



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Réseaux électriques

Thème

**Amélioration de la qualité d'énergie électrique par un filtre
actif parallèle a trois fils**

Présenté par:

- GHERAISSA Abd El Hamid
- REHOUMA Mohammed el amine
- BACI Yacine Elerbi

Encadré par :

Dr. MAHNI Tidjani

Année Universitaire 2021/2022



REMERCIEMENTS

à Dieu - le tout puissant - qui nous

a aidé à

réaliser ce modeste travail.

Nous remercions particulièrement

notre promoteur

*Mr. **T. MAHNI**, pour son
dévouement exceptionnel, sa
précieuse directive et son suivi
constant.*

*Nos remerciements vont aussi au
président du jury et aux
membres du jury examinateurs qui
nous fait l'honneur de participer au
jury de ce travail.*

*Et enfin nous remercions
l'ensemble, enseignants et
collègues de
notre promotion, qui nous ont aidé
à réaliser ce modeste*

G.ABD ELHAMID

R.MOHAMMED EL AMINE

B.YACINE LERBI



Dédicace

Nous consacrons ce modeste travail a:

Nos chers parents

Nos sœurs et nos frères

A toute la famille : GHERAISSA

A toute la famille : REHOUMA

A toute la famille : BACI

Tous nos amis

A tous mes camarades de la promotion

2021/2022 pour les

bons moments passés ensemble.

Tous les enseignants qui m'ont aidé

de proche ou de loin.

ملخص

إن المزايا الكبيرة التي تقدمها محولات القدرة جعلت استخدامها في ازدياد مستمر وعلى الرغم من ذلك إلا أن هذه المحولات تسبب تلوث ورداءة التيار الكهربائي في الشبكات الجهد المنخفض المتناوب.

في هذا العمل تم دراسة هاته التشوهات وذكرنا بعض الحلول للتقليل منها ومن أهم هذه الحلول الفلترالنشط حيث قمنا بدراسته ورأينا كيفية عمله كذلك رأينا أنه يتكون من جز الطاقة وجزء التحكم في الجزء الأخير من هذا العمل قمنا بإنجاز محاكات توصيل المرشح بالشبكة الكهربائية ورأينا النتائج التشوه قبل التوصيل وبعد التوصيل وما مدى نجاعة هذا الحل

الكلمات المفتاحية: مرشح نشط متوازي ثلاثي الأسلاك، توافقيات، تيارات توافقية

Résumé

Les grands avantages offerts par les adaptateurs d'alimentation ont fait que leur utilisation en constante augmentation, bien que ces transformateurs causent de la pollution et une mauvaise alimentation dans les réseaux alternatifs basse tension. L'objectif de ce travail est l'étude d'un filtre actif parallèle à structure tension afin d'améliorer la qualité d'énergie dans les réseaux basse tension.

Dans ce travail, nous avons étudié ces distorsions et mentionné quelques solutions pour les réduire et la plus importante de ces solutions est le filtre actif parallèle où nous l'avons étudié et nous avons vu comment cela fonctionne aussi, nous avons vu qu'il se compose de la partie de puissance et de la partie de contrôle.

Dans la dernière partie de ce travail, nous avons terminé les simulations de connexion du candidat au réseau électrique et avons vu les résultats déformés avant compensation et l'efficacité de cette solution après compensation. Nous avons conclu que l'utilisation d'un filtre multi-variable améliore le filtrage.

Mots clés : Filtre actif parallèle à trios fils, harmonique (THD), courants harmoniques.

sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE.I : Perturbations et Dépollution dans les Réseaux Electriques

I.1. Introduction.....	3
I.2 Qualité de l'énergie électrique:.....	3
I.3 -Les perturbations électriques :.....	4
I.3.1 Perturbations harmoniques:.....	4
I .3.1.1- Définition :.....	4
I.3.1.2- Origines :.....	4
a. Les convertisseurs statiques.....	4
b.L' éclairage:.....	4
c.Les fours à arc :.....	5
d.Les inductances saturées :.....	5
e.Les machines tournantes :.....	5
I.3.1.3Conséquences des harmoniques:.....	5
a. L' échauffement.....	5
b. L' interférence avec les réseaux de télécommunication :.....	5
c. Les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques:.....	6
d. Le risque d' excitation de résonance:.....	6
I.3.2-Déséquilibre du système triphasé de tension :.....	6
I.3.2.1- Origines :.....	6
I.3.2.2- Conséquences :.....	6

Sommaire

I.3. 3- Creux et coupures de tension :.....	7
I.3.3.1- Définition :.....	7
I.3.3.2 - Origines :.....	7
I.3.3.3- Conséquences :.....	8
I.3.4-Variation de fréquence :.....	8
I.4- Caractérisation des perturbations harmoniques :.....	8
I.5 Solutions possibles pour réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie.....	11
I.5.1 Solutions traditionnelles de dépollution:.....	11
I.5.2 Les Solutions modernes :.....	11
I.5.2.1 Filtre actif parallèle :.....	11
a. Filtre monophasé :.....	12
b. Filtre actif parallèle à trois fils :.....	13
c. Filtre actif parallèle à quatre fils:.....	13
I.6 Comparaison entre les filtres passifs et les filtres actifs :.....	14
I.7 Conclusion :.....	15

CHAPITRE.II Structure et Commande du Filtre Actif Parallèle

II.1. Introduction :.....	16
II.2 Principe du filtre actif parallèle:.....	16
II.3 Structure d'un filtre actif parallèle:.....	17
II.3.1 Topologie générale:.....	17
II.3.2-Etude de la partie puissance:.....	18
II.3.2.1-Onduleur de tension.....	18
II.3.2.1.1-Structure générale.....	18
II.3.2.1.2-Tension fournie par l'onduleur.....	19
II.3.2.1.3-Représentation vectorielle.....	19
II.3.2.1.4-Système de stockage d'énergie.....	20
II.3.2.1.5-Filtre de couplage.....	20

II.3.3-Étude de la partie commande-contrôle.....	21
II.3.3.1-La méthode d'identification des courants perturbés.....	22
II.3.3.1.1-Les méthodes utilisées dans le domaine fréquentiel.....	22
II.3.3.1.2-Les méthodes utilisées dans le domaine temporel.....	22
II.3.3.2-Régulation de la tension continue.....	26
II.3.3.3-Commande de l'onduleur.....	28
II.3.3.4-Commande par hystérésis.....	28
I.4 Conclusion.....	29

CHAPITRE.III: Simulations et Interprétations des Résultats

III.1-Introduction.....	31
III.2- Schéma de simulation:.....	31
III.2.1-Paramètres de la simulation.....	33
III.2.2Résultat deSimulation.....	34
III.2.2.1 avant le filtrage.....	34
III.2.2.2 après le filtrage.....	35
III.2.2.2.1 Méthode des puissances instantanées avec filtre passe-bas.....	35
III.2.2.2.2 Méthode des puissances instantanées avec.....	38
III.3-Conclusion.....	41
Conclusion générale.....	42
Références Bibliographiques.....	43

LISTE DES SYMBOLES

f	Fréquence
f_h	Fréquence de la composante harmonique de rang h
f_1	Fréquence de la composante fondamentale
THD	Taux de Distorsion Harmonique
D	Puissance Déformante
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
FP	Facteur de puissance
I_f	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
I_{1h}	Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
V_1	Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h
V_h	Valeur efficace de la tension du fondamental
p	indice de pulsation
L	Inductance
C	Capacité
R	Résistance
IGBT	Insolâtes Gâte Bipolaire Transistor
MLI	modulation de largeurs d'impulsions
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actif série
R_s	Résistance du réseau côté source (Ω).
L_s	Inductance côté source (H).
R_c	Résistance côté de charge (Ω).
L_c	Inductance côté source (H).
L_f	Inductance de filtre
C_{dc}	Condensateur du bus continue
I_s	Courant du source
I_f	Courant du filtre
I_h	Courant harmonique de la charge
I_n	le courant du neutre
$i_{\alpha}^*, i_{\beta}^*, i_c^*$	le courant d'identifie
i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}	le courant de line
$\mathbf{p}$,	Composantes Alternatives de la puissance réelle et imaginaire respectivement
α - β	Axes du repaire de Concordia
ΔT	La période de variation du courant du filtre
W_h	la pulsation du rang h
T_i	Etat de l'interrupteur i (ouvert ou fermé)

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Fig (I.1)	- Analyse d'une onde déformée..	4
Fig (I.2)	Déséquilibre du système triphasé de tension	6
Fig (I.3)	Creux et coupures de tension.	7
Fig (I.4)	Variation de la fréquence.	8
Fig (I.5)	Schémas équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de raccordement	9
Fig (I.6)	Principe du filtrage actif parallèle.	12
Fig (I.7)	Déférentes configurations d'un filtre actif monophasé	12
Fig (I.8)	Configuration d'un FAP à trois fils.	13
Fig (II.1)	Principe du filtrage actif parallèle.	16
Fig (II.2)	structure générale d'un filtre actif parallèle	17
Fig (II.3)	Onduleur de tension triphasé	18
Fig (II.4)	Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur	19
Fig (II.5)	Schéma du filtre de puissance utilisé pour l'extraction des composantes fondamentales	24
Fig (II.6)	Algorithme de la méthode des puissances instantanées pour l'extraction du courant harmonique	25
Fig (II.7)	Filtre multi-variable	26
Fig (II.8)	Filtre multi-variable pour l'extraction des harmoniques	26
Fig (II.9)	Boucle de régulation de la tension continue.	27
Fig II.10	Principe de la commande par hystérésis	29
Fig (III.1)	Schéma de FAP à trois fils-réseau-charge polluante Matlab- Simulink..	30
Fig (III.2)	charge polluante	30
Fig (III.3)	commande par hystérésis sous Matlab- Simulink	31
Fig (III.4)	Identification par la méthode des puissances instantanées filtre passe-bas sous Matlab- Simulink	31
Fig (III.5)	Identification par la méthode des puissances instantanées Filtre multi-variable sous Matlab- Simulink	31
Fig (III.6)	Courants des trois phases du réseau électrique avant l'injection du filtre.	34
Fig (III.7)	Spectre de la courante source avant filtre.	34
Fig (III.8)	Courants des trois phases du réseau électrique après l'injection du filtre passe-bas	35

LISTE DES FIGURES

Fig (III.9)	Le courant injecté par le filtre passe-bas.	35
Fig (III.10)	Spectre de la courante source après filtre. passe-bas.	36
Fig (III.11)	Courants de source et tension de source.	36
Fig (III.12)	La tension de la capacité.	36
Fig (III.13)	Courants de la charge lors de la variation de charge.	37
Fig (III.14)	Courants de la source lors de la variation de charge .	37
Fig (III.15)	Courants des trois phases du réseau électrique après l'injection du filtre multi-variable.	38
Fig (III.16)	Le courant injecté par le filtre .multi-variable	38
Fig (III.17)	Spectre de la courante source après filtre. multi-variable	39
Fig (III.18)	Courants de source et tension de source.	39
Fig (III.19)	La tension de la capacité	39
Fig (III.20)	Courants de la charge lors de la variation de charge.	40
Fig (III.21)	Courants de la source lors de la variation de charge.	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
Tab (I.1)	Caractéristiques des filtres actifs et passifs.	14
Tab (II.1)	Tensions générées par l'onduleur	19
Tab (III.1)	paramètres des éléments du réseau	32
Tab (III.2)	paramètres des éléments du filtre.	32

Introduction générale

Les courants harmoniques sont les représentations de la série de Fourier des composantes sinusoïdales d'un courant électrique périodique. Dans les réseaux électriques, les harmoniques ont une fréquence multiple de la fréquence fondamentale, qui est généralement de 50 ou 60 Hertz. En d'autres termes, les harmoniques sont une représentation mathématique de la distorsion d'un signal sinusoïdal a priori. Les tensions harmoniques sont la rupture en série de Fourier des composants sinusoïdaux d'une tension électrique périodique, L'existence de charges électriques non linéaires dans un réseau électrique provoque des courants harmoniques. Ces courants harmoniques créent des harmoniques de tension à développer à la suite des impédances du réseau, qui influencent ensuite les autres clients du réseau de distribution.

L'augmentation des pertes, l'augmentation du bruit, des interférences et du couple sismique ont tous des effets négatifs sur les courants harmoniques. Les clients devraient réduire l'injection de courant harmonique dans le réseau, car les gestionnaires de réseau électrique veillent à ce que l'approvisionnement en électricité contienne quelques harmoniques. L'installation de filtres négatifs ou actifs, le choix d'un couplage d'adaptateur approprié et l'assemblage d'électronique d'énergie avec moins de compatibilité sont autant de moyens de réduire les taux de distorsion de tension et de courant électriques..

Les filtres actifs parallèles sont désormais l'une des options avancées de contrôle de la pollution les plus appropriées pour les installations électriques actuelles. Actuellement, les solutions actives sont celles qui répondent le mieux aux restrictions de production et de distribution. Sa réponse est immédiate et s'adapte automatiquement aux différences de perturbations causées par les charges du réseau électrique. Les filtres actifs parallèles sont simplement intégrés dans un réseau de distribution électrique, que ce soit dans le secteur industriel ou domestique, sans imposer aucun développement aux fournisseurs d'énergie ou aux installations grand public.

Les FAP sont constitués de convertisseurs à base d'interrupteurs de puissance, de type onduleur, associés à un dispositif de contrôle et de commande adapté. Ils peuvent être assimilés à des sources de courant ou de tension qui compensent directement les perturbations harmoniques en injectant sur le réseau des courants ou des tensions en opposition de phase par rapport aux perturbations mesurées.

Dans ce mémoire le travail est réalisé sur l'ensemble réseau, charge non linéaire (pont triphasé non commandé) filtre actif pour éliminer les courants harmoniques générés par la charge non-linéaire.

Le travail se compose de trois chapitres, structurés comme suit :

Nous examinerons les causes des perturbations harmoniques et leurs impacts sur le réseau électrique dans le premier chapitre, ainsi que les sources, les répercussions et les règles inhérentes à ces perturbations. Nous passerons en revue les options de correction classiques et nouvelles dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude du filtre actif parallèle triphasé, nous exposerons les différents éléments constitutifs du filtre.

Les schémas du système simulé et le résultat de la modélisation de la correction harmonique par un filtre actif parallèle sont présentés dans le dernier chapitre. Nous examinons deux variantes d'identification des courants harmoniques par la méthode des puissances instantanées : la première est faite sur la base d'un filtre passe-bas et la deuxième sur la base des filtres multi-variables.

CHAPITRE I

Perturbations et Dépollution dans les Réseaux Electriques

I.1. Introduction

Les perturbations harmoniques sont des perturbations périodiques régulières qui se produisent selon un schéma prévisible. Ces perturbations ont des répercussions immédiates et à long terme sur le bon fonctionnement des appareils électriques. Par conséquent, savoir décrire, évaluer et mesurer les harmoniques est essentiel pour chaque installation spécifique. Les concepts de base de l'analyse harmonique, ainsi que les causes et les effets de la pollution harmonique, sont discutés dans ce premier chapitre.

I.2 Qualité de l'énergie électrique:

Le terme « qualité de l'énergie » fait référence à la qualité d'une alimentation électrique, ainsi qu'à la qualité d'une onde de tension et à la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux effets comprennent des fluctuations progressives telles que des creux de tension, des surtensions, des coupures et des déséquilibres, ainsi que des variations rapides telles que des surtensions transitoires, des scintillements et des harmoniques. D'autre part, la qualité des courants représente la capacité des charges à fonctionner sans perturber ou diminuer l'efficacité du système électrique. En conséquence, certaines personnes croient que la qualité de l'électricité a été réduite à la qualité de la tension [1].

La mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation à un ensemble de critères ou de normes quantitatifs et absolus est connue sous le nom de qualité de l'alimentation ou qualité des vagues. Un système triphasé avec des tensions sinusoïdales est utilisé pour fournir de l'énergie électrique. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- la fréquence,
- l'amplitude,
- la forme d'onde qui doit être sinusoïdale,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, Flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes,
- les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes,
- les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période [1].

I.3 -Les perturbations électriques :

I.3.1 Perturbations harmoniques:

I .3.1.1- Définition :

Selon la norme IEEE 519, un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou une quantité ayant une fréquence qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs $h=2$ et $h=40$). Il peut exister des inter-harmoniques [3][2].

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique. L'harmonique d'ordre zéro correspond à la composante directe du signal, l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre.

Les premiers rangs harmoniques tel que (3, 5, 7) ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes [4][2].

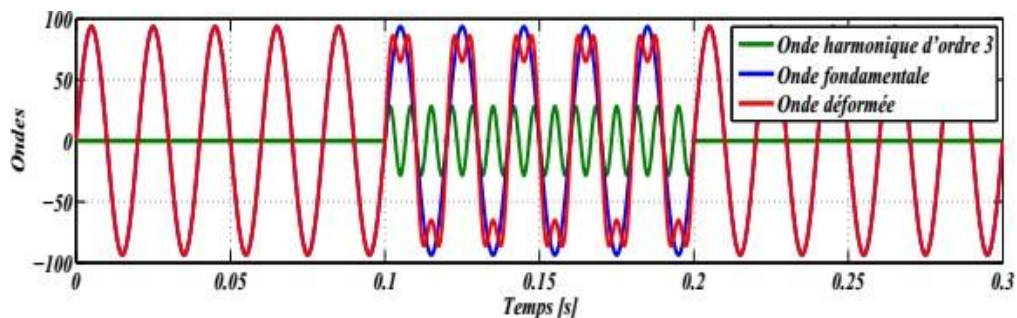


Figure I.1 - Analyse d'une onde déformée.

I.3.1.2- Origines :

a. Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés. On peut citer de manière non exhaustive :

- Les redresseurs monophasés et triphasés.
- Les gradateurs utilisés dans les entraînements.
- Les systèmes d'éclairage et de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux.
- Les variateurs de vitesse électroniques constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une partie électronique, destinés à commander la vitesse d'un moteur électrique.

b. L'éclairage:

Les courants harmoniques sont générés par les lampes à décharge et les tubes fluorescents. Pour certaines lampes fluorescentes compactes modernes, le taux harmonique individuel 3 peut même dépasser 100%, ce qui nécessite une attention particulière à la détermination de la section

transversale et à la protection du conducteur neutre, qui, en portant la somme des courants harmoniques 3 des trois phases, risque un chauffage important.

c. Les fours à arc :

L'arc est non linéaire, asymétrique et instable dans un four à arc CA. Il générera des spectres avec des lignes impaires, paires et continues (bruit de fond à toutes les fréquences). Le niveau de spectre est déterminé par le type de four, sa puissance et la période de fonctionnement (fusion, raffinage, etc.). De plus, seules les mesures permettent d'estimer avec précision le spectre.

L'arc est alimenté par un redresseur dans le cas d'un four à arc CC. Contrairement au courant alternatif, l'arc est plus stable. Le courant absorbé a un spectre semblable à un redresseur et un spectre continu avec un niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif.

d. Les inductances saturées :

L'impédance de telles inductances est proportionnelle à l'amplitude du courant qui les traverse, et elles induisent réellement de grandes déformations de courant. Dans une certaine mesure, cela est vrai pour les transformateurs à vide qui sont soumis à une surtension persistante.

e. Les machines tournantes :

Les machines tournantes donnent des harmoniques de denture de rangs élevés et d'amplitudes souvent négligeables [5][2].

I.3.3 Conséquences des harmoniques:

a. L'échauffement

Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$I^2 R = \sum_{i=1}^{\infty} (I_i^2 \cdot R) \quad (I.1)$$

Avec I le courant total, I_i le courant harmonique de rang i qui représente le fondamental pour $i=1$, et R la résistance traversée par le courant I . Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs ...).

b. L'interférence avec les réseaux de télécommunication :

Le couplage électromagnétique peut provoquer un bruit considérable dans les réseaux de communication. Certaines parties des réseaux de communication peuvent devenir inutiles en raison de résonances.

c. Les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques:

Tout dispositif dont la fonction dépend du passage à zéro de grandeurs électriques (dispositifs utilisant la tension comme référence) peut être perturbé en présence d'harmoniques puisque la tension (ou le courant) peut changer de signe plusieurs fois en une demi-période.

d. Le risque d'excitation de résonance:

Les fréquences de résonance des circuits d'inductances de transformateurs et de câbles sont généralement élevées. Lorsque des batteries de capacité sont connectées au réseau pour améliorer le facteur de puissance, les fréquences de résonance peuvent devenir extrêmement faibles et coïncider ainsi avec les harmoniques créées par les convertisseurs statiques, ce qui entraîne une amplification harmonique.

I.3.2-Déséquilibre du système triphasé de tension :

I.3.2.1- Origines :

La circulation des courants hors équilibre dans les impédances du réseau provoque des déséquilibres de tension dans un récepteur électrique triphasé qui n'est pas équilibré et alimenté par un réseau triphasé équilibré [6]. Les récepteurs monophasés basse tension sont connus pour cela. Cependant, l'équipement de soudage, les fours à arc et la traction ferroviaire peuvent tous le faire à des tensions plus élevées.

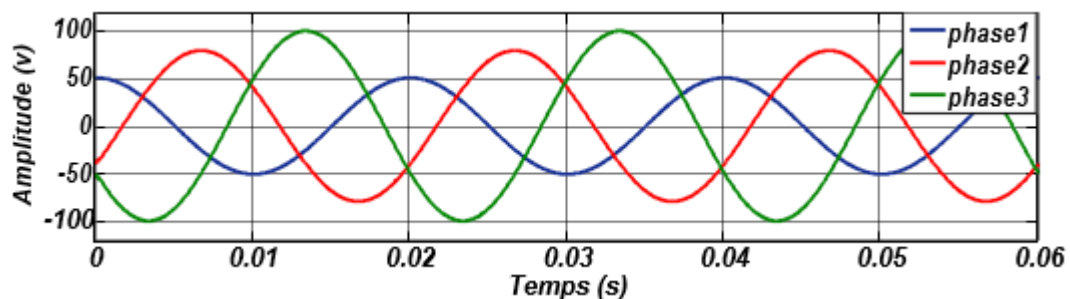


Figure I.2 - Déséquilibre du système triphasé de tension.

I.3.2.2- Conséquences :

- 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 (claquage d'un filament de lampe par surtension).
- Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple

de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une antirésonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande. 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.

- Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie [7][2].

I.3.3- Creux et coupures de tension :

I.3.3.1- Définition :

Le creux de tension (Figure 1.3) est défini comme toute chute de tension de plus de 10 % de la tension normale au cours d'une période allant de 10 millisecondes à plusieurs secondes; les amplitudes inférieures sont classées comme des fluctuations de tension [8]. Leur amplitude et leur longueur les définissent, et ils peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases impliquées.

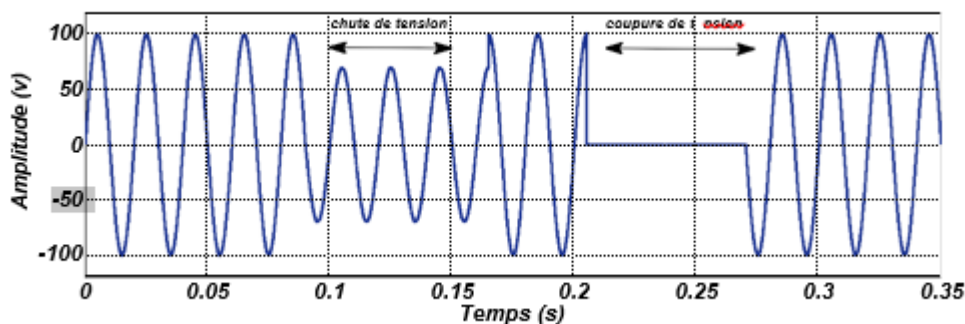


Figure I.3- Creux et coupures de tension

I.3.3.2 - Origines :

Les perturbations dans le fonctionnement du réseau, telles que la mise sous tension d'énormes transformateurs, l'enclenchement des condensateurs, le démarrage simple de gros moteurs, etc., sont les principales sources de baisses de tension. Les court-circuit dans le réseau principal ou dans les installations des clients peuvent également provoquer des baisses de tension. Selon l'emplacement du court-circuit et le fonctionnement des organes protecteurs, leur longueur peut varier de 10 millisecondes à plusieurs secondes [2].

I.3.3.3- Conséquences :

Lorsque la profondeur et la longueur des creux de tension dépassent les limites spécifiées, ils peuvent provoquer des perturbations de couple dans les machines de rotation, des perturbations de l'équipement électronique, des défaillances précoces et le déclenchement de l'appareil (en fonction de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être assez coûteuses (temps de redémarrage de plusieurs heures, voire de plusieurs jours; perte de données informatiques; dommages aux produits, voire aux équipements de production, etc.).[9] [10] [11][2].

I.3.4-Variation de fréquence :

Sur les réseaux d'utilisateurs qui ne sont pas mis en réseau ou alimentés par une source de chaleur indépendante, une fluctuation substantielle de la fréquence du réseau peut survenir (voir figure I.4). Ce changement de fréquence est extrêmement inhabituel au niveau du réseau de distribution ou de transport et ne se produit que dans des conditions extraordinaires, par exemple lorsque le réseau présente certaines failles majeures [3]. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$.

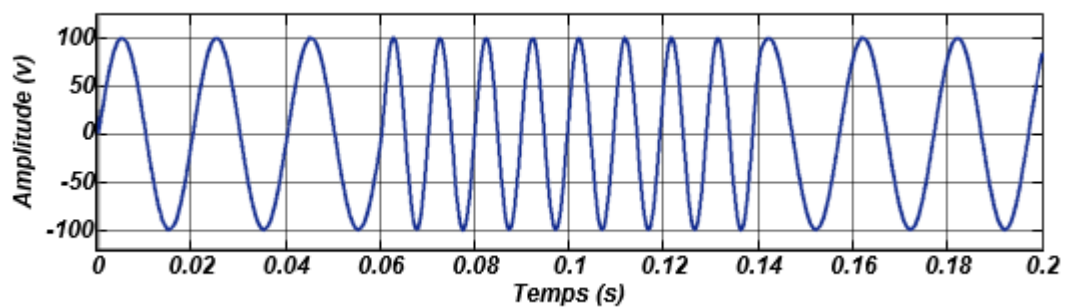


Figure I.4 - Variation de la fréquence

I.4- Caractérisation des perturbations harmoniques :

Le taux de distorsion harmonique (THD) pour la tension ou le courant est couramment utilisé pour décrire la perturbation harmonique. Ce critère est le plus souvent utilisé pour mesurer le contenu harmonique d'un signal déformé. Il détermine également le degré de distorsion du signal causé par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Il va sans dire que la distribution spectrale, en révélant le rang des harmoniques dominantes, complète souvent l'information sur le THD. Le facteur de puissance (FP) est couramment utilisé pour évaluer la consommation d'énergie réactive [13].

Le courant absorbé par une charge non linéaire (convertisseur statique) n'est pas sinusoïdal, mais sa valeur moyenne sur chaque phase est souvent nulle. Dans ce cas, la décomposition en série de Fourier du courant donne :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (I.2)$$

Avec I_1, I_h : valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h .

α_1, α_h : déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang h .

ω : pulsation fondamentale du réseau.

Le taux de distorsion harmonique de ce courant s'exprime sous la forme suivante:

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{X_h^2}{X_1^2}} \quad (I.3)$$

Pour étudier la déformation de la tension du réseau provoquée par le prélèvement de courants distordus, nous représentons la source d'énergie par une f.é.m. (e_s) à la fréquence fondamentale mise en série avec une impédance variable avec la fréquence comme le montre la figure I.1.

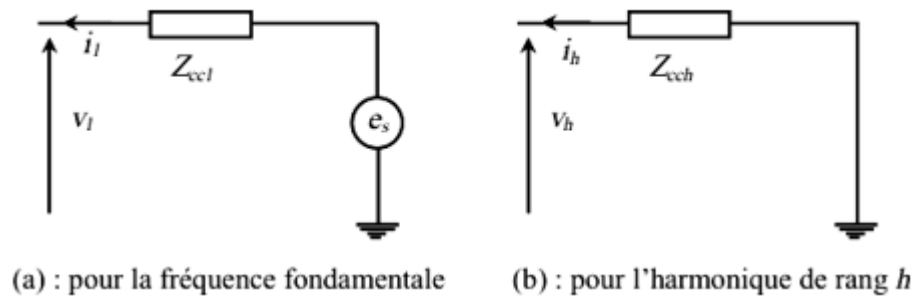


Fig I.5 : Schémas équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de raccordement

Sur ces schémas, les impédances représentent :

Z_{cc1} : Impédance de court-circuit de la source à la fréquence fondamentale,

Z_{cch} : Impédance de court-circuit de la source à la fréquence du rang h .

La tension au point de raccordement, $v(t)$, est composée de la somme ci-dessous :

$$v(t) = v_1(t) + \sum_{h=2}^n v_h(t) \quad (I.4)$$

Avec :

$$\begin{aligned} v_1(t) &= e(t) - |Z_{cc1}| \cdot I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha_1 + \phi_{cc1}) \\ v_h(t) &= -|Z_{cch}| \cdot I_h \sqrt{2} \sin(h\omega t + \alpha_h + \phi_{cch}) \end{aligned} \quad (I.5)$$

Où :

$|Z_{cc1}|, |Z_{cch}|$ représente le module de Z_{cc1} et Z_{cch} respectivement.

ϕ_{cc1}, ϕ_{cch} représente l'argument de Z_{cc1} et Z_{cch} respectivement.

De l'équation (1.4), on constate que la tension du réseau n'est plus sinusoïdale et est déformée par les courants harmoniques par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit. Pour la rendre sinusoïdale deux solutions sont possibles : modification de l'impédance du réseau ou annuler les harmoniques de courant [2].

Le taux de distorsion harmonique en tension est un paramètre qui sert à évaluer la déformation de la tension et s'exprime sous la forme suivante :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{V_1^2}} \quad (1.6)$$

Il est possible aussi de caractériser les harmoniques par leur participation dans la puissance apparente. Nous utilisons alors la notion de puissance déformante "D". Dans le cas d'un réseau équilibré à m phases, la puissance apparente S , la puissance active P et la puissance réactive q sont données par les relations suivantes :

$$S = m \sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} = m V_{eff} \cdot I_{eff} \quad (1.7)$$

$$P = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\phi_h) \quad (1.8)$$

$$q = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \sin(\phi_h) \quad (1.9)$$

A son tour la puissance déformante caractérisant la contribution des harmoniques est définie par la formule suivante :

$$D = m V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} \quad (1.10)$$

Finalement, le facteur de puissance s'exprime comme suit:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2}} \quad (1.11)$$

On constate que le facteur de puissance est dégradé par la présence des harmoniques.

Dans le cas d'un système triphasé alimentant une charge non linéaire équilibrée (cas du redresseur à diodes), les fondamentaux des courants absorbés composent un système direct (c'est-à-dire de même séquence que les tensions du réseau), les harmoniques multiples de 3 composent un système homopolaire (ils sont en phase), l'harmonique 5 est un système inverse (la séquence des phases est inverse par rapport à celle du réseau), l'harmonique 7 un système direct,...etc.[13].

I.5 Solutions possibles pour réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie:

Afin de compenser les perturbations du courant, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne existent.

I.5.1 Solutions traditionnelles de dépollution:

Les moyens de dépollution traditionnels sont nombreux et se résument dans les points suivants :

- inductance anti-harmonique de protection des condensateurs.
- inductance de lissage des courants.
- confinement des harmoniques.
- l'utilisation de transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la circulation des courants harmoniques.
- augmentation de l'indice de modulation.
- filtres passifs utilisant des éléments réactifs en l'occurrence des inductances et des condensateurs.

I.5.2 Les Solutions modernes :

Les filtres actifs et les redresseurs MLI sont des technologies modernes pour le nettoyage des réseaux électriques qui fournissent aux clients une énergie électrique d'excellente qualité, même dans les situations de fonctionnement les plus perturbées.

En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

I.5.2.1 Filtre actif parallèle :

Le filtre actif parallèle (Voire figure I.6) est composé d'un onduleur connecté au réseau par

l'intermédiaire d'un filtre passif LR . Il se connecte en parallèle avec le réseau triphasé et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal. Ces filtres actifs shunt présentent des avantages et des inconvénients par rapport aux filtres passifs[14][2].

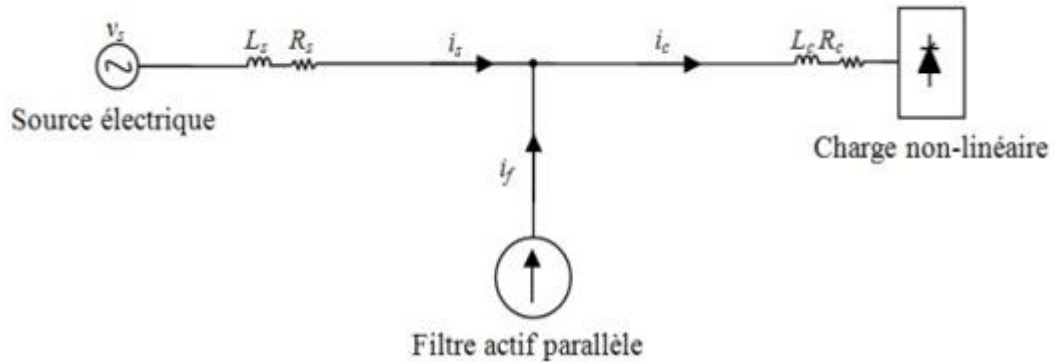


Figure 1.6 - Principe du filtrage actif parallèle

Il existe trois variantes différentes du filtre actif parallèle avec structure de tension.

a. Filtre monophasé :

Un onduleur monophasé, une capacité de source de tension continue et une inductance reliant l'onduleur au réseau (source de courant). Un transformateur et une capacité C' sont ajoutés dans le deuxième arrangement (Figure 1.8.b). Le primaire du transformateur est alimenté par l'onduleur, et le secondaire est relié en série avec C' , formant un filtre de courant de charge passive avec cette capacité et le secondaire [2].

Deux différentes configurations du filtre actif parallèle monophasé sont présentées par la figure 1.7

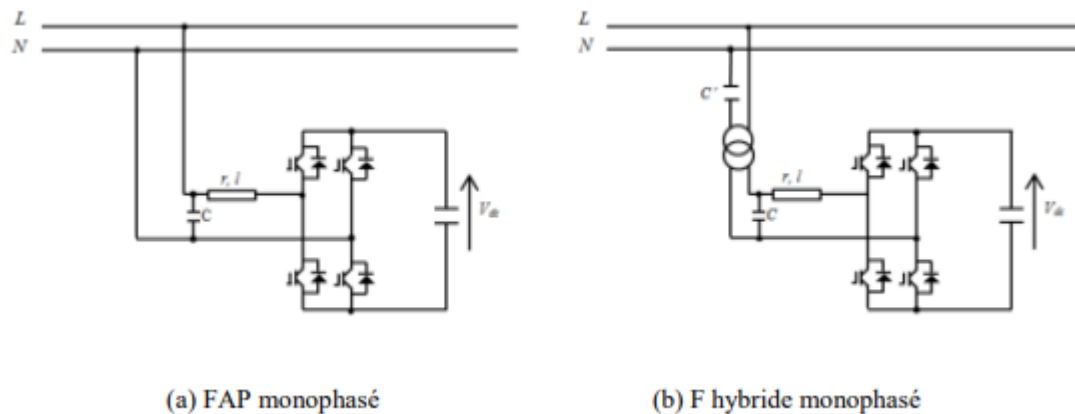


Figure 1.7- Différentes configurations d'un filtre actif monophasé

b. Filtre actif parallèle à trois fils :

Il est composé d'un onduleur à trois bras avec une inductance de couplage qui le relie au réseau triphasé en parallèle. Il injecte les composants harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires du réseau en temps réel. En conséquence, le courant de la source d'énergie devient sinusoïdal [4][2].

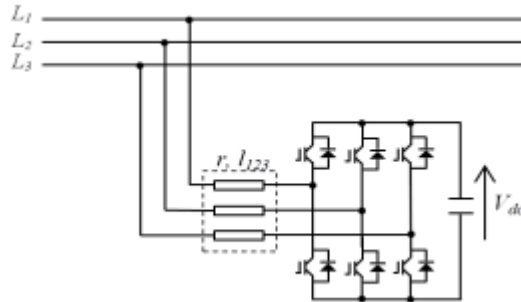


Figure I.8 - Configuration d'un FAP à trois fils.

c. Filtre actif parallèle à quatre fils:

Un système triphasé avec neutre peut alimenter un grand nombre de charges monophasées. Ils peuvent entraîner un courant harmonique excessif dans le neutre, ainsi qu'une surcharge et un déséquilibre dus à la consommation d'énergie réactive. Des compensateurs à quatre fils ont été créés dans les références [15][2] pour atténuer ces problèmes. Le chapitre suivant passera en revue les topologies de ce type de filtre.

I.6 Comparaison entre les filtres passifs et les filtres actifs :

Le tableau suivant donne une comparaison entre les filtres actifs et les filtres passifs selon plusieurs critères:

Tableau I.1 - Caractéristiques des filtres actifs et passifs.

Critère de comparaison	Filtre passif	Filtre actif d'harmoniques
Action sur les courants harmoniques	- Nécessite un filtre pour chaque fréquence - pas d'adaptabilité - risque de résonance	- Agit simultanément sur plusieurs fréquences - Adaptabilité - amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente
Influence de la variation de fréquence	- Efficacité réduite	- Aucune conséquence
Influence de la modification de l'impédance	- Risqué de résonance	- Aucune conséquence
Influence de l'augmentation de courant	- Risque de surcharge et de détérioration	- Aucun risque de surcharge, mais efficacité diminué
Augmentation de la charge	- Nécessite des modifications sur le	- Aucun problème si $I_f < I_h$
Action sur les harmoniques	- Suivant le nombre d'ordres	- possible, grâce au paramétrage
Modification de la fréquence fondamentale	- Modification impossible	- Possible, grâce à la reconfiguration
Encombrement	- Important	- Faible
Poids	- Important	- Faible
Performance	- Pauvre	- Bonne
Fiabilité	- Pauvre	- Pauvre
Coût	- Réduit	- Elevé
Pertes	- Réduites	- Elevées

I.7 Conclusion :

Nous avons couvert une variété d'actifs et d'options de traitement pour les perturbations actuelles du réseau électrique dans ce chapitre.

En raison du risque de défauts, ces perturbations sont dangereuses pour les équipements électriques. En conséquence, pour des raisons technologiques et économiques, leur rémunération est très souhaitable. Nous nous sommes intéressés à un certain nombre d'options contemporaines, y compris le concurrent actif parallèle à trois fils qui serait au centre de ce mémoire.

CHAPITRE II

Structure et Commande du Filtre Actif Parallèle

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre on décrit en détail les différents constituants de ce filtre qui sont nécessaires pour le développement de cette thèse.

Le filtre actif à trois fils se compose de plusieurs parties.

Le motif général de ce filtre est affiché en parallèle avec le réseau électrique qui alimente une charge triphasée à quatre fils. Les deux parties principales de ce candidat sont:

- Partie puissance,
- Partie commande

II .2 Principe du filtre actif parallèle:

Le compensateur actif est connecté en parallèle avec le réseau, et injecte en permanence de courants qui correspondent à tout moment aux composantes harmoniques des courants absorbés par la charge. De cette manière, le courant fourni par la source d'énergie reste sinusoïdal [13].

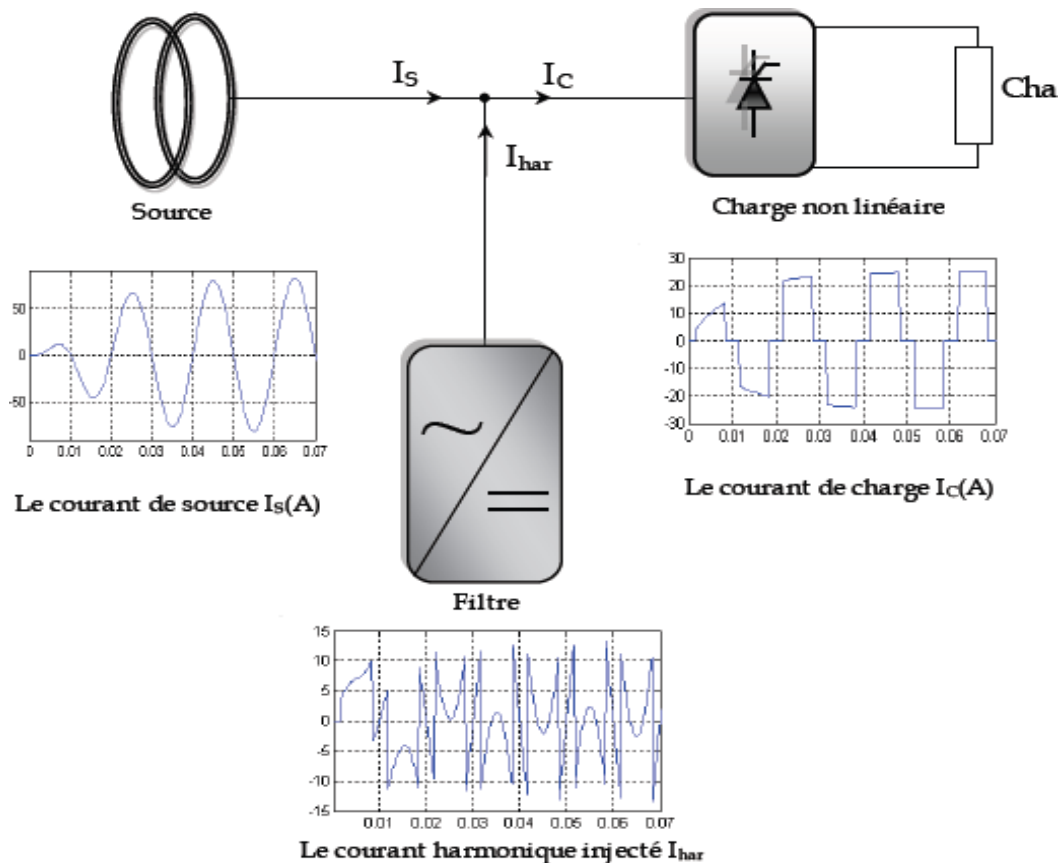


Fig II.1 : Principe du filtrage actif parallèle

II.3 Structure d'un filtre actif parallèle:

II.3.1 Topologie générale:

En général, le FAP est utilisé pour la dépollution des réseaux basse tension (BT) et moyenne tension (MT). Il est constitué de deux parties principales, la partie puissance et la partie contrôle-commande.

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, souvent capacitif,
- d'un filtre de sortie.

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- de la méthode d'identification des courants perturbés,
- 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 [16].

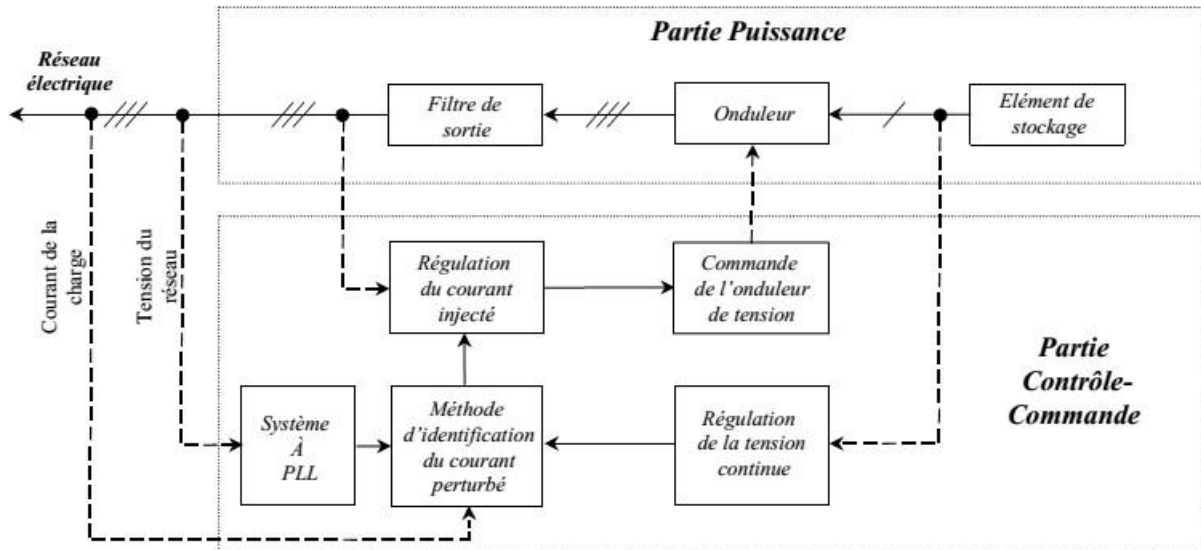


Fig II.2 : structure générale d'un filtre actif parallèle

II.3.2-Etude de la partie puissance:

II.3.2.1-Onduleur de tension

II.3.2.1.1-Structure générale

La Fig. II.3 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f) employé pour reconnecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

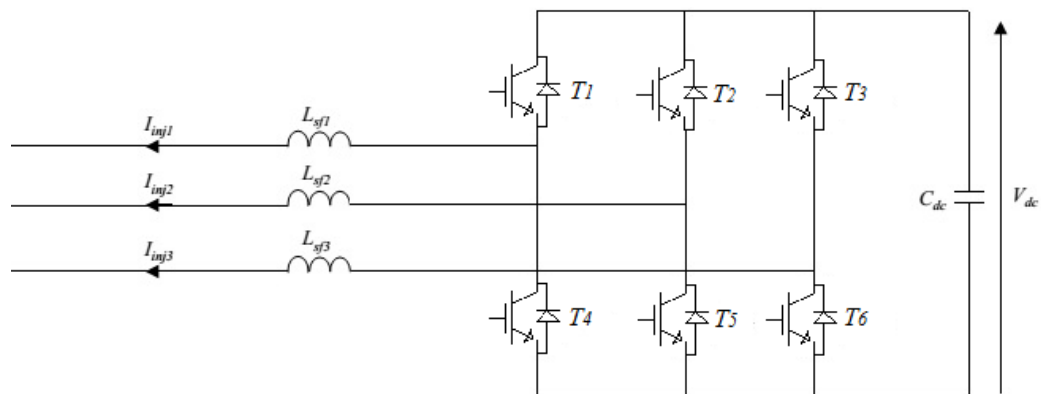


Fig II.3 : Onduleur de tension triphasé

La topologie du filtre actif parallèle empêche la fermeture simultanée des semi-conducteurs dans le même bras, ce qui court-circuiterait le condensateur de stockage. Ils peuvent, en revanche, être ouverts tous les deux (pendant un délai d'attente). La continuité des courants est alors assurée par la conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, nous contrôlons les deux semi-conducteurs sur le même bras de manière complémentaire, l'un conduisant et l'autre bloquant. En réalité, le mode de fermeture des deux semi-conducteurs dans le même bras n'existe que pendant la commutation.

Pour éviter un court-circuit causé par les temps de verrouillage des interrupteurs, une période d'attente, communément appelée temps mort, entre la commande de verrouillage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre doit être insérée sur le même bras. Ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en considération avec l'hypothèse des commutateurs instantanés, il n'y a donc aucune chance de court-circuiter le condensateur [16].

II.3.2.1.2-Tension fournie par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Fig. II.3 dépendent de l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3), comme défini ci-dessous :

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

II.3.2.1.3-Représentation vectorielle

Dans le plan biphasé (α, β), en considérant V le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur V sont donnés par la Fig. II.3

$N^\circ \text{ du cas}$	S_3	S_2	S_1	V_β	V_α	V_{fl}
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
4	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

Tab. II.1 : Tensions générées par l'onduleur

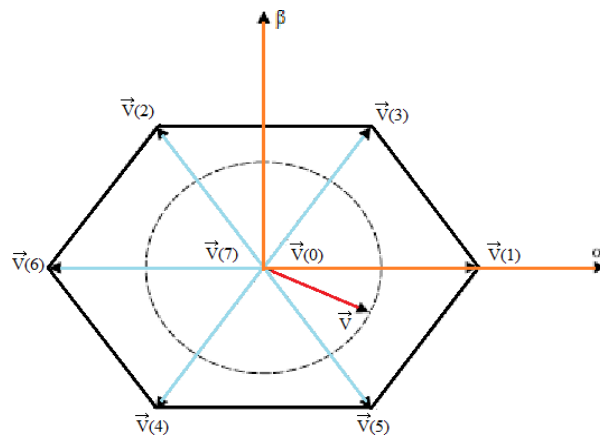


Fig II.4 Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

Où V est la tension de référence requise par l'onduleur pour générer les courants perturbateurs indiqués. Cela signifie que l'onduleur ne peut fournir que des tensions équivalentes aux tensions de

référence à condition que le vecteur de cette dernière reste à l'intérieur de l'hexagone illustré à la Fig. II.4 [16].

II.3.2.1.4-Système de stockage d'énergie

L'utilisation des batteries de condensateurs est effective dans les petites et moyennes puissances. Dans le cas des grandes puissances on utilise des bobines supraconductrices [17].

Le choix de la tension V_{dc} et de la capacité de condensateur C_{dc} affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. 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 [17] :

Le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de garez), est la base de la première méthode. On choisit un taux d'ondulation ΔV_{dc} acceptable, généralement de l'ordre de 2% V_{dc} . On peut calculer C_{dc} à partir de la relation suivante:

$$C_{dc} = \frac{V_s \cdot \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \cdot \Delta V_{dc} \omega_{dc}^2} \quad (II.1)$$

Avec V_s : la tension simple du réseau. I_h : le courant harmonique du rang h et α l'angle d'allumage des thyristors du pont de garez, zéro dans le cas d'un redresseur à diodes. On choisit la tension V_{dc} comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs la valeur minimale de la tension V_{dc} est deux fois plus grande que la max de tension simple du réseau pour assurer la contrôlabilité du courant du filtre de sortie en tous temps [17].

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

$$C_{dc} = \frac{I_h}{V_{dc} \Delta V_{dc} \omega_h} \quad (II.2)$$

Avec : ω_h , la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

II.3.2.1.5-Filtre de couplage

Le filtre de couplage est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau

électrique. Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivant :

- Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{dI_f}{dt} = \frac{dI_h}{dt} \quad (\text{II.3})$$

Avec : I_h le courant harmonique de la charge

I_f le courant du filtre actif

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

Un filtre de premier ordre est utilisé pour répondre à ces deux critères, composé d'une inductance L_f et d'une résistance interne R_f , avec une quantité modeste de cette inductance assurant la dynamique du courant. Une très grande partie de celui-ci, d'autre part, empêche les composants causés par les commutateurs de se propager sur le réseau. Nous obtenons ce résultat en ignorant la résistance du filtre de couplage [16]:

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{\max} = \frac{V_{f\max} - V_{s\max}}{L_f} \quad (\text{II.4})$$

Avec

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

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

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

$$\left(\frac{\Delta i_f}{\Delta T}\right)_{\max} = \frac{V_{f\max} - V_{s\max}}{L_f} \quad (\text{II.5})$$

Avec $\Delta T = \frac{1}{f_{ond}}$: La période de variation du courant du filtre

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale 25 % de valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par [4] :

$$L_f = \frac{V_{f\max} - V_{s\max}}{0.25 I_{s\max} f_{and}} \quad (\text{II.6})$$

II.3.3-Étude de la partie commande-contrôle

L'approche de contrôle majeur est basée sur la méthode des courants perturbateurs. L'approche la plus appropriée pour le filtre actif parallèle installé par le client pour compenser les courants perturbateurs créés par ses charges polluantes est « l'identification des harmoniques à partir de la mesure des courants de charge » [18]. Cette approche extrait les courants harmoniques en détectant les courants de charge qui circulent en aval du point de connexion.

La régulation de la tension continue, le contrôle de l'onduleur de tension, la régulation du courant injecté dans le réseau électrique et la technique de reconnaissance des courants perturbés sont les trois aspects clés de la section de contrôle du FAP.

II.3.3.1-La méthode d'identification des courants perturbés

Pour que le courant du réseau soit sinusoïdal, des courants harmoniques de la même amplitude que les courants perturbés mais dans la phase opposée doivent être générés. Pour ce faire, nous devons d'abord déterminer les courants harmoniques de la charge.

Les nombreuses méthodes de détection du courant perturbateur peuvent être divisées en deux catégories :

II.3.3.1.1-Les méthodes utilisées dans le domaine fréquentiel

Pour extraire les harmoniques du courant, cette famille utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel. Cette approche fonctionne efficacement pour les charges avec un changement progressif du contenu harmonique. Il a également l'avantage de vous permettre de choisir les harmoniques que vous souhaitez corriger. Il convient de souligner que cette stratégie nécessite une puissance de calcul importante. Toutes les modifications nécessaires à l'extraction des harmoniques sont effectuées en temps réel [19]. [20]

II.3.3.1.2-Les méthodes utilisées dans le domaine temporel

Le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel est le fondement de la famille. Certaines de ces approches reposent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres, basés sur la déduction de l'élément fondamental actif du courant total [21], peuvent être utilisés pour ajuster à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive.

De nouvelles approches d'identification ont récemment été publiées qui permettent de compenser une, plusieurs, voire toutes les formes de courants perturbateurs. En effet, en contrôlant la tension les courants perturbateurs tout en permettant de réguler la tension de charge. Cette approche, qui ne peut être effectuée que numériquement, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive, tout comme le contrôle de la tension ne garantit pas toujours une bonne qualité de tension de charge [22].

Enfin, l'approche des puissances réelles et imaginaires instantanées est le moyen d'identification le plus largement utilisé. Cette approche présente les avantages de la précision, de la rapidité et de la facilité d'application dans le choix de la perturbation à compenser. Pour ces raisons, nous avons décidé d'utiliser cette méthode d'identification pour le reste de ce mémoire.

- **Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées**

La mesure de variables instantanées triphasées existant sur le réseau électrique, avec ou sans composants homopolaires, est à la base de cette approche. Cette approche est applicable à la fois dans les situations d'équilibre et de transition. [23]

Les mesures des tensions et des courants exprimés sous forme triphasée ($a-b-c$) sont converties en

système biphasé ($\alpha \beta$) équivalent à l'aide de la transformée de Concordia qui laisse la puissance invariante :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

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

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{II.9})$$

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

$$p(t) = V_{s1}I_{s1} + V_{s2}I_{s2} + V_{s3}I_{s3} = p(t) + p_0(t) \quad (\text{II.10})$$

On peut écrire dans le repère stationnaire par:

$$p(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \quad (\text{II.11})$$

De la même manière la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante:

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{s1} - V_{s2})I_{s3} + (V_{s2} - V_{s3})I_{s1} + (V_{s3} - V_{s1})I_{s2}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (\text{II.12})$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le voltampère imaginaire (VAI). A partir des relations (II.10) et (II.12), nous pouvons établir la relation matricielle suivante [16]:

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

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

$$\begin{cases} \bar{p} = \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

avec :

$\bar{p}$ une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension,

$\bar{q}$ une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension,

$\tilde{p}$ et $\tilde{q}$ des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

En inversant la relation (II.13), nous pouvons recalculer les courants dans le repère $\alpha\beta$ comme le montre l'équation :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

En considérant les équations (II.14) et (II.15), nous pouvons séparer le courant dans le repère en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Avec } \Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$$

Il est évident que pour pouvoir calculer les trois composantes du courant indépendamment les unes des autres, il faut tout d'abord pouvoir isoler les puissances active et réactive $(\bar{p}, \bar{q})$ liées respectivement à la composante fondamentale du courant active et réactive [16].

Avec un filtre de puissance, pour isoler ces puissances, il faut connaître avec précision les fréquences de leurs pulsations, pour pouvoir dimensionner ce filtre qui peut remplir cette fonction. On peut utiliser un circuit constitué soit d'un filtre passe bas ou d'un filtre multi-variable.

- ✓ Cas d'un filtre passe bas fig.II.5 (a) (ou un filtre passe haut fig.II.5 (b)) avec soustracteur comme le représente la figure II.8 :

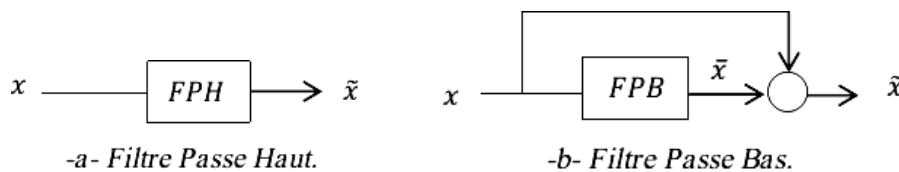


Fig II5 : Schéma du filtre de puissance utilisé pour l'extraction des composantes fondamentales $(\bar{p}, \bar{q})$

Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du premier ordre. En effet, un ordre plus élevé entraînerait des temps de calcul plus longs. La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre [16]:

$$\frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (\text{II.17})$$

La fréquence de coupure, $f_c = \omega_c / 2\pi$, est choisie pour que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées $(\tilde{p}, \tilde{q})$. Elle doit aussi permettre aussi le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale $(\bar{p}, \bar{q})$ [16].

Une fois les valeurs $\bar{p}, \bar{q}, \tilde{p}$ et $\tilde{q}$, il devient aisé de calculer les courants réactifs et les courants harmoniques à partir de l'équation (II.12) ;

Donc le courant de référence harmonique est donné par [16] :

$$\begin{bmatrix} I_{h1} \\ I_{h2} \\ I_{h3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

La méthode que nous avons explicitée si dessus, peut être résumée par le schéma suivant qui illustre les différentes étapes qui nous permettent d'obtenir les valeurs des courants de références.

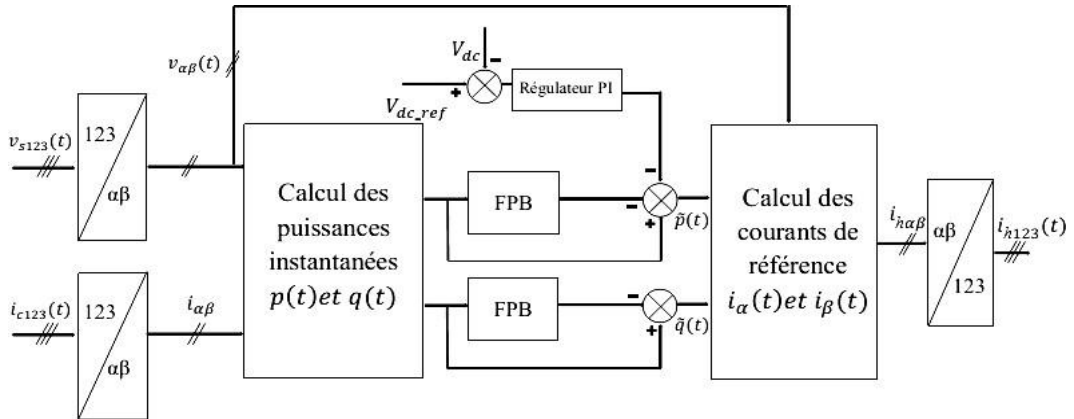


Fig II.6 : Algorithme de la méthode des puissances instantanées pour l'extraction des courant harmoniques

✓ Cas d'un filtre multi-variable (FMV): Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scom [24]. Il est basé directement sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, suivant les axes α - β (Figure II.7).

La réponse dynamique du filtre est lente, comme décrit précédemment pour l'extraction des harmoniques. Si une fréquence de couplage plus élevée est choisie, la précision de la détermination des composants alternatifs est réduite et elle peut sembler insuffisante.

Le filtre FMV vous permet de contourner cette restriction. En conséquence, il est possible de filtrer efficacement les composants harmoniques tout en améliorant les performances de filtrage [25][26][14].

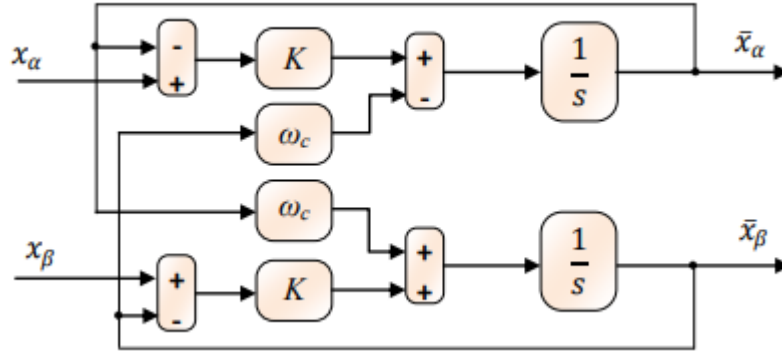


Figure II.7 Filtre multi-variable

Suivant les axes α - β , les expressions liant les composantes $\bar{x}_\alpha$ et $\bar{x}_\beta$ du filtre FMV aux composantes d'entrée x_α et x_β sont les suivantes :

$$\bar{x}_\alpha(s) = \frac{K}{s} \left[x_\alpha(s) - \bar{x}_\alpha(s) \right] - \frac{\omega_c}{s} \bar{x}_\beta(s) \quad (\text{II.19})$$

$$\bar{x}_\beta(s) = \frac{K}{s} \left[x_\beta(s) - \bar{x}_\beta(s) \right] + \frac{\omega_c}{s} \bar{x}_\alpha(s) \quad (\text{II.20})$$

L'application de ce filtre pour extraire les courants harmoniques d'une charge non linéaire est donnée par la Figure II.11

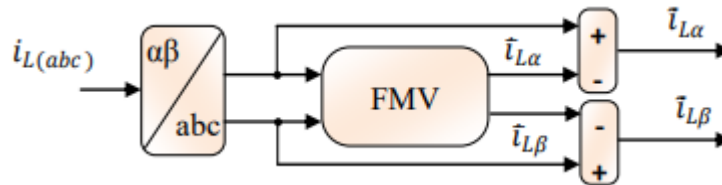


Figure II.8: Filtre multi-variable pour l'extraction des harmoniques dans la méthode des puissances instantanées

II.3.3.2-Régulation de la tension continue

La source d'alimentation du filtre est une capacité qui se charge et se décharge plutôt qu'une source de tension autonome. En raison de sa sensibilité au flux de puissance active entre le charbon polluant et le réseau, la tension aux bornes de ce dernier n'est pas constante. Les pertes dans les composants d'alimentation entraînent une fluctuation de la tension aux bornes de la capacité, ce qui nécessite de réguler cette tension pour la maintenir constante.

Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont [27]:

- Les pertes dans le filtre actif.

- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.
- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.
- Les pertes par effet Joule dans les composants passifs L et C.

Une régulation de cette tension est nécessaire pour assurer le rôle de la source de tension CC. Un régulateur PI peut être utilisé pour cela. La relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut être énoncée de la manière suivante [27] si l'on ignore les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie.

$$p_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.21})$$

Appliquons la transformation de Laplace sur cette relation, nous obtenons :

$$p_{dc}(s) = \frac{1}{2} s C_{dc} V_{dc}^2(s) \quad (\text{II.22})$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2(s) = \frac{2p_{dc}(s)}{C_{dc}s} \quad (\text{II.23})$$

A partir de la relation (II.23), et en tenant compte du régulateur PI, la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure II.9. Le choix des paramètres K_{pdc} et K_{idc} aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire la dynamique du filtre actif.

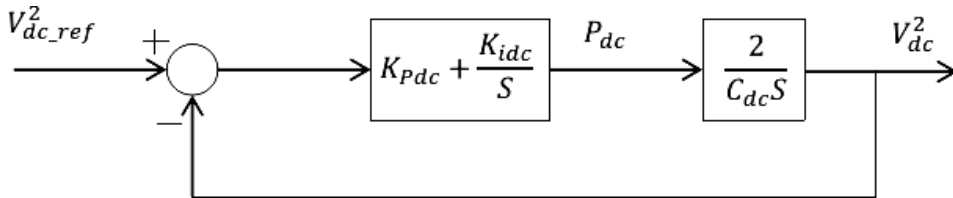


Fig. II.9 : Boucle de régulation de la tension continue

A partir de la figure II.9, la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{bf} = \frac{\left(1 + \frac{K_{pdc}}{K_{idc}} s \right)}{s^2 + 2 \frac{K_{pdc}}{C_{dc}} s + 2 \frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \quad (\text{II. 24})$$

Comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre, on trouve [27] :

$$K_{idc} = \frac{1}{2} C_{dc} \omega_c^2 \text{ tel que } \omega_c = 2\pi f_c \quad (\text{II. 25})$$

Et

$$K_{pdc} = \xi \sqrt{2C_{dc}K_{idc}} \quad (\text{II. 26})$$

II.3.3.3-Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande de l'onduleur est de déterminer les moments d'ouverture et de fermeture des commutateurs qui composent l'onduleur afin d'obtenir une tension de sortie côté alternatif qui suit le jeu de référence ou la tension (pas nécessairement sinusoïdale) aussi étroitement que possible en minimisant les harmoniques indésirables (harmoniques de commutation) et en optimisant l'amplitude pour une tension de bus continu donnée [28][29]. Le type de contrôle utilisé est principalement déterminé par deux facteurs: d'une part, les caractéristiques de tension de sortie requises (distorsion admissible, spectre de basses fréquences souhaitable, etc.) et, d'autre part, la fréquence de coupe des semi-conducteurs disponibles au niveau de puissance de l'application. Cependant, il existe deux méthodes de contrôle possibles :

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

II.3.3.4-Commande par hysirisis

En raison de sa simplicité et de sa robustesse, le contrôle traditionnel de l'hystérésis, qui sera utilisé dans cette étude, est largement utilisé. En fait, cette méthode assure un contrôle adéquat du courant sans nécessiter une compréhension complète du modèle ou des paramètres du système à réguler

La figure (II.10) illustre son fonctionnement de base, qui consiste à déterminer d'abord le signal d'erreur, qui est la différence entre le courant de référence I et le courant produit par l'onduleur i .

Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de corriger les ordres de contrôle des commutateurs.

Ce contrôle présente cependant un inconvénient important : il ne contrôle pas la fréquence de commutation des semi-conducteurs, ce qui entraîne la présence d'un grand nombre d'harmoniques dans les courants générés [15][6].

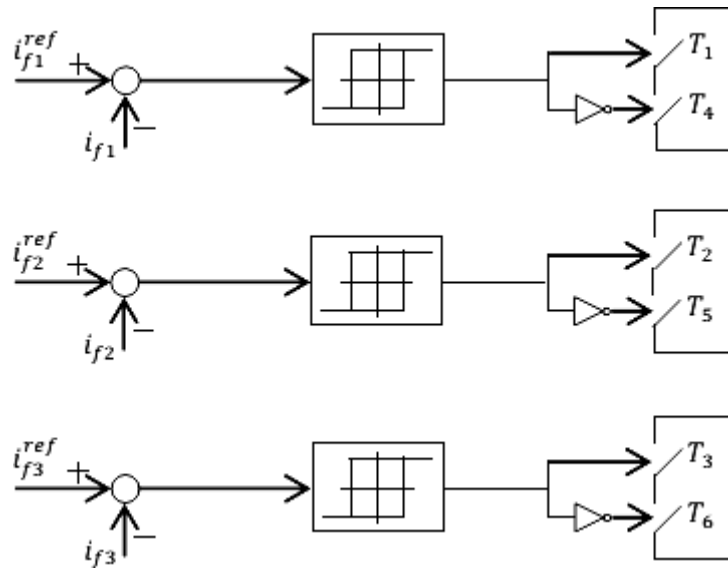


Fig II.10 Principe de la commande par hystérésis

I.4 Conclusion

La définition et la construction du filtre actif parallèle à trois fils ont été présentées dans ce chapitre, et cette structure comporte deux parties: la partie puissance et la partie commande contrôle. Les critères qui ont conduit à la sélection de chaque élément des parties concernées ont été énoncés. En conséquence, nous avons pu déterminer les composants de la partie contrôle, tels que la méthode d'identification du courant harmonique, le contrôle de l'onduleur et la régulation de la tension du bus continu, ainsi que les éléments de la partie puissance, tels que l'onduleur, l'élément de stockage et le filtre de sortie.

CHAPITRE III

Simulations et Interprétations des Résultats

III.1-Introduction

Un système d'électronique de puissance est un ensemble de conversion d'énergie qui contient les organes suivants :

- Source énergie.
- Convertisseur statique.
- Charge réceptrice.
- Dispositif de commande du convertisseur.

Dans ce chapitre nous avons utilisé le simulink comme outil de simulation, le schéma de simulation qui représente, la charge non linéaire, l'onduleur, et bloc d'identification de courant harmonique.

III.2- Schéma de simulation:

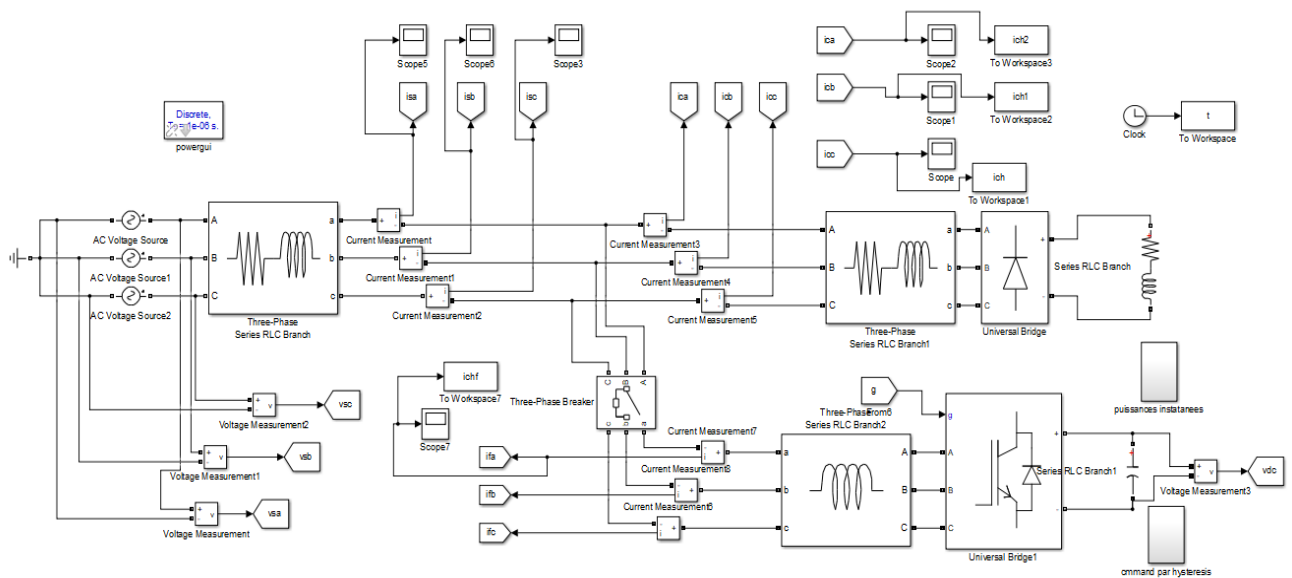


Figure III.1 – Schéma de FAP à trois fils-réseau-charge polluante sous Matlab- Simulink.

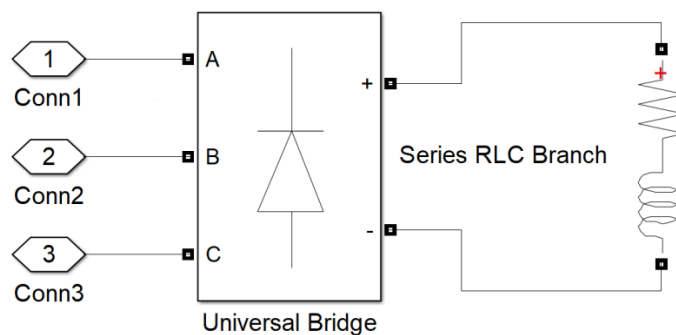


Fig III.2 : charge polluante

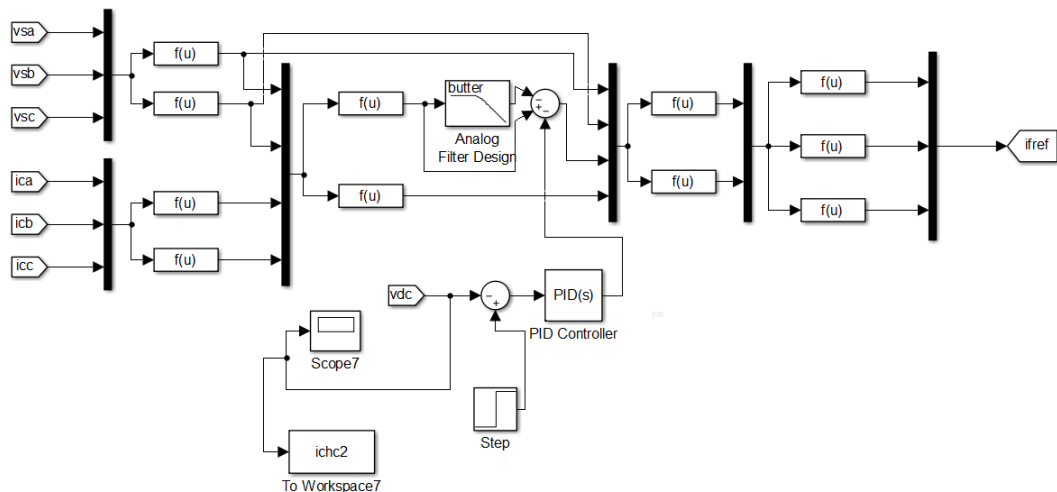


Figure III.3 – Identification par la méthode des puissances instantanées filtre passe-bas sous Matlab- Simulink

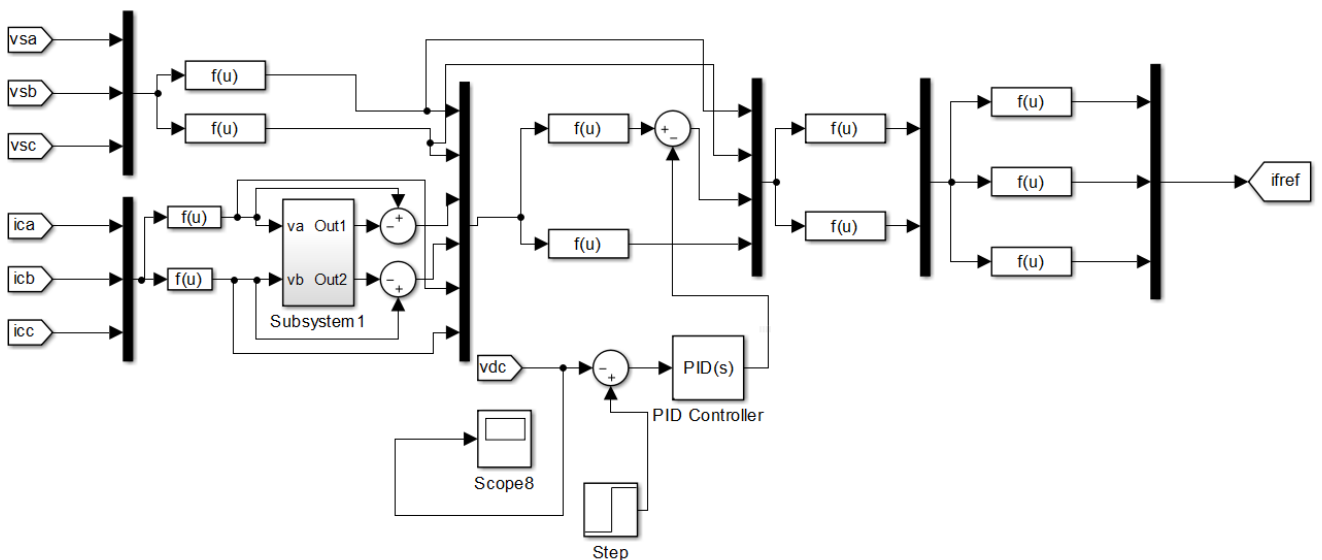


Figure III.4 – Identification par la méthode des puissances instantanées Filtre Multi-Variable sous Matlab- Simulink

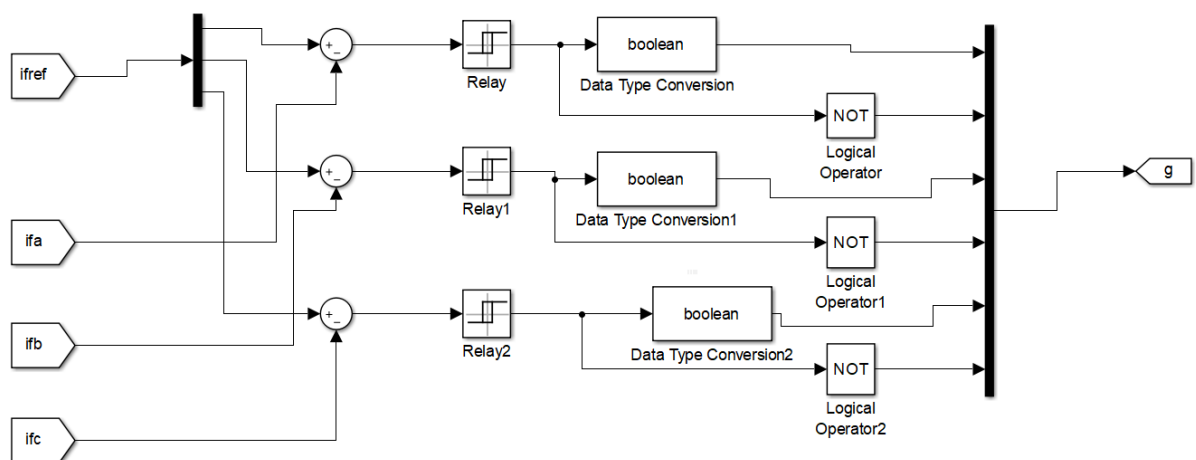


Figure III.5 – commande par hystérésis sous Matlab- Simulink

III.2.1-Paramètres de la simulation

Les paramètres du système simulé sont indiqués sur les tableaux (tab III.1) et (tabIII.2).

- Côté réseau et la charge

Vs(V)	F(Hz)	Rs(Ω)	Ls(mH)	Rl(Ω)	Ll(mH)	Rc(Ω)	Lc(mH)
220	50	0.42	2.3	0.001	1	30	90

Tab III.1 : paramètres des éléments du réseau

- Côté filtre

Lf(mH)	C(μ F)	V _{dc} (V)
3	1100	600

Tab III.2 : paramètres des éléments du filtre

III.2.2 Résultat de Simulation

III.2.2.1 avant le filtrage

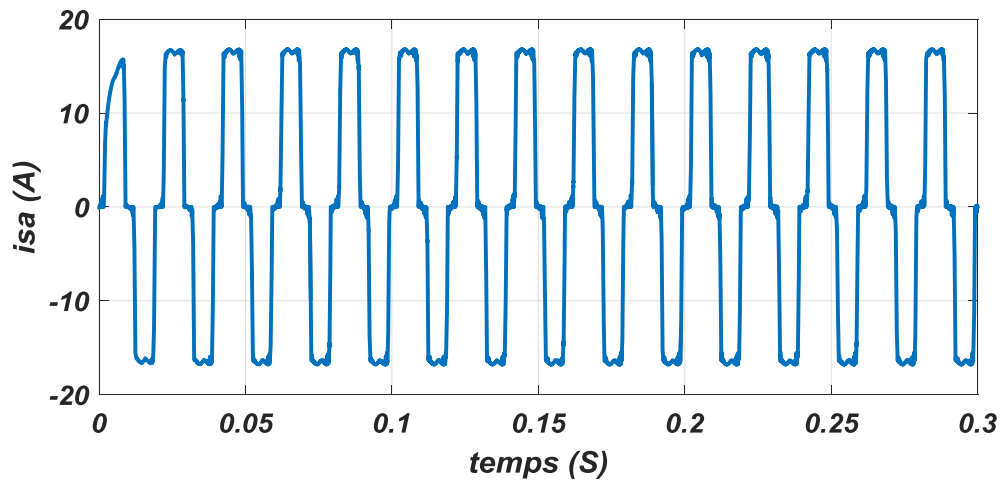


Fig III.6 Courants des trois phases du réseau électrique avant l'insertion du filtre

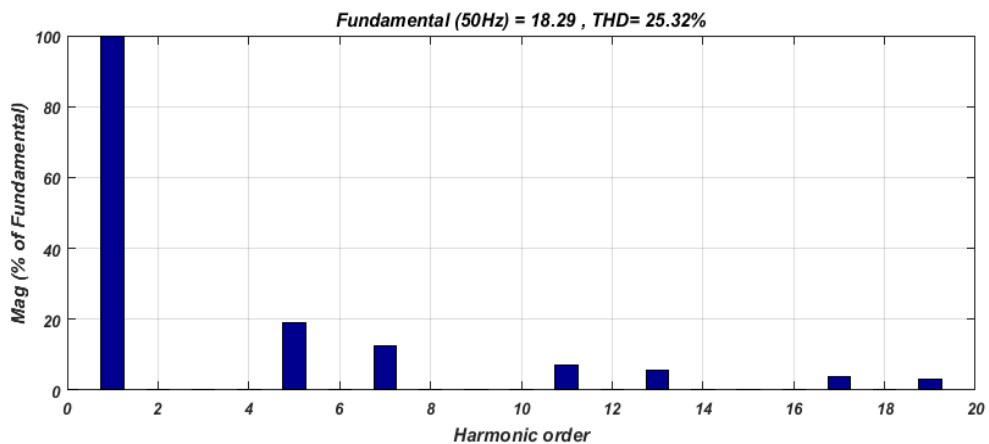


Fig III.7 : Spectre du courant de la source avant filtre.

La figure III.6 montre les courants de source (I_{sa} , I_{sb} et I_{sc}) avant de connecter le filtre où nous concluons que ces courants sont déformés.

.La figure (III.7) montre le taux de déformation avant que le filtre. Le taux de distorsion harmonique a été mesuré dans la période (0.16—0.18s)

Nous notons que, $THD = 25,32\%$ Très élevé et supérieur à 5%, le maximum autorisé par la norme IEEE est de 5%

III.2.2.2 après le filtrage

III.2.2.2.1 Méthode des puissances instantanées avec filtre passe-bas

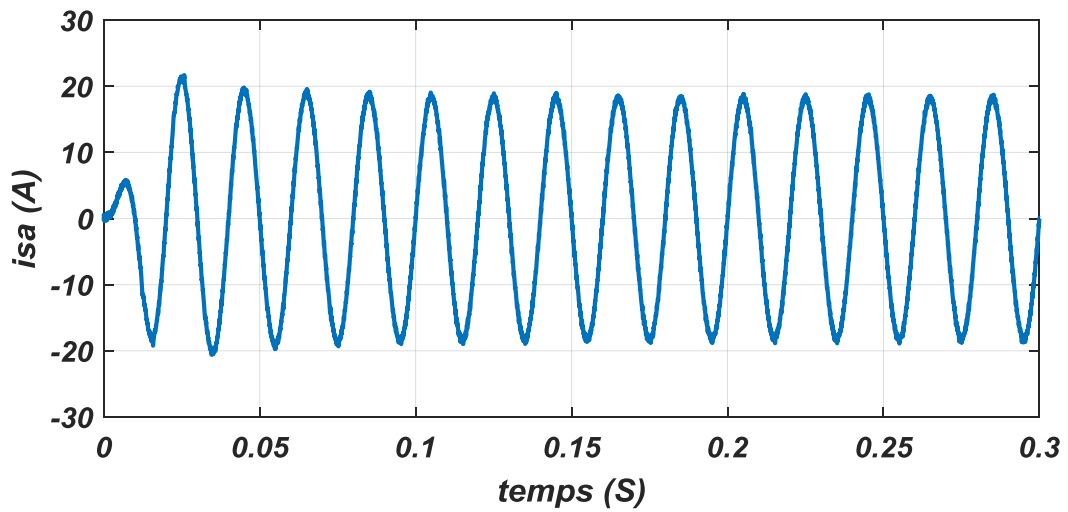


Fig III.8 Courants des trois phases du réseau électrique après l'injection du filtre

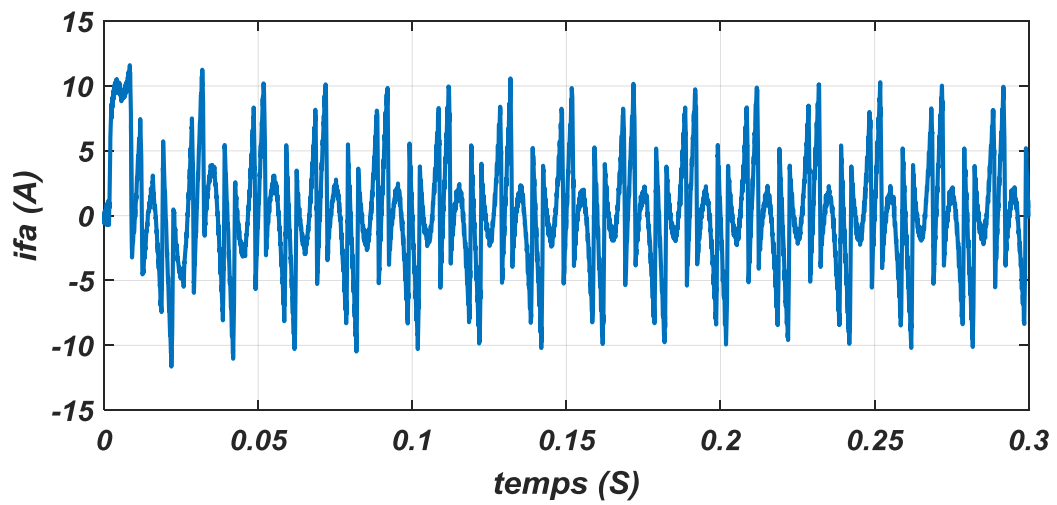


Fig III.9 Le courant injecté par le filtre

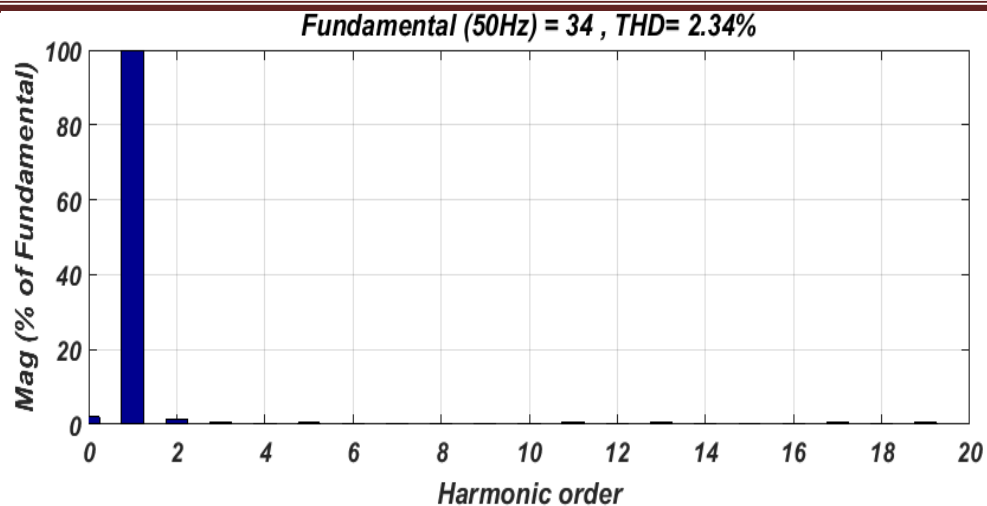


Fig III.10 : Spectre de courante source après filtrage

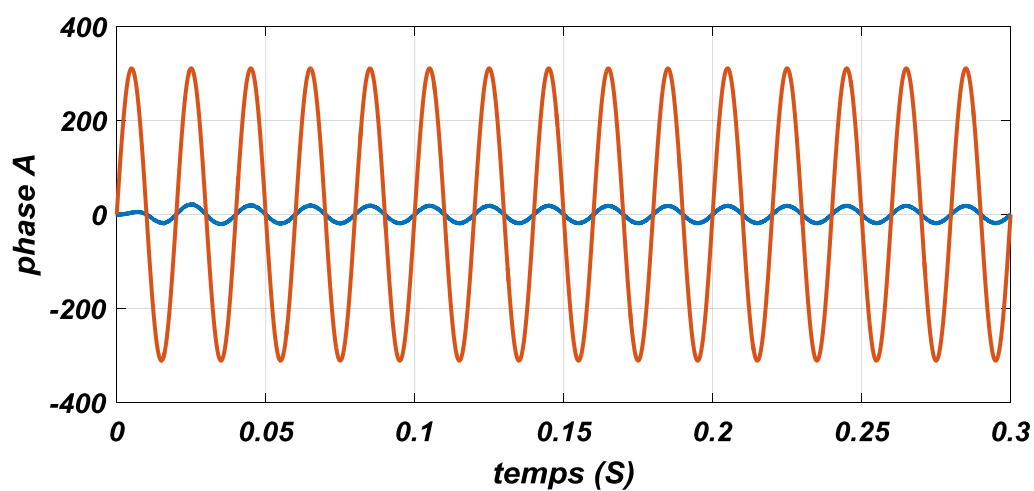


Fig III.11 Courants de source et tension de source

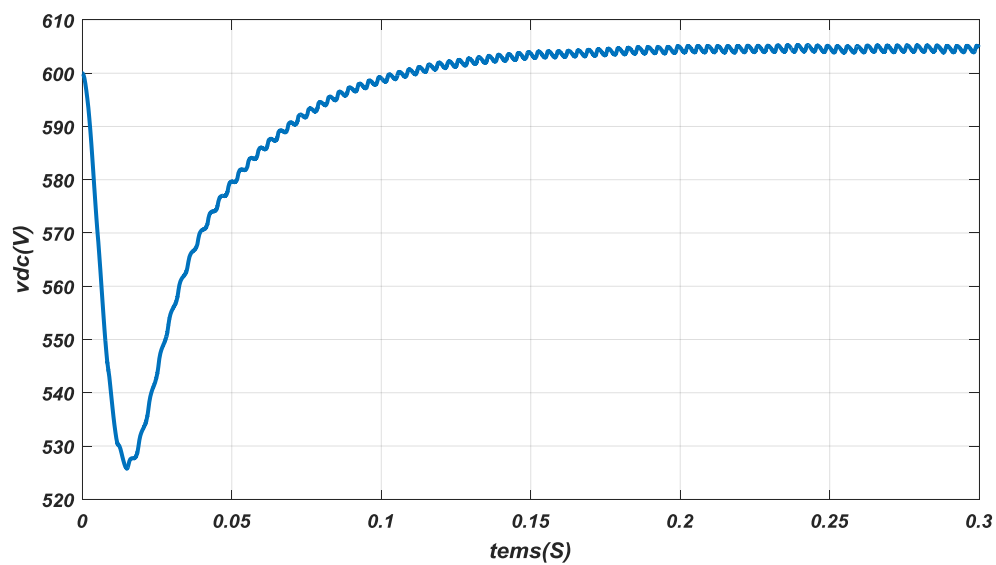


Fig III.12 La tension de la capacité

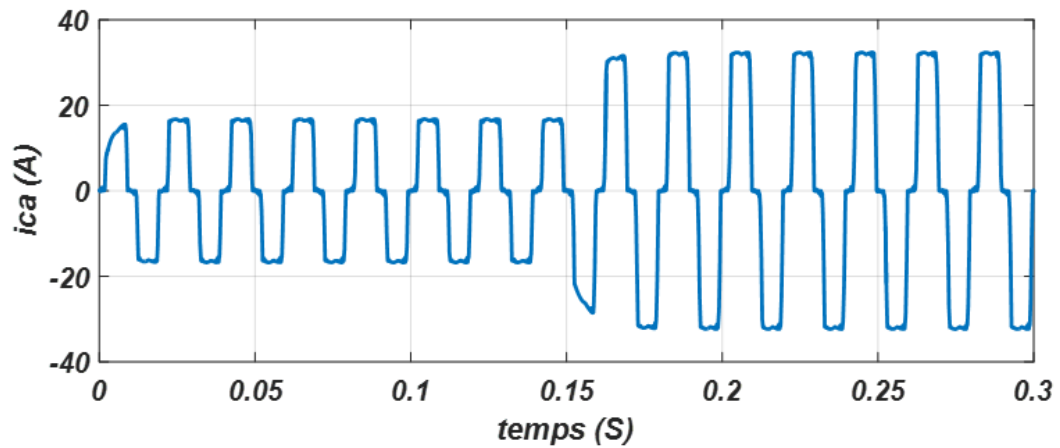


Fig III.13 Courants de la charge lors de la variation de charge

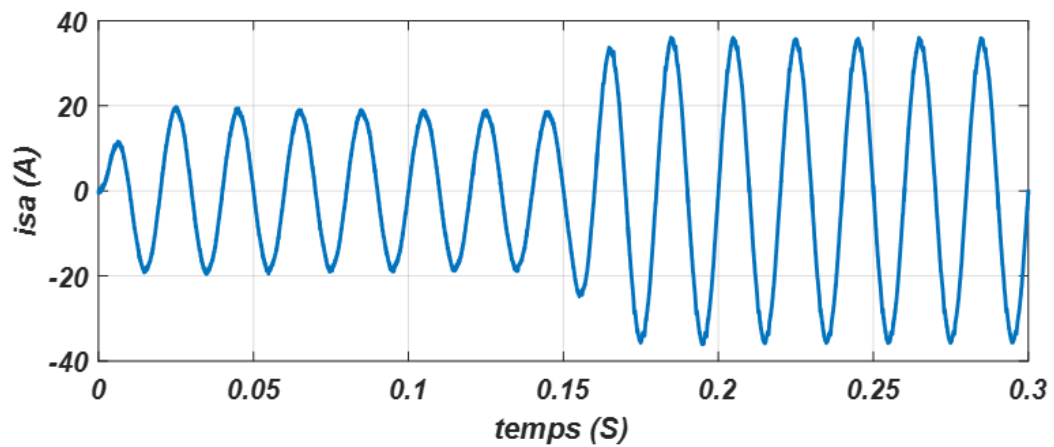


Fig III.14 Courants de la source lors de la variation de charge

Les formes (III.8) s'affichent : Une fois que le filtre actif est connecté et que les courants harmoniques sont injectés dans la grille, les courants de source devient sinusoïdaux.

Les courants de la figure (III.9) sont affichés. Ce sont les courants injectés par le filtre.

La figure (III.10) montre le taux de déformation harmonique après filtrage. Le taux de déformation harmonique a été mesuré, dans cette période nous notons $THD = 2.34\%$. Là où nous pouvons voir, il est très bas et inférieur à 5% , le maximum autorisé par la norme IEEE est de 5%

La figure (III.11) montre Courants de source et tension de source, nous remarquons que le courant et la tension sont en phase, c-à-d que le facteur de puissance est unitaire.

La figure (III.12) montre la tension de la capacité, il est régulé et maintenu constant. La figure (III.13) montre Courants de la charge lors de la variation de charge.

La figure (III.14) montre les courants de la source lors de la variation de charge où nous voyons malgré le changement grosse, mais le candidat n'a pas perdu sa capacité à filtrer.

III.2.2.2.2 Méthode des puissances instantanées avec

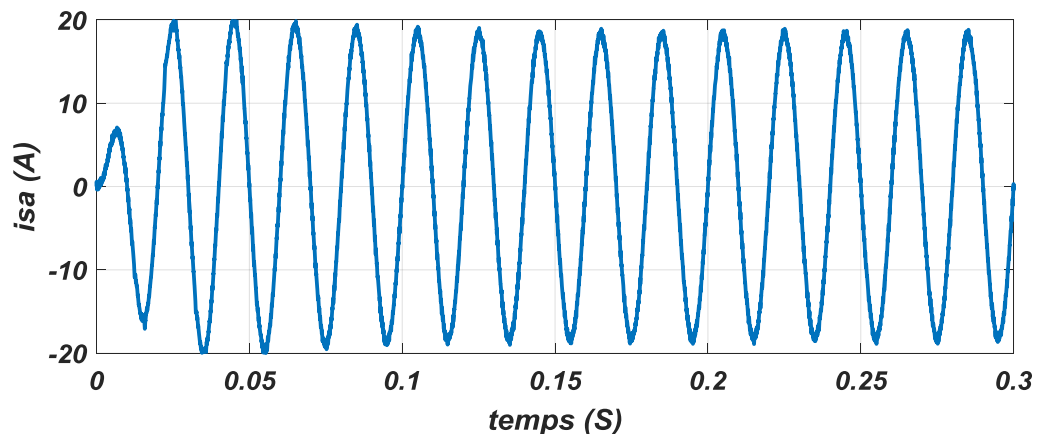


Fig III.15 Courants des trois phases du réseau électrique après l'injection du filtre

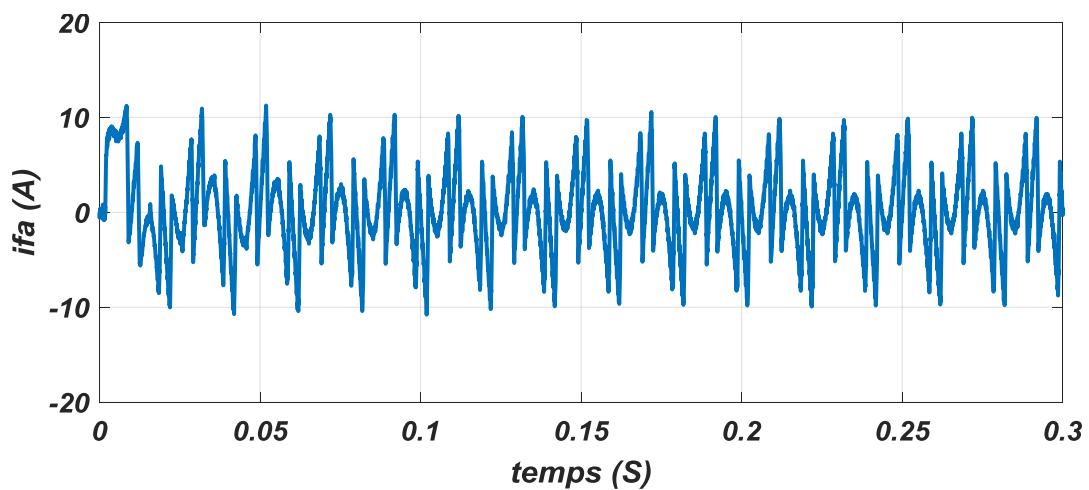


Fig III.16 Le courant injecté par le filtre

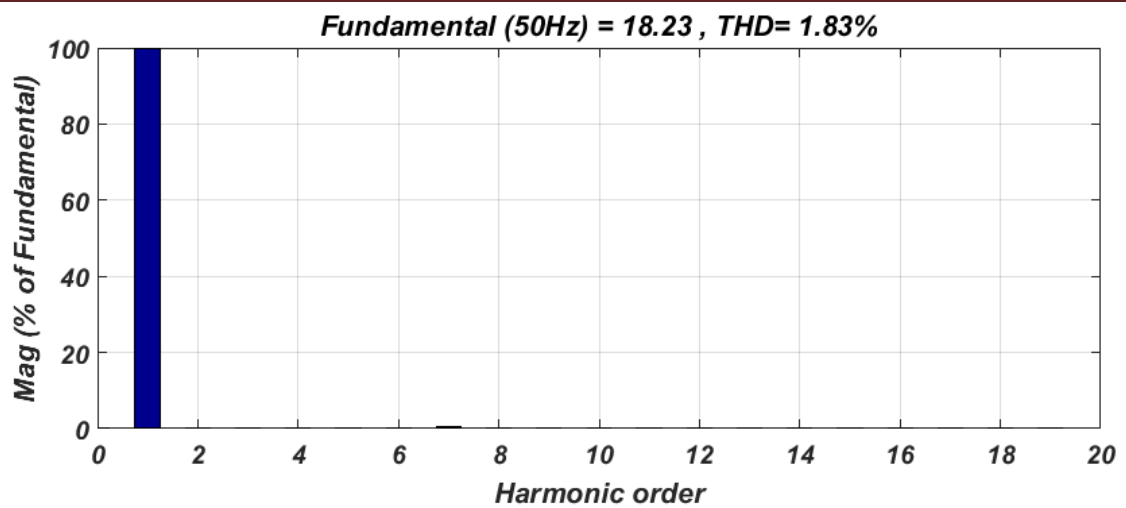


Fig III.17 : Spectre de la courante source après filtre

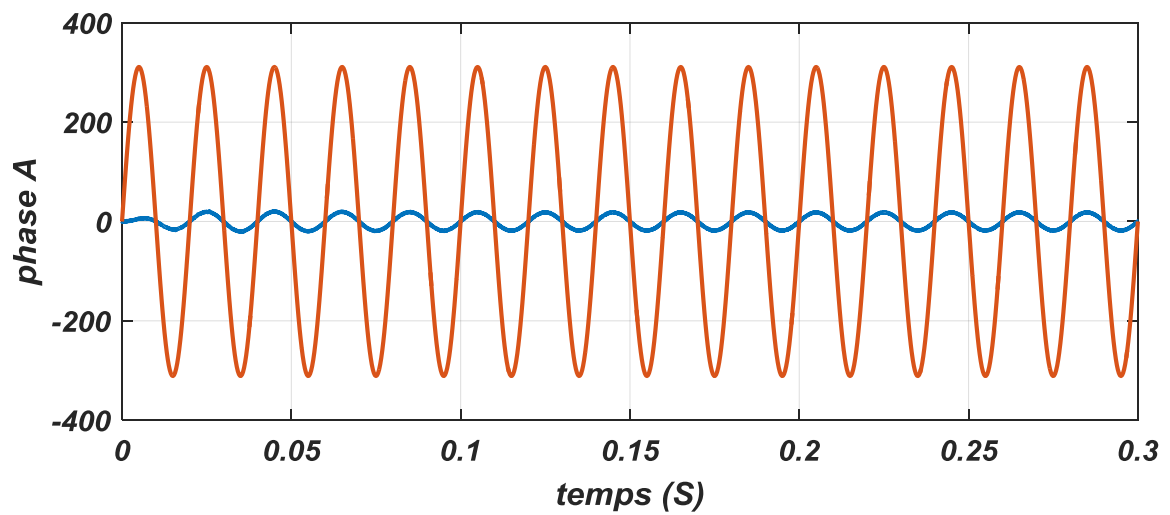


Fig III.18 Courants de source et tension de source

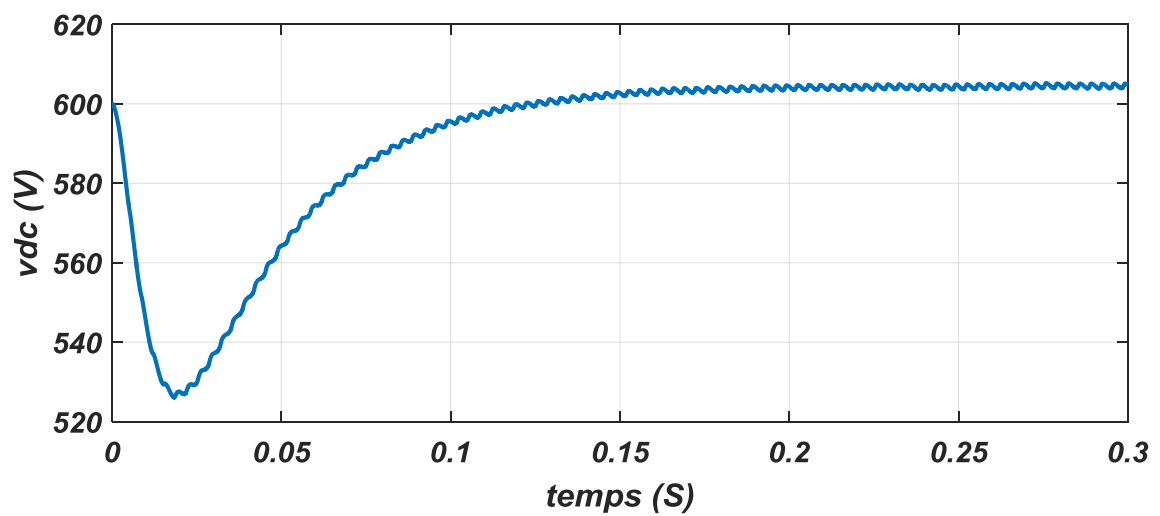


Fig III.19 La tension de la capacité

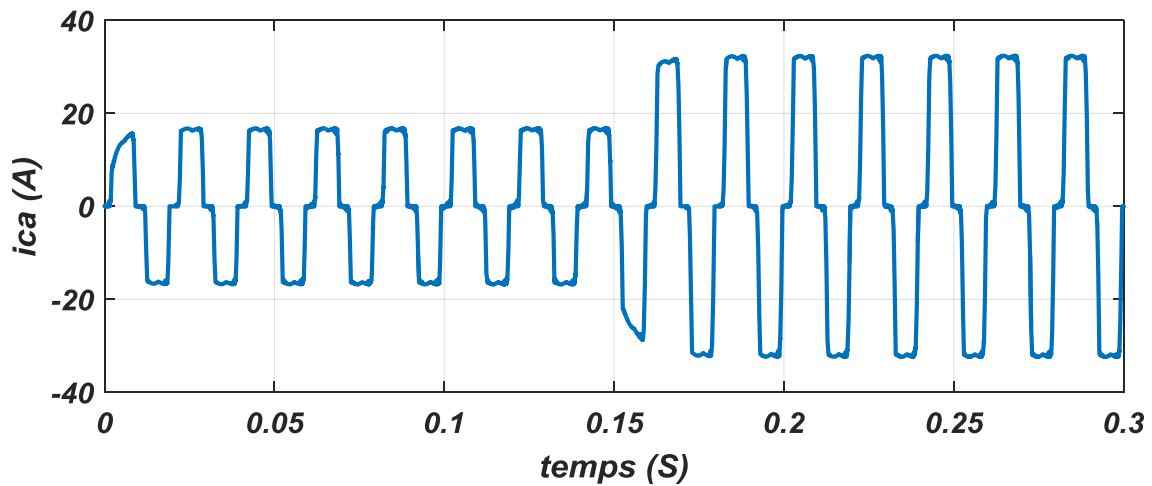


Fig III.20 Courants de la charge lors de la variation de charge

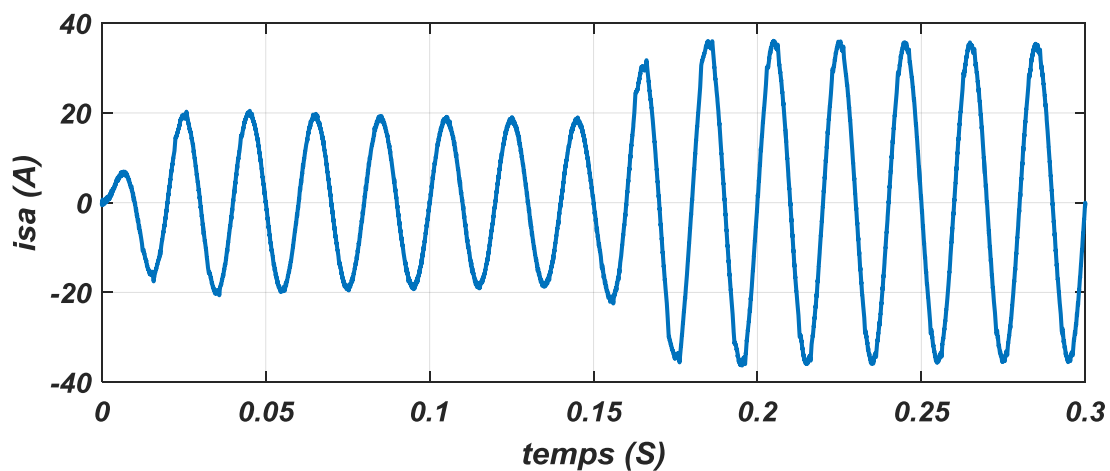


Fig III.21 Courants de la source lors de la variation de charge

Les formes (III.15) s'affichent : Une fois que le filtre actif est connecté et que les courants harmoniques sont injectés dans la grille, les courants sources sont devenues sinusoïdales.

Les courants de la figure (III.16) sont affichés. Ces courants harmoniques sont injectés.

La figure (III.17) montre le taux de déformation après filtrage. Le taux de déformation harmonique a été mesuré, dans cette période nous notons $THD = 1.83\%$. Là où nous pouvons voir, il est très bas et inférieur à 5% le maximum autorisé par la norme IEEE est de 5%

La figure (III.18) montre Courants de source et tension de source. Ils sont en phase. La figure (III.19) montre la tension de la capacité. La figure (III.20) montre les courants de la charge lors de la variation de charge.

La figure (III.21) montre la montre Courants de la source lors de la variation de charge où nous voyons malgré le changement grosse, mais le candidat n'a pas perdu sa capacité à filtrer

A la fin de cette expérience, nous observons la légère supériorité de filtre multi-variable sur filtre passe-bas

III.3-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des simulations de l'ensemble du système, qui comprenait un réseau, une charge non linéaire contaminée (redresseur triphasé), et FAP. In la fin, nous concluons que le filtre actif parallèle réduit avec succès les harmoniques dans le réseau électrique triphasé. En fonction des données obtenues. Il permet de compenser l'énergie réactive. Le filtrage avec filtre multi-variable donne des performances supérieur par rapport au filtrage avec filtre passe bas.

Conclusion générale

Ce mémoire visant à présenter le mode d'amélioration de la qualité d'énergie électrique par un filtre actif parallèle à trois fils. Cette solution permet de réduire la distorsion des courants harmoniques du réseau électrique. Ces distorsions sont principalement causées par des charges non linéaires, qui sont basées sur des transformateurs de puissance et sont de plus en plus utilisées dans l'industrie pour donner de l'énergie sous de nombreuses formes.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté d'une manière générale la problématique de la qualité d'énergie et les solutions proposées dans la littérature pour réduire les courants harmoniques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons fourni une topologie de filtre actif parallèle, un examen théorique de la structure FAP, qui se compose de trois fils et de deux composants principaux, basé sur l'analyse des perturbations harmoniques et de leurs effets sur le réseau électrique (partie énergie et partie contrôle).

Dans le troisième chapitre, nous avons simulé le FAP avec la méthode des puissances instantanées utilisant un filtre passe bas et un filtre multi variable. Le contrôle de l'onduleur est avec le contrôleur par hystérésis et la régulation par PI. Le THD des courants sources est diminué par ce filtre de 26,56% à 2.34 avec le filtre passe bas et à 1,85% avec le filtre multi variable.

Nous pouvons conclure de ce travail que, indépendamment de la grosseur, un filtrage active parallèle adéquate à trois fils permet une réduction importante des harmoniques de courant et une compensation de l'énergie réactive. Dans tous les cas de simulation, le courant délivré par la source après filtrage est pratiquement sans harmonique, avec un THD maximum inférieur à 5%.

Enfin, le régulateur PI, peut être remplacé par d'autres types de régulateurs, tels que les régulateurs adaptatifs et les régulateurs intelligents (neurones - flous - algorithmes génétiques - ANFIS), améliorerait la gestion de la tension continue que ce soit dans des régimes transitoires ou permanents, et donc minimiseraient les oscillations.

Références Bibliographiques

- [1] **Mohamad AlaaEddinAlali**, Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur –Strasbourg I, 12/12/2002.
- [2] **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, Université Mohamed Khider Biskra, 2017
- [3] **T. DEFLANDRE et P. MAURS**. « Les Harmoniques sur les Réseaux Electriques ». Direction des Etudes et Recherche en France -Edition EYROLLES, 1998.
- [4] **L. ZELLOUMA**. « Filtrage actif Parallèle des Harmoniques du Courant Génères Par un Pont Redresseur Triphasé non Commandé ». Mémoire de magister, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2006.
- [5] **C. COLLOMBET J. M. LUPIN Et J. SCHONEK**. « Perturbations Harmoniques dans les Réseaux Pollués et Leur Traitement ». Extrait du Cahier technique n° 152, Schneider Electric, 1999.
- [6] **S. BEN ALI et S. BOUHANAK** «Etude et Simulation d'un Filtre Active Parallèle à Quatre Fils». Mémoire de magister, Université echahid hama lakhder d'el-oued ,2015.
- [7] **M. AL. ALALI**. « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension ». Thèse Doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2002.
- [8] **B.BELMESSAOUD et T.MAHNI**. « Evaluation de la Stabilité Statique en Tension utilisant la Méthode de Load Flow Continu». M'emoire d'ing'énieur, E'cole Nationale Polytechnique d'Alger, 2009.
- [9] **F. HAMOUDI**. « Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt à Quatre Fils ». Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [10] **I. EXEBERRIA-OTADUI**. « Evaluation of Different Strategies for Series Voltage Sag Compensation ». IEEE, P. 1797-1802, 2002.
- [11] **F. FORNANI, R. PROCOPIO and H. J. BOLLEN**. « SSC Compensation Capability of Unbalanced Voltage Sags ». IEEE Transaction on Power Delivery, V. 20, N° 03, p 2030- 2037, 2005.
- [12] **L.BILAL et O.ABANA** «Stratégies de Commande d'un Filtre Active Parallèle Triphasé». Mémoire de master, Université echahid hama lakhder d'el-oued ,2012.
- [13]: **Mohamed Muftah ABDUSALAM**, Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, soutenance le 29/05/2008.
- [14] **A. HAMADI**. « Contribution à l'Etude des Filtres Hybrides de Puissance Utilisés pour Améliorer la Qualité de l'Energie dans le Réseau Electrique de Distribution ». Thèse de doctorat, Ecole de Technologie Supérieure-Québec, Canada, 2010.
- [15] **Y. PAL et A. SWARUP**. « A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement ». Conference on Power System Technology and IEEE Power India

Conference (POWERCON), p. 1-8, 2008.

[16]: **KESSAL ABDELHALIM**, Correction du Facteur de Puissance a L'entrée d'un Convertisseur AC/DC, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif, soutenance le 26/04/2012.

[17]: **M. Fatiha**, Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension, Mémoire de Magister, Université Oran, soutenance Octobre 2001.

[18]**H. Akagi**: « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. on Industry applications, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.

[19]**Mohamed Magraoul**: « validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle », Thèse de Docteur de université mentouri constantine. 2007

[20] **B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra**. « A review of active filters for power quality improvement », IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol. 46, No. 5, October 1999, Page(s): 960 - 971.

[21] **M ,AlaaEddinAlali** : « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques » Thèse de Doctorat, Strasbourg 12 Septembre 2002.

[22]: **Zellouma Laid**, Filtrage actif parallèle des harmonique du courant généré par un redresseur triphasé non commandé, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba 2006 2007.

[23]: **Steeve Beaulieu**, Etude et Mise au Point d'un Filtre Actif d'Harmoniques en Vue d'Améliorer la Qualité de l'Alimentation Electrique, Mémoire de Fin d'Etudes, Univ. Québec à Chicoutimi, Mai 2007.

[24] **S. Hong-Seok, Hyun-Gyu, N. Kwanghee**, An instantaneous phase detection algorithm under unbalanced line voltage condition. IEEE 30th Annual Power Electronics Specialist Conference PESC'99, Vol.1, pp. 533-537, Aug. 1999. S.H.

[25] **M. M. Abdusalam**, Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales, thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-i (2008)

[26] **M. Sarra**, Contribution à l'étude des filtres actifs hybrides, Thèse de doctorat de l'Université de Sétif, Algérie, (2013)

[27]: **MAHNI Tidjani**, Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils, Magistère en Électrotechnique, Centre Universitaire D'EL- OUED, 2012.

[28] **B. Singh, V. Verma** : « A new control scheme of series active filter for varying rectifier loads », IEEE Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2003, The Fifth International Conference, Vol. 1, 17-20 Nov. 2003, Page(s): 554 - 559.

[29] **G. Alarcon, C. Nunez, V. Cardenas, M. Oliver** : « Design and implementation of a 3- phase series active filter to compensate voltage disturbances », IEEE Power Electronics Congress, CIEP 2000, 15-19 Oct. 2000, Page(s): 93 - 98.