité placée du côté continu de l'onduleur. Il sert comme élément de stockage d'énergie pour compenser la différence de la puissance réelle entre la charge et la source lors des périodes transitoires [21].

Le choix des paramètres du système de stockage ($V_{dc}C_{dc}$) se répercute sur la dynamique et sur la capacité de compensation du filtre actif parallèle. Dans les applications de compensation d'harmonique, une tension V_{dc} plus élevée au borne du bus continu améliore la dynamique du filtre actif, d'autre part, une valeur élevée de V_{dc} réduit les ondulations mais augmente le coût et la taille du FAP. De plus, les ondulations de la tension continue, causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitée par le choix de C_{dc} . Ces ondulations sont d'autant plus élevées que les harmoniques à compenser sont de basse fréquence et d'amplitudes importantes ou la capacité est très faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage.

La méthode la plus simple et la plus utilisée pour le dimensionnement consiste à calculer la capacité C_{dc} à partir du courant harmonique I_h du rang le plus faible [8]. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon V_{dc} \omega_h} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

ω_h , est la pulsation de l'harmonique de rang h.

I_h : Courant harmonique de rang h.

V_{dc} : Tension du bus continue.

C_{dc} : Condensateur de stockage.

ε : Le taux d'ondulation admissible.

2.3.2 Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Il est dimensionné pour satisfaire les critères suivants [8] [22]:

- Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} \vec{I}_h = \frac{d}{dt} \vec{I}_{inj} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

\vec{I}_h : Le courant harmonique de la charge, \vec{I}_{inj} : Le courant du filtre actif.

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.
- Minimiser la variation brusque de courant (lissage).

2.3.2.1 Filtre du premier ordre

Ce type de filtre est le plus utilisé. Il est composé d'une inductance L_f et d'une résistance R_f , une valeur relativement faible de l'inductance peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif. Malheureusement, une valeur faible de L_f permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver coté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_f va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation [8].

2.3.2.2 Filtre du troisième ordre

Ce filtre de sortie souvent appelé filtre en T, se compose de deux inductances (L_{f1}, L_{f2}), de deux résistances (R_{f1}, R_{f2}) et d'une capacité C_f [8].

Un filtre LCL est une combinaison de deux filtres (LC-L). La présence du filtre LC à la sortie de l'onduleur de tension, qui se comporte comme un générateur de tensions harmoniques, permet l'élimination des composantes hautes fréquences due aux découpages.

L'association d'un filtre L et LC transforme la source de tension en une source de courant et améliore la qualité des grandeurs de sorties [23].

2.3.3 Onduleur triphasé à trois niveaux

2.3.3.1 Présentation

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimenté chacun par une source de tension continue distincte.

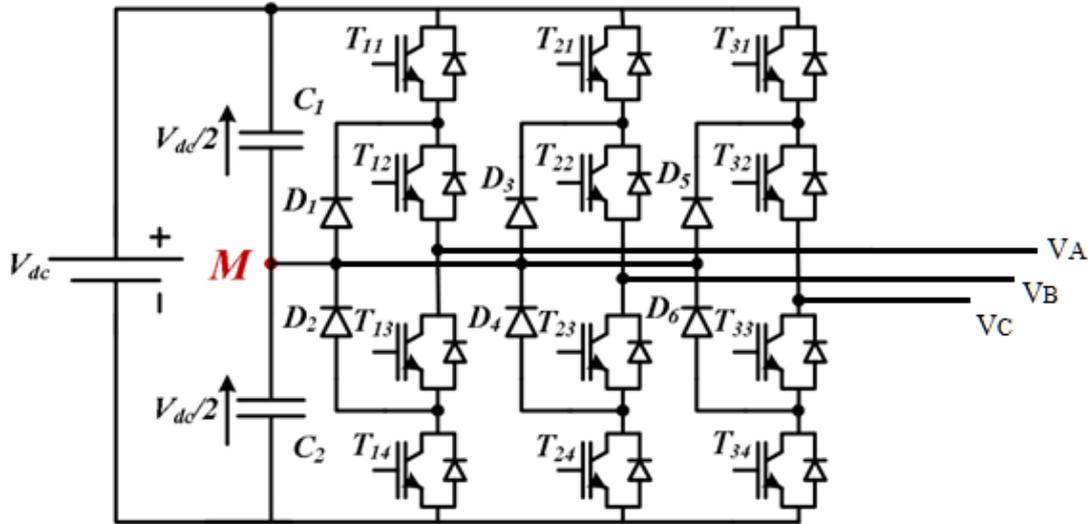


Figure II.3. Schéma électrique de l'onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC.

La Figure (II.3) représente la structure topologique d'un onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC (Neutral Point Clamped). Elle est composée de trois bras monophasés, chaque bras est composé de deux étages d'interrupteurs et chaque étage comporte deux transistors IGBT en série avec un point en commun relié par une diode au point neutre M, des diodes antiparallèles sur les transistors assurent la réversibilité des courants de la charge. A partir de la source principale de tension continue, et à l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C_1 et C_2 de même capacité ($C_1 = C_2$ c'est-à-dire ($UC_1 = UC_2$), on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi tension ($E/2$). Cette structure crée alors un point neutre (M) entre les deux condensateurs[24].

2.3.3.2 Modélisation de l'onduleur de tension à trois niveaux à structure NPC

Pour décrire le principe de fonctionnement de l'onduleur, on étudie le comportement d'un seul bras Figure (II.4). Les trois niveaux de tension possible en sortie ($\frac{V_{dc}}{2}$, 0 , $-\frac{V_{dc}}{2}$) sont obtenus en fonction du choix des interrupteurs rendus passants. La symétrie de la structure de l'onduleur triphasé trois niveaux NPC permet sa modélisation par bras.

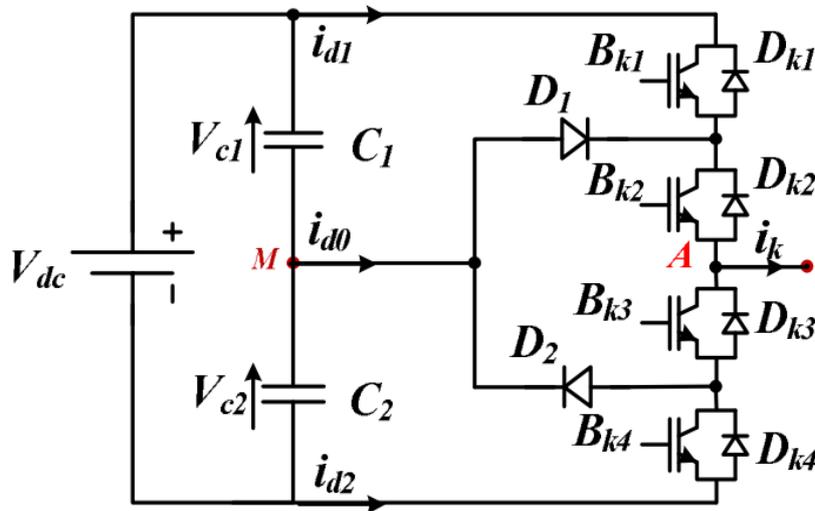


Figure II.4. Schéma électrique d'un bras d'onduleur trois niveaux.

Pour simplifier la représentation de l'onduleur, nous représentons chaque paire transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel T_k supposé parfait.

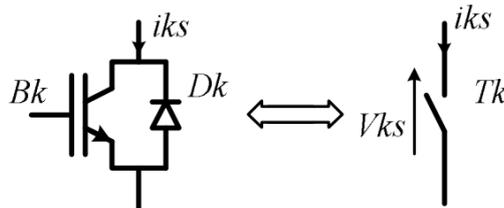


Figure II.5. Interrupteur bidirectionnel équivalent à la paire transistor-diode.

Fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux NPC

La figure (II.6) illustre les configurations possibles du convertisseur en fonction du signe du courant et de la tension de sortie. T_{11} Et T_{13} (respectivement T_{12} et T_{14}) sont commandés de manière complémentaire.

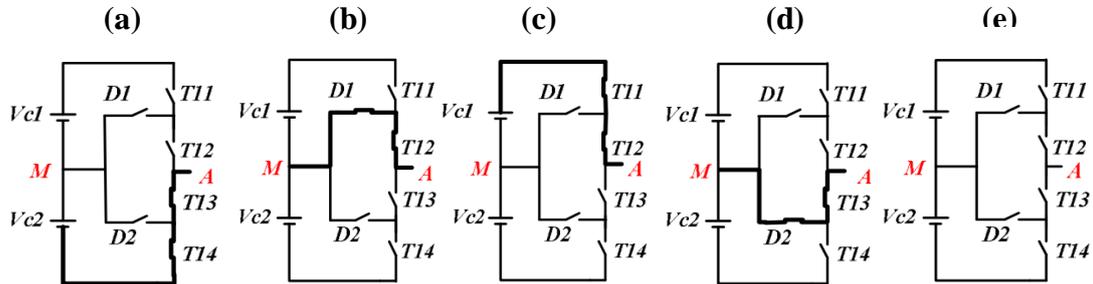


Figure II.6. Configuration possible d'un bras d'onduleur à trois niveaux de type NPC.

Les cinq états de commutations possibles d'un bras sont résumés au Tableau (II.1), L'état 1 représente l'interrupteur fermé et l'état 0 représente l'interrupteur ouvert.

/	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{14}	V_{AM}
(a)	0	0	1	1	$-\frac{V_{dc}}{2}$
(b)	0	1	0	0	0
(c)	1	1	0	0	$\frac{V_{dc}}{2}$
(d)	0	0	1	0	0
(e)	0	0	0	0	0

Tableau Iii.1 Grandeurs électriques correspondantes pour chacune des configurations d'un bras k.

Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras qui peut engendrer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit ou par une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit une commande complémentaire des différents semi-conducteurs d'un bras de l'onduleur à trois niveaux [25]. La commande complémentaire pour un bras k est définie alors comme suit :

$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K3}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \end{cases} \quad (II.3)$$

Fonction de connexion

Les fonctions de connexion des interrupteurs du bras k sont liées par les relations suivantes :

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K4} \\ F_{K2} = 1 - F_{K3} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Avec cette commande complémentaire, tout ce passe comme si pour chaque bras de l'onduleur on a seulement deux cellules de commutations à deux interrupteurs chacune. Ces deux cellules sont constituées respectivement des paires d'interrupteurs ($Tk1, Tk2$) et ($Tk3, Tk4$).

On définit la fonction de connexion du demi-bras au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} \cdot F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K3} \cdot F_{K4} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Avec : F_{k1}^b est associée au demi-bras du haut et F_{k0}^b est associée au demi-bras du bas. Les fonctions de connexion des trois demi-bras sont :

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11} \cdot F_{12} \\ F_{10}^b = F_{13} \cdot F_{14} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{21}^b = F_{21} \cdot F_{22} \\ F_{20}^b = F_{23} \cdot F_{24} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{31}^b = F_{31} \cdot F_{32} \\ F_{30}^b = F_{33} \cdot F_{34} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Les Fonctions de conversion

A l'aide des fonctions de connexion des interrupteurs, on peut écrire le système d'équation des tensions de l'onduleur à trois niveaux, par rapport au point M de la source de tension d'entrée comme suit :

$$\begin{cases} V_{AM} = F_{11}^b V_{c1} - F_{10}^b V_{c2} = (F_{11}^b - F_{10}^b)V_c \\ V_{BM} = F_{21}^b V_{c1} - F_{20}^b V_{c2} = (F_{21}^b - F_{20}^b)V_c \\ V_{CM} = F_{31}^b V_{c1} - F_{30}^b V_{c2} = (F_{31}^b - F_{30}^b)V_c \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Les tensions composées s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AM} - V_{BM} = (F_{11}F_{12} - F_{21}F_{22})V_{c1} - (F_{13} \cdot F_{14} - F_{23}F_{24})V_{c2} \\ U_{BC} = V_{BM} - V_{CM} = (F_{21}F_{22} - F_{31}F_{32})V_{c1} - (F_{23} \cdot F_{24} - F_{33}F_{34})V_{c2} \\ U_{CA} = V_{CM} - V_{AM} = (F_{31}F_{32} - F_{11}F_{12})V_{c1} - (F_{33} \cdot F_{34} - F_{13}F_{14})V_{c2} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

En introduisant les fonctions de connexions des demi-bras, on aura :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} V_c \quad (\text{II.9})$$

Avec : $V_{c1} = V_{c2} = V_c$

Les tensions simples sont liées aux tensions composées par les relations :

$$\begin{cases} V_{An} = V_A = (U_{AB} - U_{CA})/3 \\ V_{Bn} = V_B = (U_{BC} - U_{CB})/3 \\ V_{Cn} = V_C = (U_{CA} - U_{BC})/3 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Et donc, en fonctions de connexions sous la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{An} \\ V_{Bn} \\ V_{Cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} V_c \quad (\text{II.11})$$

Avec : $V_{c1} = V_{c2} = V_c$

2.4 Partie commande

2.4.1 Identification des courants harmoniques de référence

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

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques [26]

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total [27]. Il existe trois possibilités d'identification des courants perturbateurs :

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

La première méthode est la plus utilisée pour le filtre actif parallèle pour compenser les courants perturbateurs causés par les charges polluantes [28]. Cette méthode de détection sera employée dans cette étude.

2.4.2 Théorie des puissances instantanées

Cette théorie introduite par Hakagui en 1983 exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelles et imaginaires instantanées. La composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes oscillatoires. Cette transformation est nécessaire si nous voulons éliminer l'une des composantes de sorte qu'elle soit facile à mettre en œuvre. Généralement, pour la méthode classique on utilise un filtre passé haut ou un filtre passe bas pour garder la composante harmonique du signal [29].

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé, V_a, V_b, V_c et I_a, I_b, I_c . À l'aide de la transformation de Concordia le système triphasé équilibré peut être ramené à un système diphasé dont les axes sont en quadrature comme montré dans la relation suivante [30] :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension. La puissance active instantanée, notée $P(t)$, est définie par la relation suivante :

$$\begin{cases} P(t) = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c = p(t) + p_0(t) \\ P(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ P_0(t) = V_0 I_0 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Avec : $p(t)$ la puissance réelle instantanée, $p_0(t)$ puissance homopolaire instantanée.

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

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_a - V_b)I_c + (V_b - V_c)I_a + (V_c - V_a)I_b] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (\text{II.15})$$

A partir des relations (II.14) et (II.15), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

On peut exprimer les puissances actives et réactives instantanées comme la somme d'une composante continue et oscillatoire

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

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

2.4.3 Séparation des puissances perturbatrices

Les puissances définies précédemment contiennent un terme constant relatif au fondamentale ainsi qu'un terme alternatif correspondant aux harmoniques, afin de ne garder que la partie relative aux harmoniques, la composante continue de la puissance doit être filtré. Cette séparation peut être réalisée en utilisant un filtre passe-bas, dont principe est détaillé sur la figure suivante :

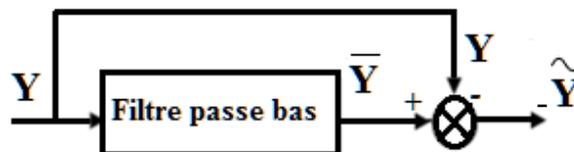


Figure II.7. Schéma représentant le principe de séparation.

La fréquence de coupure du filtre passe bas est choisie de manière à ce qu'il puisse bloquer le passage des composantes harmoniques des puissances instantanées, et de permettre uniquement le passage des composantes continues [8].

En inversant la relation (II.16), nous pouvons recalculer les courants dans le repère (α - β) comme le montre l'équation (II.18) .

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

En considérant les équations (II.17) et (II.18), nous pouvons séparer le courant dans le repère ($\alpha - \beta$) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à : [17]

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courants harmoniques}} \quad (\text{II.19})$$

D'où les courants de référence $i_{h\alpha}$, $i_{h\beta}$ sont donnés par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} + p_{loss} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Avec

- $\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2$: supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.
- P_{loss} : Puissance supplémentaire que le filtre actif doit absorber pour compenser ses propres pertes.

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère ($\alpha - \beta$) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire. Les courants harmoniques triphasés qui représentent les courants identifiés (courants de référence I_{ref}) sont calculés à partir de la transformée inverse de CONCORDIA, donné par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{refa} \\ I_{refb} \\ I_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/\sqrt{2} & \sqrt{3}/2 \\ -1/\sqrt{2} & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{h\alpha} \\ I_{h\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Avec

- $I_{h\alpha}$ et $I_{h\beta}$ Courants harmoniques calculés dans le repère ($\alpha - \beta$).

On trouve la relation globale des courants harmoniques

$$\begin{bmatrix} I_{refa} \\ I_{refb} \\ I_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{V^2_{\alpha} + V^2_{\beta}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/\sqrt{2} & \sqrt{3}/2 \\ -1/\sqrt{2} & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} + p_{loss} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

2.4.4 Algorithme d'identification des courants harmoniques

Le schéma de la Figure(II.8) illustre les différentes étapes permettant l'obtention des courants de référence par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

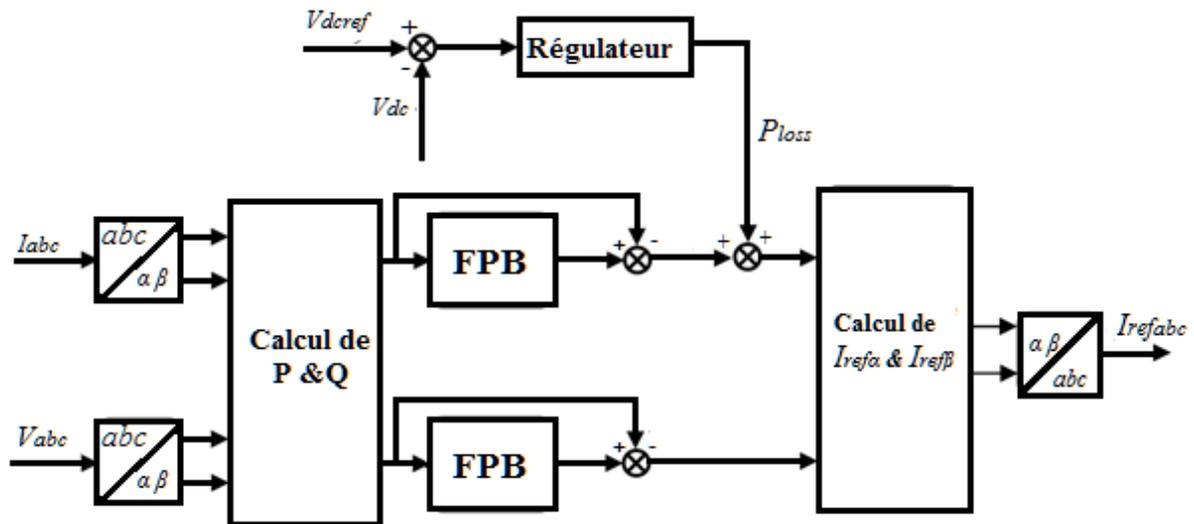


Figure II.8. Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.

2.4.5 La commande de l'onduleur du filtre actif

L'objectif de contrôle des courants du filtre actif, est de générer les ordres de commutation des interrupteurs, afin d'avoir les courants de sortie suivent le plus proche possible les consignes de référence. La comparaison des courants injectés par l'onduleur i_f avec les courants de référence $I_{ref(a,b,c)}$, dictés par la commande éloignée génère les signaux d'erreurs $\varepsilon_{(a,b,c)}$, qui sont les entrées du contrôleur de courant. Celui-ci générera les signaux de commande afin de réduire les erreurs [8].

Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

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

2.4.5.1 La commande par Hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de pour sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance du système à contrôler ou de ses paramètres.

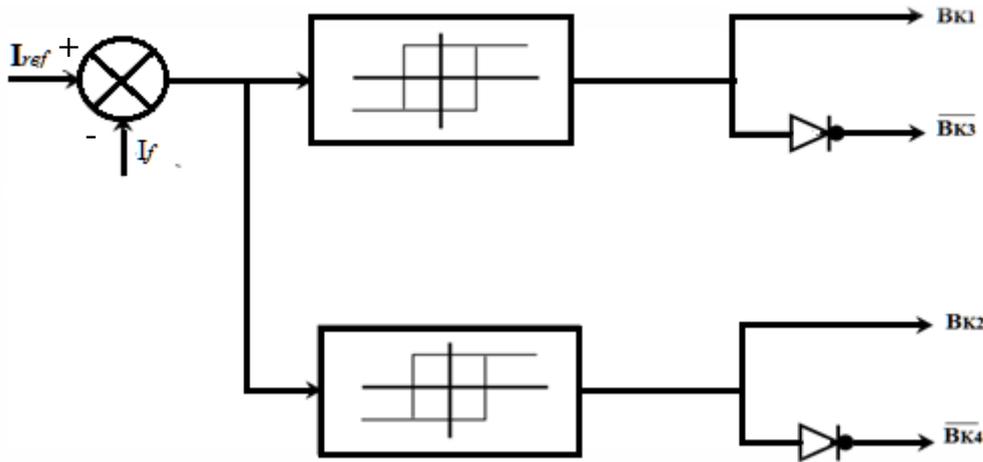


Figure II.9. Commande par hystérésis.

La commande par hystérésis, connue aussi sous le nom de commande en fourchette est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur figure (II.9), cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, dès qu'elle atteint la bande inférieure ou supérieure un produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur est envoyé afin de diminuer ou augmenter le courant en sortie de FAP, et maintenir l'erreur à l'intérieur de la bande entourant la référence) [8].

2.4.5.2 La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La technique de commande par MLI (commande par modulation de largeur d'impulsion) résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation des interrupteurs de puissance en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur [31].

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective. 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 [31].

2.4.6 Régulation de la tension du bus continu de l'onduleur

La tension moyenne aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. Les causes de sa variation sont essentiellement les pertes dans les interrupteurs (en conduction et en commutation), dans les inductances de découplage L_f et l'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires [32].

En régime permanent, la source doit fournir une puissance active égale à la puissance demandée par la charge. Lorsqu'un déséquilibre de puissance active se produit dans le système, la capacité de stockage d'énergie doit fournir la différence de puissance entre le réseau et la charge [33]. Il en découle alors une variation de la tension continue aux bornes du condensateur alimentant le filtre actif, d'où une régulation est nécessaire afin de maintenir la tension aux bornes du condensateur à une valeur fixe.

La correction de la tension continue aux bornes du condensateur doit se faire par l'injection des courants actifs dans les courants de référence. La puissance P_{dc} à la sortie du régulateur s'ajoute à la puissance active harmonique et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi la tension V_{dc} [8].

La boucle de régulation de tension continue du FAP à l'aide de régulateur PI est montrée dans la figure suivante :

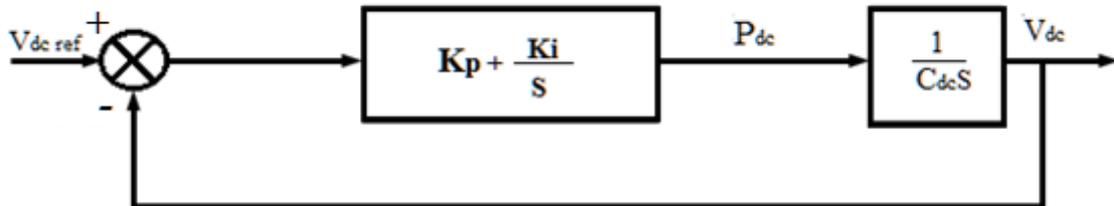


Figure II.10. Boucle de régulation de la tension continue.

A partir la figure. (12.2) la fonction de transfert en boucle fermée de la régulation est la suivante :

$$F_{BF}(s) = \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} s}{s^2 + 2\frac{K_p}{C} s + 2\frac{K_i}{C}} \tag{II.23}$$

La fonction de transfert obtenue est de deuxième ordre, La forme canonique du deuxième ordre est donnée comme suite:

$$FT(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\varepsilon\omega_c s + \omega_c^2} \quad (\text{II.24})$$

Par identification avec la forme canonique, les expressions des coefficients du régulateur PI sont comme suit :

$$K_i = \frac{1}{2} C \omega_c^2 \quad (\text{II.25})$$

$$K_p = \varepsilon \sqrt{2CK_i} \quad (\text{II.26})$$

Conclusion

Ce chapitre est dédié à l'étude du filtre actif parallèle triphasé, il est partagée en deux parties à savoir la partie puissance et la partie contrôle-commande.

Dans la première partie nous avons étudié la structure générale du FAP a trois niveaux (NPC). Tout d'abord, on a présenté les trois blocs principaux de la partie puissance, à savoir le bus continu, le filtre de sortie qui est un filtre passif de 1^{er} ordre utilisé afin de connecter le FAP au réseau et l'onduleur triphasé trois niveaux à structure NPC ainsi qu'une modélisation appropriée sera présentée pour le FAP utilisée durant tout notre travail.

Dans la seconde partie, nous avons exposé la méthode d'identification des courants harmoniques en utilisant la théorie des puissances instantanées, la régulation de la tension du bus continue ainsi que celle du courant du FAP.

Dans la suite de ce travail, nous allons mettre en œuvre par simulation le filtre actif 3 niveau pour le filtrage d'harmonique.

CHAPITRE III

Introduction

Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) à trois niveaux est une des solutions modernes et efficaces permettant d'éliminer les harmoniques de courant produit par la charge.

Durant ce chapitre nous allons exposer les résultats de simulation sous *Matlab/Simulink* en utilisant également la toolbox « *SimPower Systems* » avant et après filtrage afin d'assurer la compensation des courants harmoniques.

3.1 Schéma global de l'association filtre actif-réseau-charge polluante :

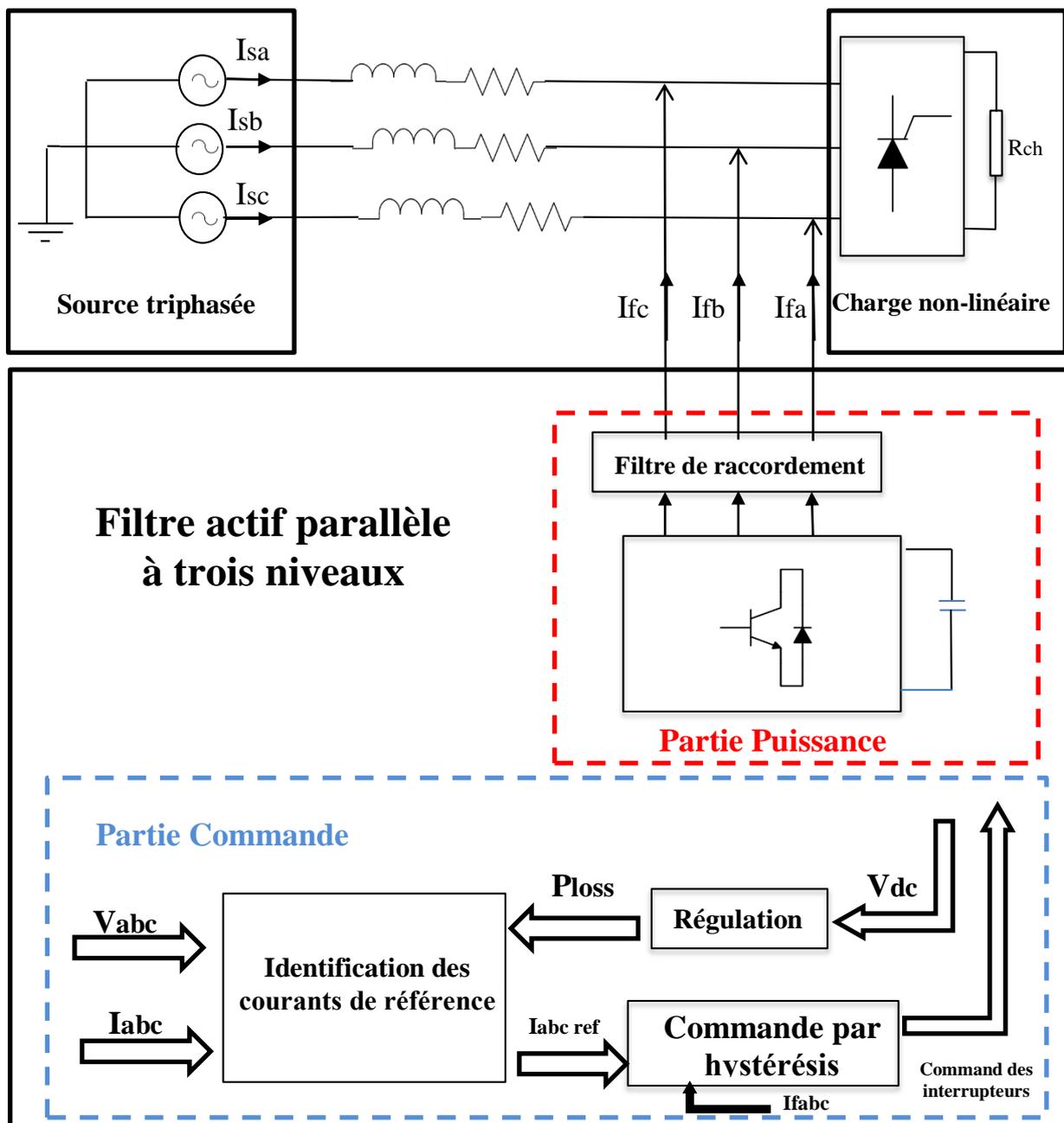


Figure III.1. Schéma global de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.

La figure (III.1) illustre le schéma global du système à étudier. Il est composé de trois parties principales suivantes :

- Source d'alimentation triphasée.
- Charge non linéaire.
- Un filtre actif parallèle à trois niveaux.

3.2 Paramètre de simulation

Réseau électrique	
Tension entre phase	$U_S = 400 \text{ V}$
Fréquence	$f = 50 \text{ Hz}$
Impédance du réseau	$R_S = 0.001 \text{ } \Omega$
	$L_S = 0.006 \text{ H}$
La charge non linéaire	
La charge résistive 1	$R_{ch1} = 10 \text{ } \Omega$
La charge résistive 2	$R_{ch2} = 20 \text{ } \Omega$
Angle d'amorçage des thyristors	$\alpha = 35^\circ,$
Filtre parallèle	
La tension de référence	$V_{dc^*} = 850 \text{ V}$
Capacité du bus continue	$C = 5 \times 10^{-3} \text{ F}$
Impédance du filtre de raccordement	$L_f = 0.004 \text{ H}$
	$r_f = 0.06 \text{ } \Omega$

Tableau III.1. Paramètre de simulation.

3.3 Résultat de simulation

3.3.1 Avant le filtrage

Lorsque nous connectons le filtre actif parallèle au réseau électrique, nous obtenons les résultats de simulation suivants :

3.3.1.1 Courant de la source

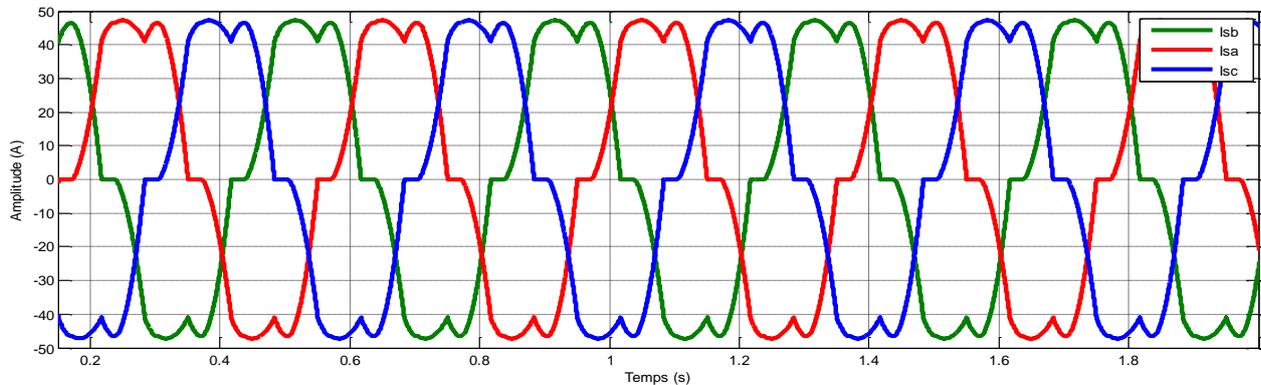


Figure III.2. Courants de charge avant filtrage.

La figure (2.3) donne la forme d'onde du courant de la source avant l'insertion du FAP (identique au courant de charge). D'après ces résultats on constate que le courant de source est loin d'être sinusoïdal et ceci est dû aux courants harmoniques générés par la charge non linéaire, la présence de ces harmoniques est confirmée par le spectre harmonique de la figure (III.2).

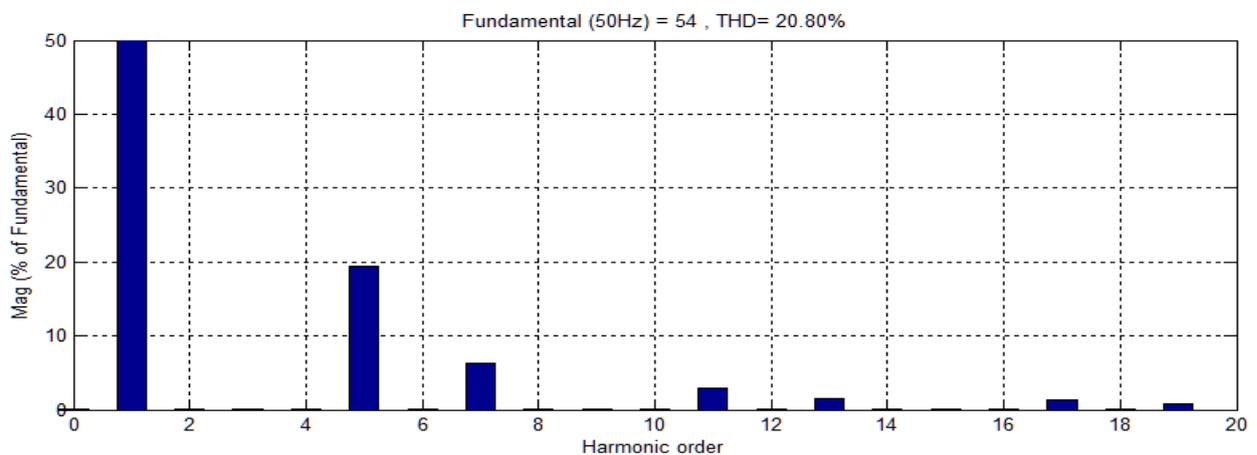


Figure III.3. Analyse spectrale de courants de charge pour une phase.

La figure (III.3) représente l'analyse spectrale de courant de la source, on remarque que ce courant est riche en harmoniques du range impaires d'ordre 5, 7, 11, 13..., avec un taux de distorsion du fondamentale de THD = 20.80 % pour les trois phases (charge équilibré), cette valeur est assez supérieure à la norme **CEI 61000-3-2** ceci nécessite un filtrage d'harmoniques.

3.3.2 Après filtrage

3.3.2.1 Courant de référence

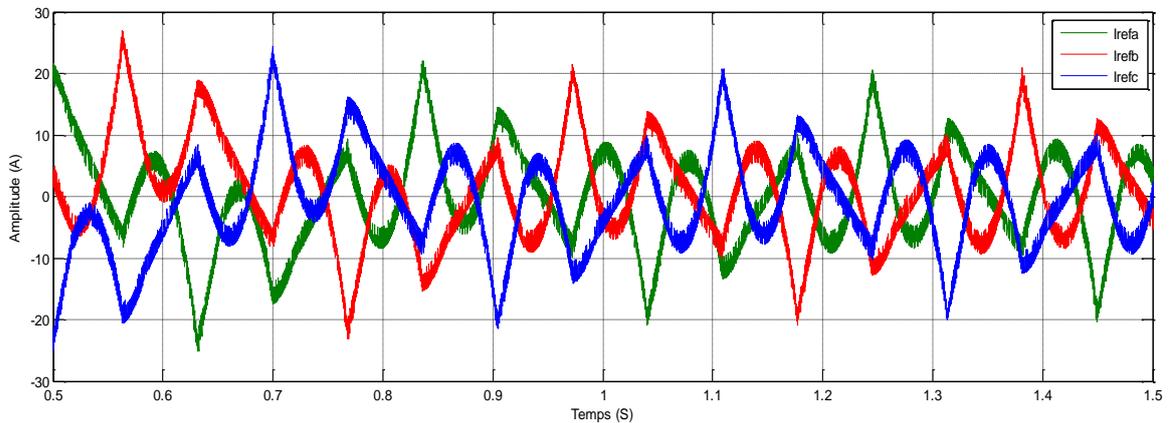


Figure III.4. Courants de références qu'on souhaite injecté dans le réseau.

3.3.2.2 Courant de référence et courant injecté par FAP

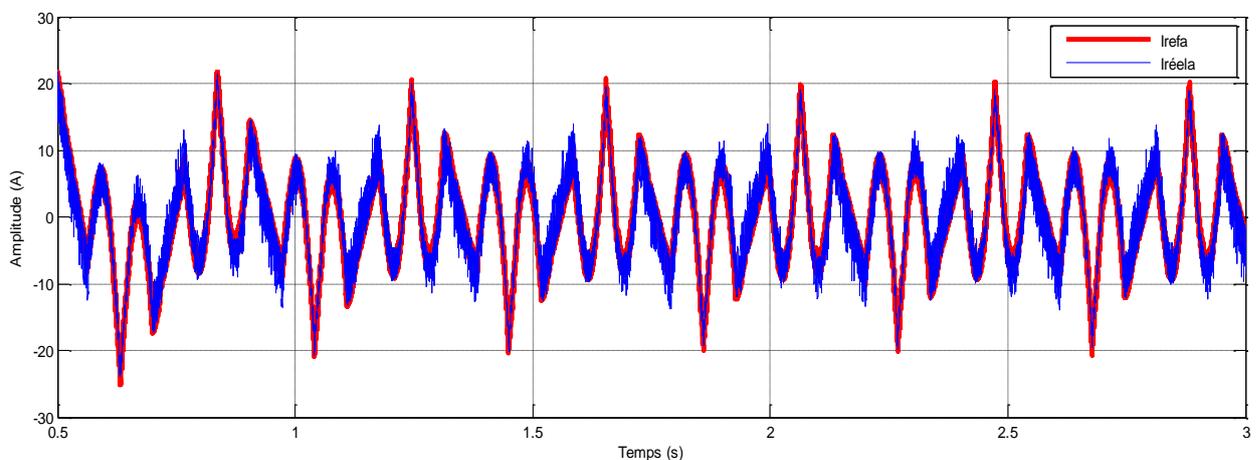


Figure III.5. Courant de référence et le courant réel.

La figure (III.5) illustre le courant de référence en rouge ainsi que le courant injecté par l’FAP en bleu. On remarque que le courant produit par l’FAP est presque identique au courant de référence avec une petite erreur toléré, ceci grâce à une commande spécifique qui s'appelle la commande par hystérésis.

3.3.2.3 Tension V_{dc} du bus continu

La figure ci-dessus, représente la tension V_{dc} du bus continu à l'entrée de l'onduleur. Initialement la tension V_{dc} est quasiment nulle puis elle passe à 850 V en suivant la tension de référence $V_{dc,ref}$. Ce passage est réalisé grâce à un régulateur PI (Proportionnel Intégral) connecté directement au bloc d'identification qui garde la stabilité de la tension du bus continu V_{dc} , il oblige V_{dc} de suivre correctement la tension de référence.

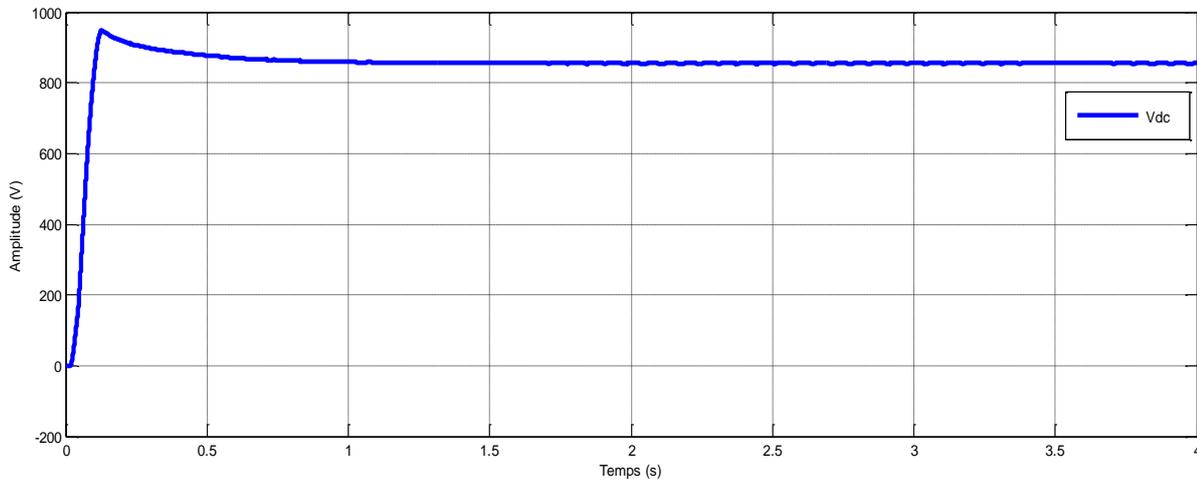


Figure III.6. Tension V_{dc} aux bornes du bus continu.

3.3.2.4 Courant de la source

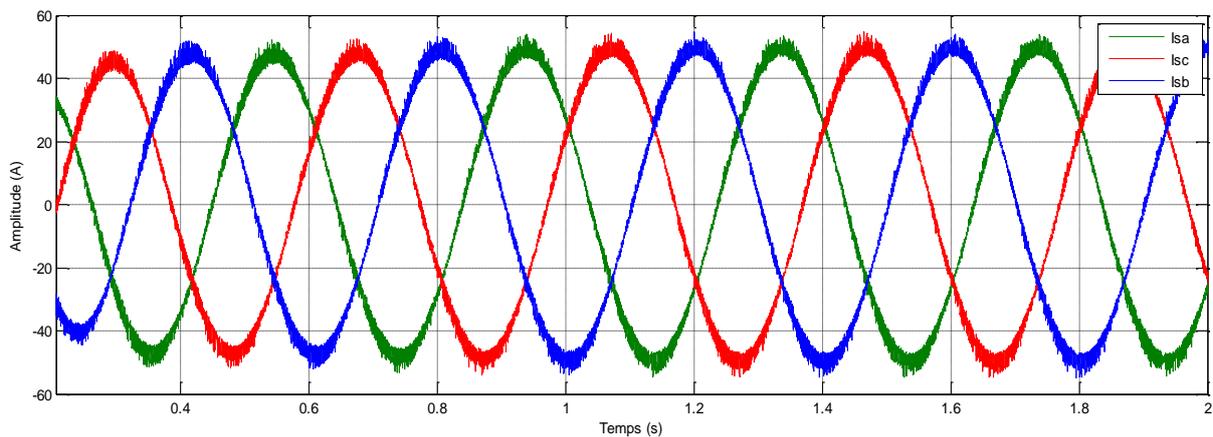


Figure III.7. Courants de source après le filtrage.

Après l'insertion du système de filtrage nous remarquons que les courants de source (figure III.7) prennent une forme purement sinusoïdale ce qui prouve que le FAP compense correctement les courants harmoniques générés par la charge non linéaire.

3.3.2.5 Spectre harmonique de courant de source

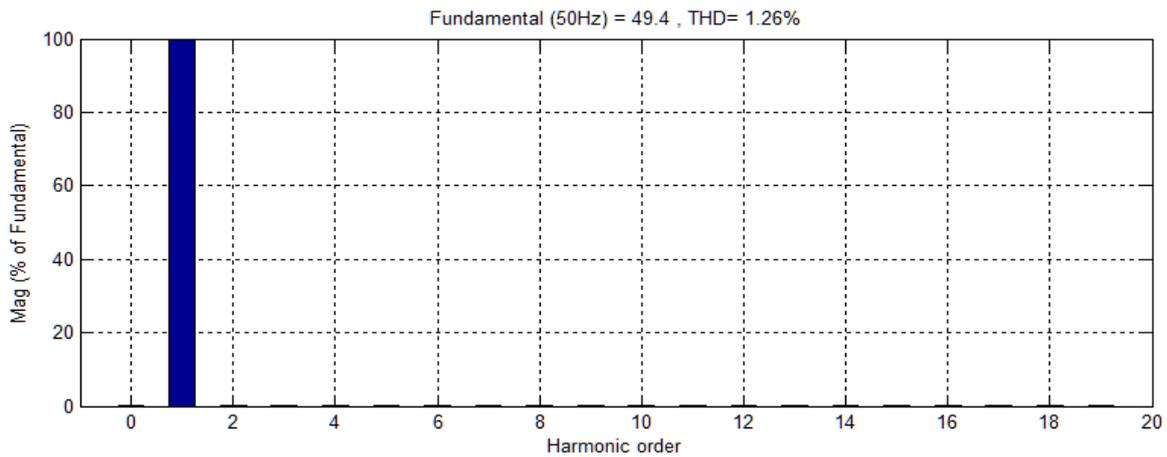


Figure III.8. Spectre du courant de la source après filtrage.

La compensation des courants harmonique est aussi prouvée par les résultats présentés par la figure (III.8) où on constate une réduction de TDH d'une valeur de 19.38 % (par rapport aux résultats avant filtrage).

3.3.3 Simulation après filtrage avec une variation de la charge

Cette simulation du filtre actif parallèle à trois niveau est réalisé pour visualiser l'évolution des courants et des tensions de notre système, avec l'insertion d'une résistance ($R_{ch2} = 20 \Omega$) en parallèle avec c'elle de la charge non-linéaire pendant un interval de temps.

3.3.3.1 Courant de la charge

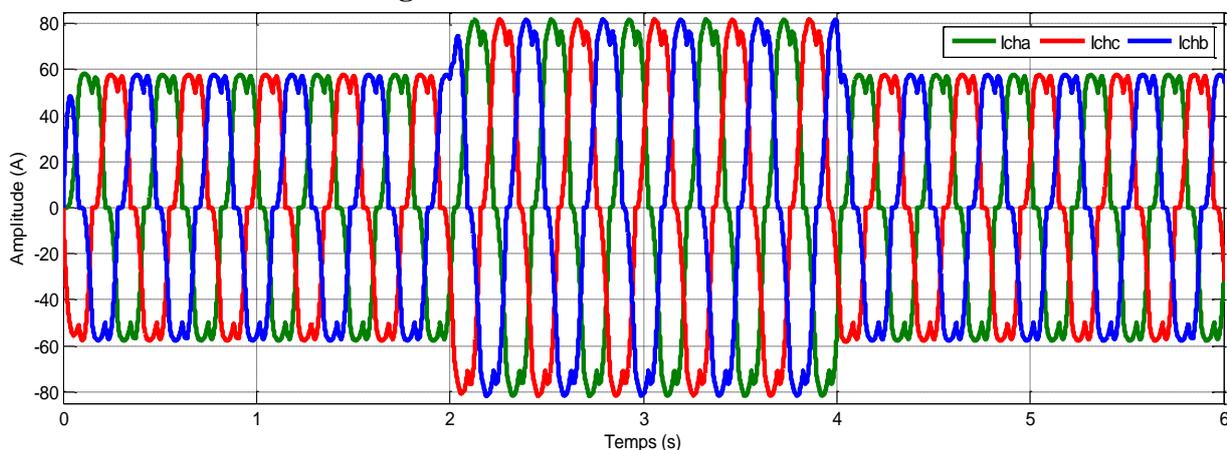


Figure III.9 Courant de charge après filtrage avec une variation de la charge.

D'après la figure (III.9) on remarque que la valeur du courant de charge augmente pendant un intervalle de temps puis revient à sa valeur initiale, cette variation est due à l'insertion d'une seconde résistance ($R_{ch2} = 20 \Omega$).

3.3.3.2 Courant et spectre harmonique de la source

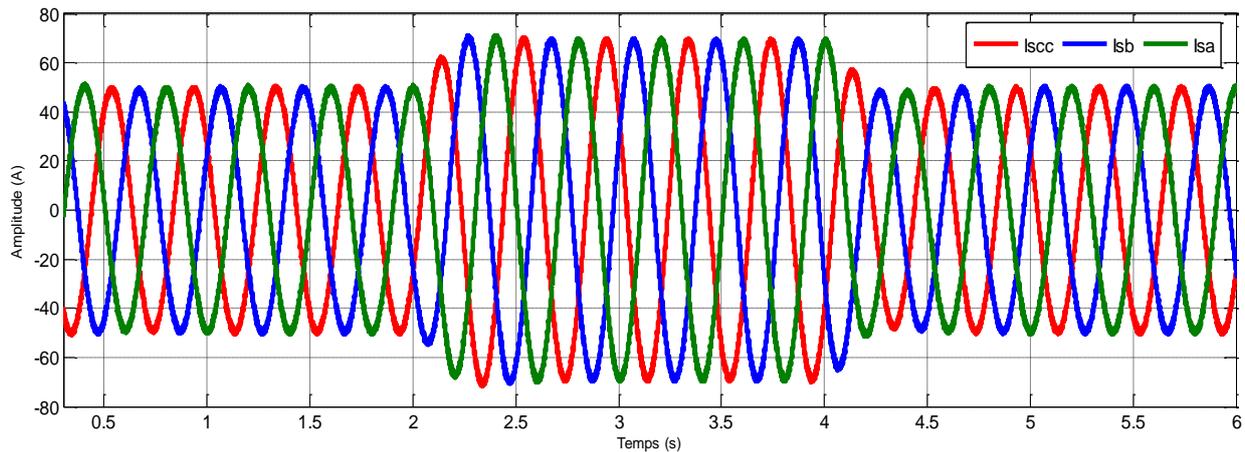


Figure III.10 Courant de la source avec une variation de la charge.

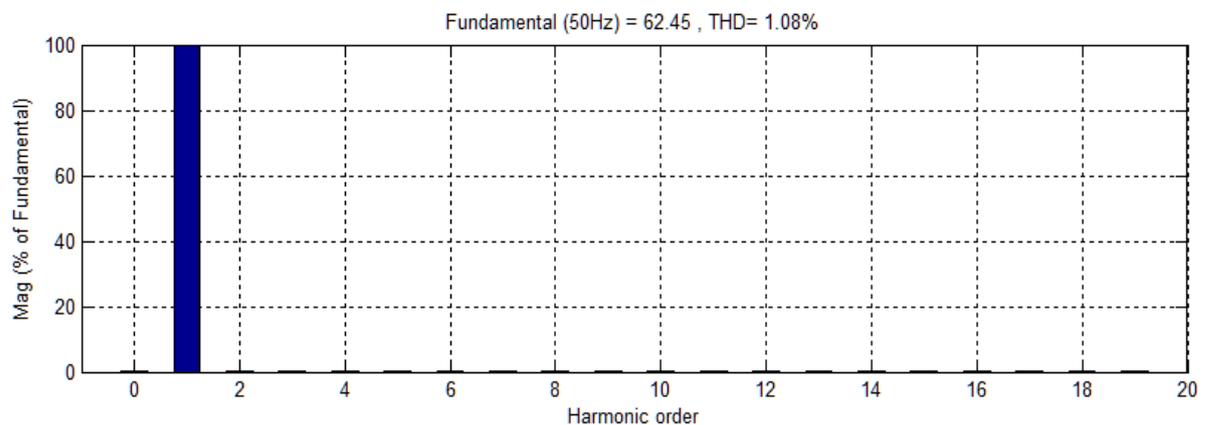


Figure III.11 Spectre de courant harmonique de la source.

Les résultats obtenus dans les figures (III.11), figure (III.10) montrent l'adaptation du filtre actif parallèle à trois niveaux à la variation de la charge. La forme d'onde du courant de la source est sinusoïdale avec un spectre d'harmonique d'une THD de 1.08%.

3.3.3.3 Courant injecté dans le réseau

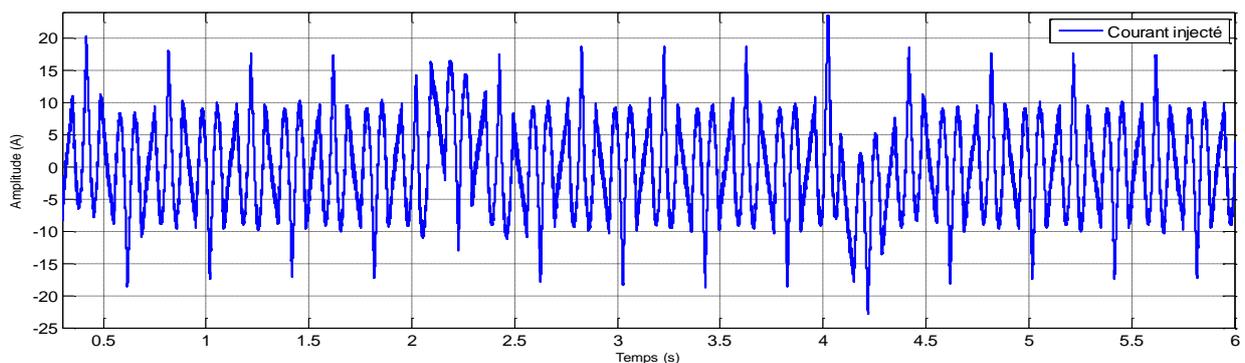


Figure III.12 Courant injecté dans le réseau.

La figure (III.12) illustre le courant injecté dans une phase de réseau. On remarque que dès l'insertion de la charge R_{ch2} le courant injecté augmente légèrement puis revient à sa valeur initiale, par contre lorsque on déconnecte cette charge le courant injecté diminue légèrement puis revient à sa valeur précédente.

3.3.3.4 Tension du bus continu

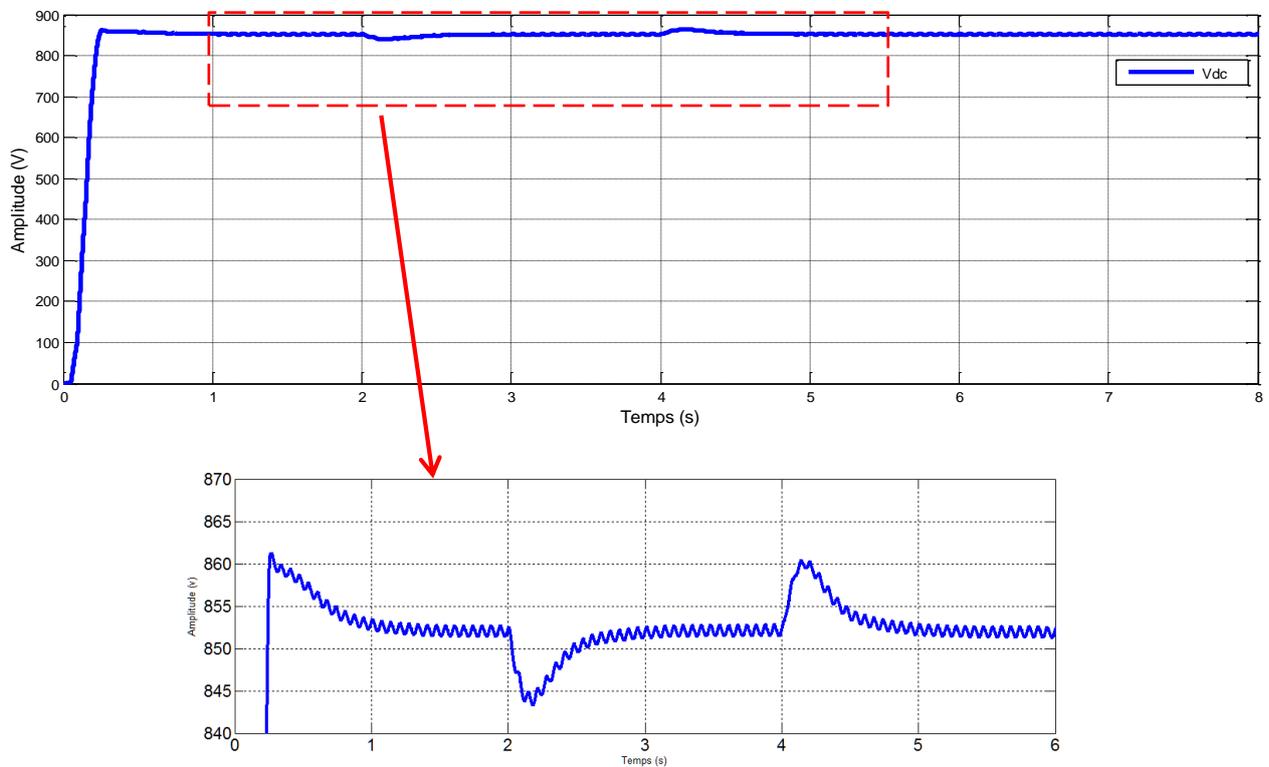


Figure III.13 Tension V_{dc} du bus continu

La figure ci-contre présente la tension aux bornes du condensateur lors de mise en parallèle de la charge R_{ch2} avec première charge R_{ch2} pendant un intervalle de temps. La tension V_{dc} suit idéalement sa référence avec un certain dépassement.

Conclusion

L'étude effectuée dans ce chapitre a été particulièrement dédiée à la simulation de fonctionnement du réseau électrique connecté à une charge non linéaire avant et après la compensation des harmoniques du courant à l'aide du FAP à trois niveaux (NPC). Suite à une analyse détaillée des résultats obtenus on constate que le FAP peut réduire les harmoniques de courant à moins de 1.26% et s'adapte particulièrement aux variations de la charge. Ces résultats montrent aussi l'efficacité de la stratégie de commande implémentée où les courants injectés par le FAP suivent parfaitement ceux des courants de référence. La tension de bus continue est bien maintenue à sa valeur de référence ce qui témoigne de la performance de la boucle de régulation à base d'un régulateur PI.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été consacré à l'étude et la simulation d'un filtre actif parallèle à trois niveaux (NPC) afin d'éliminer les courants harmoniques dans les réseaux électriques.

Les résultats de simulation prouvent que la performance du FAP à trois niveaux est liée à la méthode d'identification des courants harmoniques par le principe de calcul des puissances active et réactive instantanées qui offre une grande efficacité et précision avec sa facilité d'implantation.

De plus, la poursuite des courants de référence par les courants injecté dans le réseaux témoigne également l'efficacité de la stratégie de commande par hystérésis qui travaille a des fréquences variables. La régulation de la tension V_{dc} par le régulateur PI assure aussi une bonne stabilité de V_{dc} près de sa valeur de référence, et permet ainsi au filtre actif de s'adapter aux variations de la charge.

Enfin, l'utilisation d'un FAP a trois niveaux (NPC) avec une commande hystérésis et un régulateur PI est très intéressante vu l'efficacité et la simplicité d'implémentation de cette commaaande qui travaille a des fréquence variabel, ansi que le régulateur PI qui permet l'auto-adaptation du FAP face aux variations de la charge et la stabilié de la tenson du bus continue.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **ABDELATIF Med Elhadi**, « Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique », *Mémoire de Master*. Université de M'sila, 2013.
- [2] **V. IGNATOVA**, « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique : application aux creux de tension et à la pollution harmonique », *Thèse de Doctorat*. Université Joseph Fourier, 2006.
- [3] **T. GOURAUD**, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », *Thèse de Doctorat*. Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, 1997.
- [4] **F.HAMOUDI**, « Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt à Quatre Fils », *Mémoire de Magistère*. Université de Batna, 2008.
- [5] **SOUMIA LARABI & JUMA SHABANI AMANI**, « Etude et simulation d'une commande d'un filtre actif de puissance basé sur les ondelettes », *Thèse de Master*. Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2017.
- [6] **DJAFFAR OULD ABDESLAM**, « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèles dans les réseaux électriques basse tension », *Thèse De Doctorat*. Université de Haute Alsace, 2005.
- [7] **F. MEKRI**, « Commande robuste des conditionneurs actifs de puissances », *Thèse de doctorat*. Université des sciences et de la technologie d'Oran, 2007.
- [8] **M. A. E. ALALI**, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », *Thèse de doctorat*. Université Louis Pasteur Strasbourg I, France, 2002.
- [9] **S.KEBIRI**, « Modélisation et simulation d'un filtre actif multi niveaux », *Mémoire de Magister*. Université Mouloud Mammer de Tizi-Ouzou, 2009
- [10] **NEKKAR DJAMEL**, « Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés », *Mémoire de magister*. Université de Souk-Ahras, 2014.
- [11] **C. FETHA**, « Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique », *Thèse Doctorat*. Université de Batna, 2006.
- [12] **ABDELMALEK BOULAHIA**, « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique », *Mémoire magister*. Université de Constantine, 2009.
- [13] **A.SAHLI**, « Filtrage actif et contrôle de puissances: application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », *Mémoire de magister*. Université Ferhat Abbas-Sétif, 2012.

- [14] **KAMIL MOHAMMED ET NOURI SALIH**, « Commandes non linéaires d'un filtre actif parallèle », *Mémoire d'Ingéniorat*. Université de M'sila, 2010.
- [15] **SOUFIANE BEN ALI, SADDAM BOUHANAK**, « Etude et simulation d'un filtre actif parallèle a quatre fils », *Mémoire master*. Université Echahide Hama Ikhder d'El-oued, 2015.
- [16] **A. LOPEZ DE HEREDIA BERMEO**, « Commande avancée des systèmes dédiés a l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la moyenne tension », *Thèse de doctorat*. Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [17] **LAID. ZELLOUMA**, « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant génères par un pont redresseur triphasé non commandé », *Mémoire de magister*. Université Annaba 2006.
- [18] **M.M. ABDUSALAM**, « Structures et stratégies de commande de filtres actifs parallèle ethybride avec validations expérimentales », *Thèse de doctorat*. Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2008.
- [19] **BADACHE ZOHIR & SACI ABDESLAM**, « Etude par simulation d'un filtre actif parallèle », *Mémoire d'ingénieur*. Université de Msila, 2006.
- [20] **SAÏD ZELLOUMA, ABDELLAH ZIDANE**, « Compensation des harmoniques et de la puissance réactive à l'aide du filtre actif parallèle », *Mémoire master*, Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued, Juin 2015..
- [21] **ABDELMADJID CHAOUI**, « Filtrage actif triphae pour charges non lineaires », *Thèse de doctorat*, Université de Sétif, 2010.
- [22] **RABIE ALLAHOUM**, « Contribution à l'étude du filtre actif parallèle de puissance à trois niveaux », *Mémoire magister*. Université El-Oued, 2012.
- [23] **N.BELHAOUCHET**, « Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées, Application : Amélioration de la qualité de l'énergie », *Thèse de doctorat*. Université Ferhat Abbas-Sétif, 2011.
- [24] **P. PURKAIT, R.S. SRIRAMAKAVACHAM**, « A New Generalized Space Vector Modulation Algorithm for Neutral Point Clamped Multilevel Converters », *Progress in Electromagnetic Research Symposium, Cambridge*, pp. 330-335, March 2006.

- [25] **D. BERIBER, E. M. BERKOUK, M. O. MAHMOUDI, A. TALHA**, « Association onduleur à trois niveaux a structure NPC machine asynchrone à double stator ». Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.
- [26] **NAKAJIMA, E. MASADA**, « An active power filter with monitoring of harmonic spectrum », *EPE-89, 3rd European conference on power electronics and applications*, Aachen, Germany, 1989.
- [27] **L. BENCHAITA**, « Etude par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande », *Thèse de Doctorat*. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1998.
- [28] **BADACHE ZOHIR & SACI ABDESLAM**, « Etude par simulation d'un filtre actif parallèle », *Mémoire d'ingénieur*. Université de Msila, 2006.
- [29] **KARIMI SHAHRAM**, « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage FPGA in the loop : application au filtre actif parallèle». *Thèse de Doctorat*. Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, 2009.
- [30] **GAILLARD ARNAUD**, « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », *Thèse de Doctorat*. Université Henri Poincaré, 2010.
- [31] **CHELLI ZOUBIR**, « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique », *Thèse de Doctorat*. Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.
- [32] **M. BOJRUP**, « Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger Application », *Thesis*. Lund Institute of Technology, Sweden, 1999.
- [33] **S. BALA**, « One cycle control of three-phase VAR compensators and active power filters», *Thesis*. Indian Institute of Technology, Bombay, April 2003.

