



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar-El-Oued

Faculté de Technologie
Département De Génie Electrique

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE
Domaine :sciences et technologie
Filière: Electrotechnique
Spécialité: réseaux Electrique

**Amélioration de qualité d'énergie électrique par un
filtre actif parallèle à quatre fils**

Réalisé par :

Touil El-Bachir

Rabhi Mohammad El-Bachir

Encadré par :

Dr. Mahni Tidjani

Mr .GUIA TALAL

Président

Université d'El Oued.

Mr. ZELOUMA LAID

Examineur

Université d'El Oued.

Mr . Mahni Tidjani

Rapporteur

Université d'El Oued.

Année Universitaire : 2021/2022

Résumé :

Le passage d'harmoniques dans le réseau électrique peut interférer avec le fonctionnement normal de certains équipements ou les endommager en premier lieu, provoquant des inquiétudes. Cette note représente la contribution à l'amélioration de la qualité du courant électrique dans le réseau électrique. Nous avons étudié le filtre parallèle à quatre bras et utilisé dans ce filtre différentes charges (équilibrées et déséquilibrées).

Nous avons déterminé le courant harmonique en utilisant la méthode du réservoir synchrone. La simulation a donné de très bons résultats. Les résultats de la simulation montrent l'importance du filtrage harmonique du courant électrique.

Mots-clés : filtre parallèle à quatre bras - harmoniques - entrepôt synchrone

Summary :

The passage of harmonics in the electrical network can interfere with the normal operation of some equipment or damage it in the first place, causing concern. This note represents the contribution to improving the quality of the electric current in the electrical network. We have studied the parallel filter with four arms and used in this filter different loads (balanced and unbalanced).

We determined the harmonic current by using the synchronous reservoir method. The simulation gave very good results. The simulation results show the importance of harmonic filtering of the electric current. **Keywords:** four-arm parallel filter - harmonics - synchronous warehouse.

ملخص:

بمرور التوافقيات في الشبكة الكهربائية يمكن ان تعرقل العمل الطبيعي لبعض المعدات أو إتلافها أصلا مما يسبب قلقا. تمثل هذه المذكرة المساهمة في تحسين نوعية التيار الكهربائي في الشبكة الكهربائية قمنا بدراسة المصفي المتوازي ذو أربعة أذرع و إستخدام في هذا المصفي مختلف الحمولات (متوازنة وغير متوازنة).

وحددنا التيار التوافقي بإستعمال طريقة المستودع المتزامن أعطت المحاكاة نتائج جيدة جدا نتائج المحاكات تبين أهمية تصفية التوافقي للتيار الكهربائي

الكلمات المفتاحية : المصفي المتوازي ذو أربعة أذرع - التوافقيات - المستودع المتزامن



Remerciements:

On peut être incapable de rendre la pareille aux gens de crédit, et les méthodes d'expression peuvent ne pas suffire

.Exprimons notre gratitude et notre reconnaissance

Grâce et louange à Dieu et ce qui devrait être pour la gloire de ton visage et la grandeur de ta puissance

Et d'après les paroles du Messager de Dieu, que les prières et la paix de «Dieu soient sur lui

".Celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas Dieu"

Nous adressons nos plus vifs remerciements et notre reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin, à accomplir ce travail,
: notamment

Le professeur superviseur qui a suivi l'encadrement de cette recherche bloc après bloc et lui a apporté des soins et des soins que la langue ne puisse répondre à l'effort qu'il a fait avec nous et au temps précieux qu'il a .consacré à la réalisation de ce travail

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés par leurs conseils et leurs orientations et nous ont informés alors qu'il était présent en son absence en sa présence dans l'achèvement de ce travail.

Sommaire

résumé Abstract:	2
Sommaire	5
LISTE DES FIGURES:	8
LISTE DES Tableaux:	9
Liste des Abréviations:	9

Introduction générale

1.1 Introduction Générale:	11
----------------------------------	----

Chapitre I:

Perturbations et Dépollution dans les Réseaux Électriques

I.1 Introduction:	14
I.2 Dégradation de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques :	14
I.2.1 Perturbations harmoniques :	15
I.2.1.1 Définition :	15
I.2.1.2. Origine des harmoniques :	16
I.2.1.3 Conséquences des harmoniques :	16
I.2.2 Déséquilibre de la tension :	17
1.2.3. Les Creux de tension :	17
1.2.3.1. Origine des creux de tension :	17
1.2.3. 2.Conséquences des creux de tension :	17
I.2.4 Variation de la fréquence :	18
I.3 Caractérisation et normes :	18
I.3.1 Puissance active :	18
I.3.2. Puissance réactive	18
I.3.3 Puissance déformante	18
I.3.4 Facteur de puissance	19

I.3.5 Taux harmonique de rang :.....	20
I.3.6 Taux global de distorsion harmonique :.....	20
I.3.7 THD en courant ou en tension :.....	20
I.3.8 Normes imposées sur le THD :.....	20
I.4 Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques :.....	21
I.5. Les filtres passifs :.....	22
I. 5.1 Filtre passif résonant :.....	23
1.5.2. Filtre passif amorti :.....	23
I.6. Les filtres actifs :.....	24
I.6.1. Filtre actif série :.....	25
I.6.2. Filtre actif parallèle :.....	25
I.6.3. Filtre combiné parallèle-série (UPQC5):.....	26
I.6.4. Filtre actif hybride.....	27
I.6.5. Filtre actif série avec un filtre passif parallèle :.....	27
1.7. Concluions :.....	28

Chapitre II:

Structure et commande du filtre actif parallèle a quatre fils

II.1 Introduction :.....	30
II.2 Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre bras :.....	30
II.2.1 Étude de la partie de puissance :.....	31
II.2.1.1. Description d'un onduleur triphasé à quatre bras :.....	31
II.2.1.2. Filtre de couplage :.....	33
II.2.1.3 Système de stockage d'énergie:.....	34
II.2.2 Étude de la partie commande.....	35
II.2.2.1 Identification des courants polluant.....	35
II.2.2.2 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire avec FBP+FMV :.....	35
II.2.2.3 Méthode de référentiel synchrone avec FPB :.....	39
II.2.2.4 Régulation de la tension du bus continue :.....	40

II.2.2.5. Contrôle de l'onduleur par hystérésis :	41
II.3 Conclusion :	42

Chapitre III

Simulations et Interprétations des Résultats

III.1. Introduction :	44
III.2. Schémas de simulation :	44
III.2.1. Paramètres de la simulation :	46
III.2.2. Résultats des simulations sous Matlab-Simulink :	46
III.2.2.1. Cas de charge équilibrée :	46
III.2.2.1.1. Cas de charge équilibrée avec un onduleur triphasé à quatre bras :	47
III.2.2.2. Cas de charge déséquilibrée :	51
III.3. Conclusion	59
Conclusion générale	60
Bibliographie	62

LISTE DES FIGURES:

Figure I n°01:Image d'une onde déformée.	15
Figure I n°2 : diagramme vectorielle du facteur de puissance.....	19
Figure I n°3: Déférentes solutions utilisées dans le filtrage du courant	22
Figure I n°4: Raccordement d'un filtre passif	23
Figure I n°5:Filtre passif résonant.	23
Figure I n°6: Filtre passif amorti.....	24
Figure I n°7: Filtre actif série.....	25
Figure I n°8: Filtre actif parallèle	26
Figure I n°9: Filtre combiné parallèle-série (UPQC).....	26
Figure I n°10:Filtre actif hybride.	27
Figure I n°11: Filtre actif série avec un filtre passif parallèle	27
Figure II n°1: Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre bras.	31
Figure II n°2: Onduleur à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils	32
Figure II n°3: Schéma du FMV.	38
La figure II n°4: illustre l'algorithme d'identification.....	39
Figure II n°5: Identification par la méthode de référentiel synchrone avec FPB..	40
Figure II n°6: Boucle de régulation de la tension continue.	41
Figure II n°7:Principe de la commande par hystérésis.	42
Figure III n°1: Schéma de FAP à quatre fils avec un onduleur à quatre bras sous Matlab-Simulink.....	44
Figure III n°2: charges triphasées non linéaire sous Matlab- Simulink.....	45
Figure III n°3: Identification par la méthode des puissances instantanées sous Matlab-Simulink.....	45
Figure III n°4: commande par hystérésis sous Matlab-Simulink	45
Figure III n°5 : Courant de source et de charge avant et après filtrage	47
FigureIII n°6 : Courant de filtre avant et après filtrage.	47
Figure III n°7: Courant de neutre côte source et côte charge avant et après filtrage.....	47
Figure III n°8: Spectre d'harmonique du courant de source.....	48
Figure III n°9: Courant de source avant et après l'augmentation de la charge	49
Figure III n°10 : Courant de filtre et après l'augmentation de la charge.....	49
Figure III n°11: Courant de neutre avant et après l'augmentation de la charge.....	49
Figure III n°12: Spectre d'harmonique du courant après l'augmentation de la charge... ..	50
Figure III n°13: Courant de côte source.....	52
Figure III n°14 : Courant de neutre.....	52
Figure III n°15: Spectre d'harmonique du courant de la phase 1	53
Figure III n°16: Spectre d'harmonique du courant de la phase 2	54
Figure III n°17 : Spectre d'harmonique du courant de la phase 3.	54
Figure III n°18 : Courant de côte charge	55
Figure III n°19 - Courant de neutre.	55
Figure III n°21: Spectre d'harmonique du courant de la phase 1	56
Figure III n°22: Spectre d'harmonique du courant de la phase 2	57
Figure III n°23: Spectre d'harmonique du courant de la phase 3	57

LISTE DES Tableaux:

Tableau II n°1 : Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras..	32
Table II n°2: Paramètres à compenser	37
Tableau III (n°1) : Paramètres du système étudié	46

Liste des Abréviations:

FAP: Filtre actif parallèle
IGBT: Insolated Gate Bipolar Transistor
MLI: Modulation par largeur d'impulsion
FAP: Filtre actif parallèle
UPQC: Conditionneur universel d'énergie électrique
FPB: Filtre passe bas
PI: Régulateur proportionnel intégral
THD: Taux de distorsion harmonique
SVC: Static var compensateur
FAS: Filtre actif série
P.C.C : Acronyme en anglais de: Point of Common Coupling.
A.P.F : Acronyme en anglais de Active Power Filtre
U.P.F.C : Acronyme en anglais de : Unified Power Qualité Conditionner

Introduction générale

Introduction Générale

1.1 Introduction Générale:

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques.

Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels (utilisation de gradateurs, de redresseurs, de variateurs de vitesse,...), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...) et domestique (téléviseurs, appareils électroménagers grand public,...) [01].

Les harmoniques générées par les charges non linéaires circulent dans les réseaux électriques. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique à des effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes. Les limites proposées ont été établies par les normes de la commission international d'électrotechnique IEC61000, et par les recommandations IEEE Std 519-1992 [07].

Pour garantir les normes de qualité, le filtrage actif d'harmoniques, et en particulier le filtrage shunt a prouvé son efficacité comme une alternative aux solutions traditionnelle basées sur les filtres passifs, en raison notamment de la bande passante et la flexibilité. Au cours des dernières années, plusieurs travaux ont été réalisés et sanctionnés par des réalisations pratiques de tels systèmes, mais la majorité des cas pour des systèmes triphasés à trois fils (sans distribution du fil neutre), or il se trouve que dans les réseaux basse tension, le fil neutre est souvent distribué, ce qui fait apparaître des composantes homopolaires (harmonique 3 et ces multiples impaires), notamment à cause des charges non linéaires monophasées. A cet effet, le filtre actif à quatre fils est plus adéquat, du fait de la distribution du quatrième fil, qui permet de compenser le courant du neutre [03].

Dans l'étude, l'objectif sera de contrôler un filtre actif parallèle à quatre bras, dans le but de Minimisation en courants harmoniques. Notre mémoire est subdivisé en trois chapitres

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les types et les causes des perturbations de courant et la tension dans les réseaux électriques. Ces désordres sont des harmoniques, des déséquilibres, des tensions faibles, leurs conséquences, des normes internationales imposées aux utilisateurs, qui proposent des solutions traditionnelles et un filtrage moderne.

Introduction Générale

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter la structure générale du filtre actif parallèle à quatre bras composé en deux parties : la partie puissance et la partie contrôle-commande. La partie puissance constituée en trois blocs sont l'onduleur de tension à quatre bras, le circuit de stockage d'énergie et le filtre de couplage, nous aborderons l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue on utilise le régulateur Proportionnel-Intégral (PI), et la commande par hystérésis.

Dans le troisième chapitre, nous allons d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, trois charges monophasées: trois charges identiques alimentées par trois redresseurs monophasés, et trois charges non identiques sous l'environnement Matlab-Simulink. On donne et on interprète ensuite les résultats de simulation obtenus.

Chapitre I:
Perturbations et
Dépollution dans
Les Réseaux Électriques

I.1 Introduction:

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie.

En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale. Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental.

Ce chapitre commence par connaître les propriétés des perturbations électriques, Comprendre l'origine des perturbations, des conséquences. La deuxième partie, on présente la caractérisation et les normes imposées sur le THD par la CEI et l'IEEE. En fin, on présenter les solutions traditionnelles et modernes utilisées pour dépolluer les réseaux électriques et enfin on compare entre les différentes solutions

I.2 Dégradation de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques :

La qualité d'énergie est un concept très large qui peut se définir par rapport à la continuité de la fourniture électrique et la forme de la tension disponible. L'évaluation de cette qualité consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques parmi lesquelles on peut citer:

- ✚ Les perturbations harmoniques
- ✚ Les déséquilibres de tension
- ✚ Les creux de tension et coupures
- ✚ Les variations de la fréquence d'alimentation, etc.

Ces perturbations peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie. Elles peuvent aussi être classées selon qu'elles soient permanentes, semi-permanentes ou aléatoires (foudre, court-circuit, manœuvre...).

I.2.1 Perturbations harmoniques :

I.2.1.1 Définition :

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique ayant une fréquence multiple de l'onde 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 $h=40$).

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique dans notre cas c'est la (50 Hz). 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 la figure (I.1) suivante représente la forme d'onde fondamentale et la forme d'onde harmonique et la forme d'onde déformée

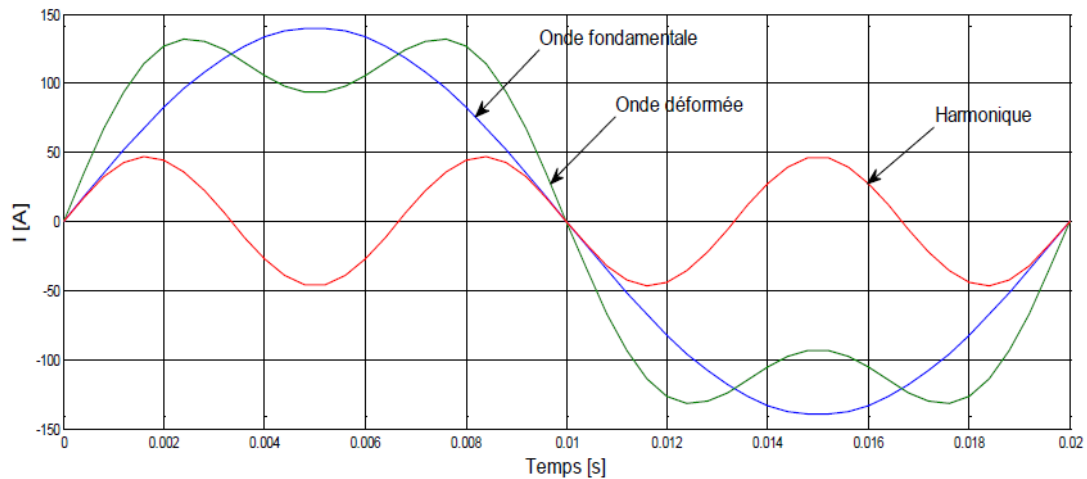


Figure I n°01:Image d'une onde déformée.

I.2.1.2. Origine des harmoniques :

Dans les secteurs industriels et domestiques on constate un accroissement de générateurs d'harmoniques. Il s'agit des dispositifs, tels que les convertisseurs statiques, contenant des éléments de commutation ainsi que d'autres dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire:

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

- ✚ Les redresseurs monophasés et triphasés. Ils génèrent des harmoniques dont la fréquence dépend sensiblement de la commande adoptée.
- ✚ Les cyclo-convertisseurs utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif
- ✚ Les gradateurs utilisés dans les entraînements de faible puissance, les systèmes d'éclairage de chauffage ...
- ✚ 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.

* Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire, on distingue :

- ✚ Les fours à arc et à induction.
- ✚ Les transformations.
- ✚ Les machines tournantes.
- ✚ Inductances saturées, etc. [14 - 15].

I.2.1.3 Conséquences des harmoniques :

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance [4].

a- L'échauffement : Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

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

Avec :

- I : courant total.
- I_h : courant harmonique de rang
- h qui représente le fondamental pour $h=1$.
- R : 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...etc.) Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs [5].

I.2.2 Déséquilibre de la tension :

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour la réceptrice monophasée basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [7].

1.2.3. Les Creux de tension :

1.2.3.1. Origine des creux de tension :

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture. Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale U_n , est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn [04-13]. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms [04].

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

- ✚ Les creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la
- ✚ mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.).
- ✚ Les creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, protection de branches sur les lignes aériennes...etc.).
- ✚ Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées

1.2.3. 2. Conséquences des creux de tension :

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Le tableau (1.1) résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles [04-14]

I.2.4 Variation de la fréquence :

Les réseaux de distributions ou de transports ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de 50 Hz $\pm 1\%$ [11].

I.3 Caractérisation et normes :**I.3.1 Puissance active :**

La puissance active P d'un signal comportant des harmoniques est la somme des puissances actives dues aux tensions et courants de même rang. La décomposition de la tension et du courant en leurs composantes harmoniques nous Donne [03]:

$$P = \sum_{i=1}^{\infty} (U_i I_i \cos \varphi_i) \quad (I.2)$$

φ_i étant le déphasage entre la tension et le courant de l'harmonique de rang i . En l'absence d'harmoniques, on retrouve bien l'expression :

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (I.3)$$

I.3.2. Puissance réactive

La puissance réactive n'est définie que pour le fondamental, soit [03]:

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (I.4)$$

I.3.3 Puissance déformante

Considérons la puissance apparente S [03]:

$$S = U_{eff} I_{eff} \quad (I.5)$$

En présence d'harmoniques, on peut écrire

$$S^2 = \sum_{i=0}^{\infty} (U_i^2) / \sum_{i=0}^{\infty} (I_i^2) \quad (I.6)$$

Par conséquent, en présence d'harmoniques, la relation $S^2 = P^2 + Q^2$ n'est pas valide. On définit la puissance de distorsion D telle que:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (I.7)$$

I.3.4 Facteur de puissance

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominal. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), donnée par la relation (I. 8), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (I.2) [07].

$$D = 3.V1\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \tag{I.8}$$

Le facteur de puissance ($F.P$) devient :

$$F.P = \frac{P}{\sqrt{D^2+P^2+Q^2}} = \cos \varphi_1 \cos \gamma \tag{I.9}$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance

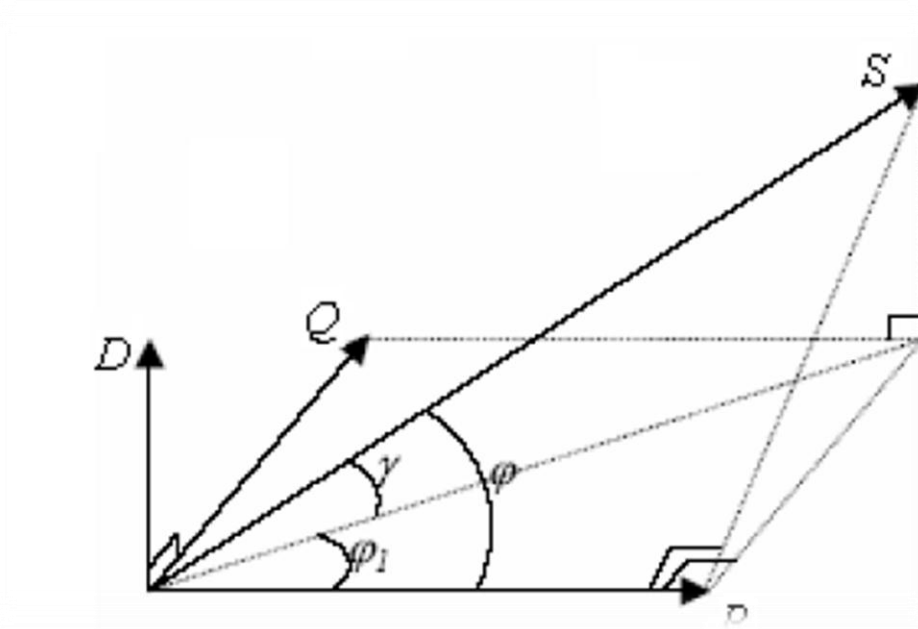


Figure I n°2 : diagramme vectorielle du facteur de puissance

- φ_1 : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente.
- γ : Le déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré.
- φ : linéaire SI et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire S .
- φ_1 : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S .

I.3.5 Taux harmonique de rang :

Elle est définie par : ou h_i représente la composante harmonique de rang i , h_1 représente la composante fondamentale [03].

$$S_{i=h_i/h_1} \quad (I.10)$$

I.3.6 Taux global de distorsion harmonique :

Le terme THD correspond au (Total Harmonic Distortion), représente le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamental. Le taux de distorsion harmonique est une notion très utilisée pour définir l'importance du contenu harmonique d'un signal alternatif [03].

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} h_i^2 / h_1^2} \quad (I.11)$$

I.3.7 THD en courant ou en tension :

Il existe deux sortes de THD : en tension (apparaît à la source) ou en courant (dû aux charges non linéaires) Lorsqu'il s'agit des harmoniques de courant, l'expression devient [01][10][18]:

$$\text{THD}_i = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} h_i^2 / h_1^2} \quad (I.12)$$

* I_i : Valeur efficace du Courant harmonique du rang i

* I_1 : La valeur efficace du Courant fondamental

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de tension, l'expression devient :

$$\text{THD}_V = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2 / V_1^2} \quad (I.13)$$

 V_i : Valeur efficace du Tension harmonique du rang i

 V_1 : La valeur efficace du Tension fondamental

I.3.8 Normes imposées sur le THD :

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies [13]:

- ✚ au niveau international par la CEI,
- ✚ au niveau européen par le CENELEC,
- ✚ au niveau français, par l'UTE et le CEF, En effet, ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré.

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs ,...etc. Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de:

- faciliter les échanges dans le monde en supprimant les barrières techniques,
- assurer la qualité des produits,
- garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes,
- contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits,
- contribuer à la protection de l'environnement et à la qualité de vie.

Au niveau international (CEI), les normes CEI 61000 publiées dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM) sont divisées en plusieurs parties, conformément à la structure suivante:

- Généralités,
- Environnement.
- Limites.
- Techniques d'essais et de mesures.
- Guide d'installation et d'atténuation.
- Normes génériques.

I.4 Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques :

Afin de compenser les perturbations du courant, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne existent, Voir figure (I.3) [01][03

RESPONSABLE DE CHANTIER

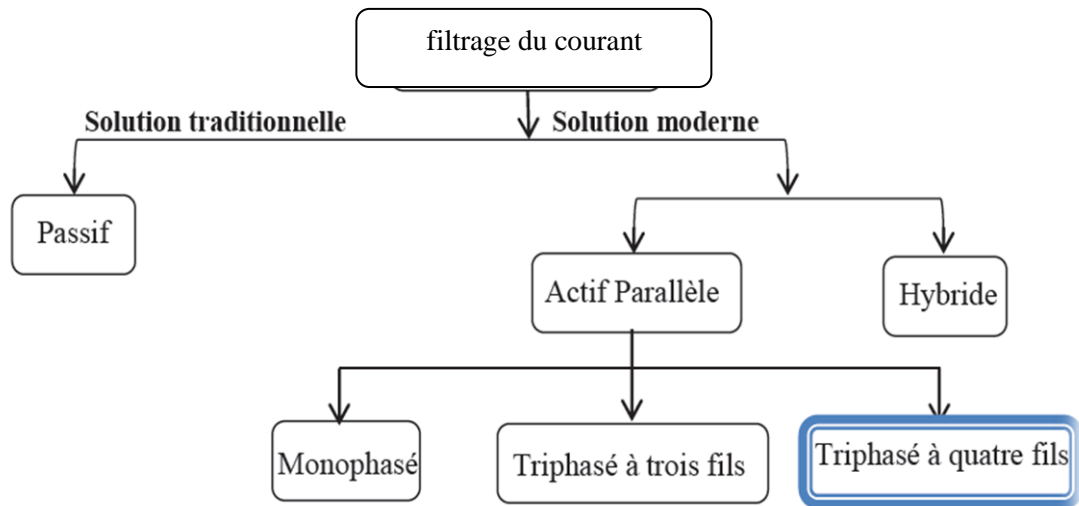


Figure I n°3: Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant

I.5. Les filtres passifs :

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances qui forment une impédance dont la valeur varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné. Si on veut par exemple éliminer le courant harmonique de rang 5, on dimensionne alors les éléments passifs de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence $5 \times \text{fondamentale}$, le courant circulera alors dans l'impédance la plus faible, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus dans l'impédance de court-circuit du réseau comme l'illustre la figure I.6.[5]

Equation des courants :

$$i_{ch} = i_{fondmetal} + i_h + i_{h-7} + i_{h-11} + \dots \quad (I.14)$$

$$i_{filter} = i_{h-5} \quad (I.15)$$

$$i_{ch} = i_{fondmetal} + i_{h-7} + i_{h-11} + i_{h-13} + \dots \quad (I.16)$$

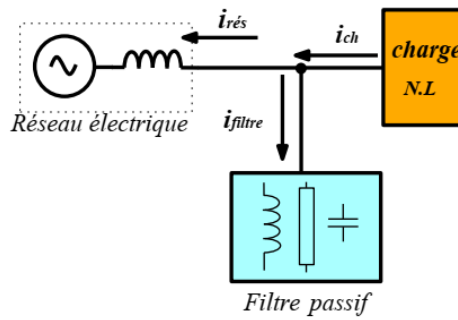


Figure I n°4: Raccordement d'un filtre passif

Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.[10]

I. 5.1 Filtre passif résonant :

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la figure I.7, son impédance équivalente est :

$$Z_{eq} = \frac{1 - LC\omega^2 + jRC\omega}{jC\omega} \tag{I.17}$$

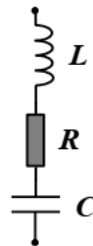


Figure I n°5: Filtre passif résonant.

Le rang d'accord 'ha' correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau. La pulsation de résonance du filtre est $\omega_a = 2\pi f_a = 1/\sqrt{LC}$

1.5.2. Filtre passif amorti :

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la figure I.8.

Son impédance équivalente est :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + j\frac{L}{C}\omega}{-\frac{L}{R}C\omega^2 + jC\omega} \tag{I.18}$$

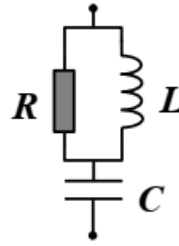


Figure I n°6: Filtre passif amorti.

I.6. Les filtres actifs :

Les inconvénients inhérents aux filtres passifs (non adaptatif aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance (A.P.F.4). Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser [7].

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants:

- le volume physique du filtre est plus réduit.
 - la capacité de filtrage est supérieure.
 - la flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils présentent quelques inconvénients:

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- Les pertes sont plus élevées.

Deux types de convertisseurs connus dans la littérature constituent l'APF:

Convertisseur à source de courant (CSI) ou à source de tension (VSI). Bien que la première structure est suffisamment fiable, elle présente des pertes élevées et nécessite d'une importante et coûteuse inductance. De plus, elle ne peut être utilisée dans des applications multi-niveaux pour améliorer les performances avec un coût acceptable.

Cependant, la deuxième structure en tension d'APF, où le bus continu est équipé d'un condensateur représentant l'élément de stockage, est sûrement la plus répandue car moins onéreuse, plus légère et extensible à des applications multi-niveaux. Ainsi, pour la suite nous ne présentons que les différentes structures d'APF avec source de tension en entrée

I.6.1. Filtre actif série :

Le but du filtre actif série est de créer une impédance en série avec le réseau qui sera nulle pour le fondamental et de valeur élevée pour les harmoniques. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, déséquilibres et creux de tension. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. En plus, ce filtre nécessite une protection complexe contre le court-circuit des réseaux. En effet, lors d'un court-circuit côté réseau, ce dernier peut être amené à supporter tout le courant de court-circuit.

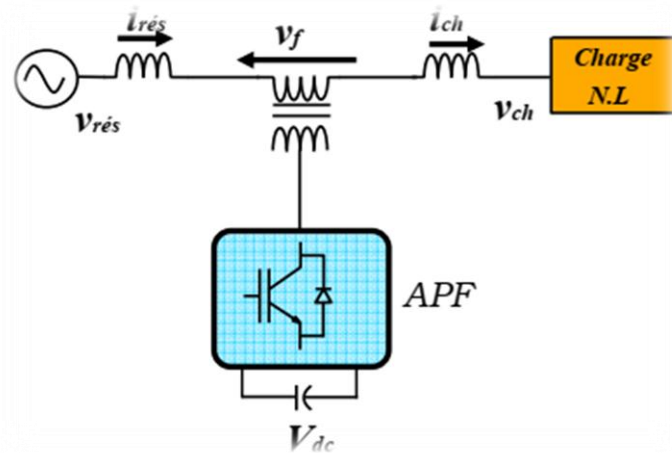


Figure I n°7: Filtre actif série.

I.6.2. Filtre actif parallèle :

Sur la figure I.11 apparaît le synoptique d'un filtre actif parallèle. Le filtre actif est constitué d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. Ainsi, l'inductance en sortie de l'onduleur donne la nature de source de courant au filtre actif. Dans le cas où le réseau alimente plusieurs charges polluantes, il est préférable d'utiliser un seul filtre actif pour toutes les charges car, dans ce cas, le coût du filtrage est moindre. Cependant, lorsque la puissance des charges polluantes est élevée, la solution d'un filtre actif par charge s'avère nécessaire. Cette dernière méthode est bien sûr plus coûteuse mais elle possède l'avantage d'éviter que la stabilité des harmoniques vienne perturber le réseau dans le cas où un filtre actif est défectueux.

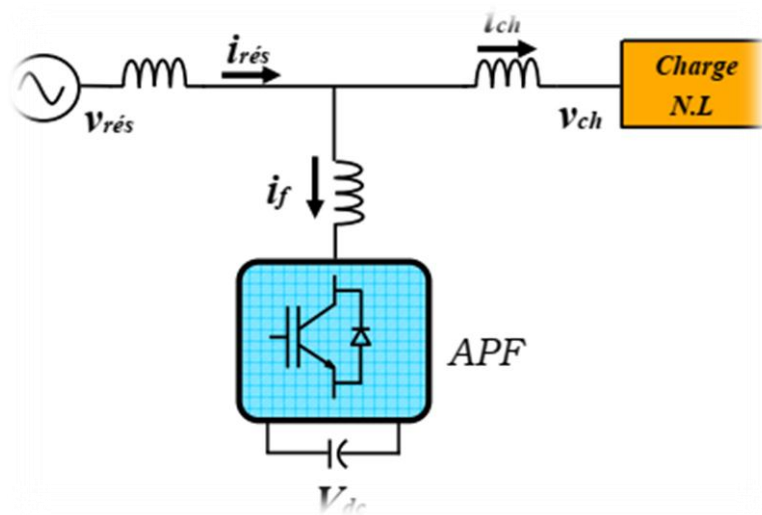


Figure I n°8: Filtre actif parallèle

I.6.3. Filtre combiné parallèle-série (UPQC5):

L'UPQC est principalement la combinaison de deux filtres actifs série et parallèle qui partagent la même capacité sur le bus continu. Ce type de dispositif est capable à la fois de régler la tension du réseau et d'éliminer les harmoniques. Il est considéré comme le plus puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement de puissance. Cependant, son prix important et la complexité des commandes des nombreux interrupteurs limitent son utilisation à des applications critiques comme l'équipement médical.[11]

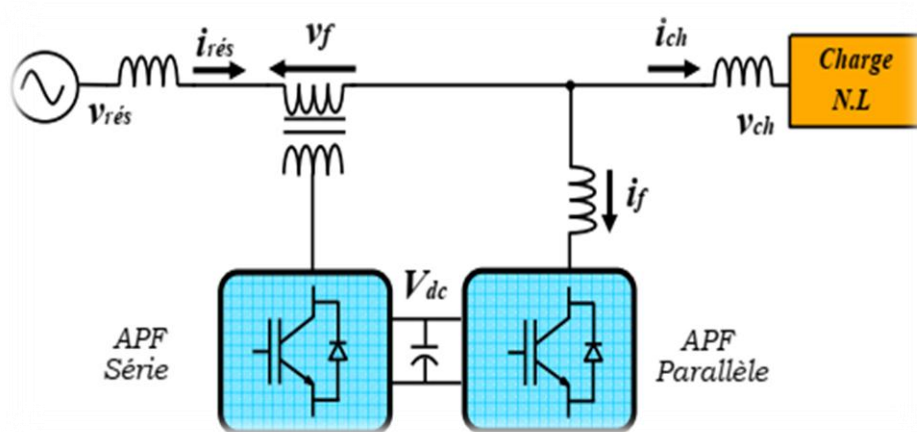


Figure I n°9: Filtre combiné parallèle-série (UPQC).

I.6.4. Filtre actif hybride

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride (Fig.I.14) est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation (HF) car il présente une haute impédance à cette fréquence [14]. Cependant, la mise en place d'une inductance à l'entrée de la charge non linéaire est indispensable pour le bon fonctionnement du filtre hybride.

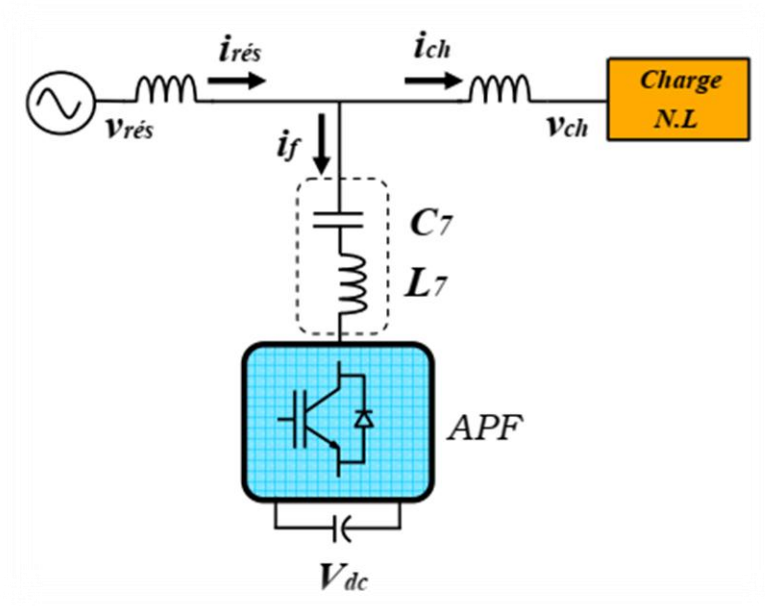


Figure I n°10: Filtre actif hybride.

I.6.5. Filtre actif série avec un filtre passif parallèle :

Une version moins chère de la structure précédente est illustrée par la figure I.13 où un filtre actif série et un filtre parallèle passif sont exploités.

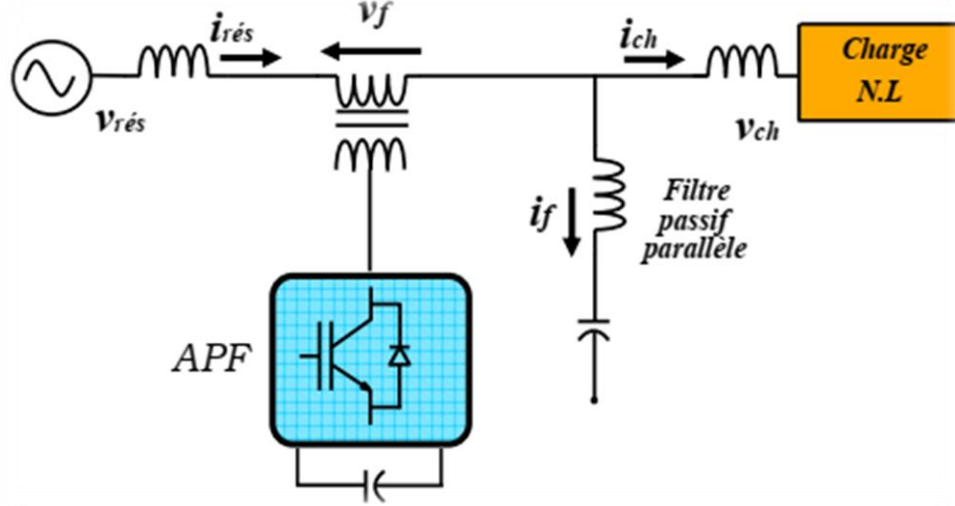


Figure I n°11: Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

Principalement, le filtre série régule la tension au point PCC tandis que le filtre parallèle est réglé sur quelques harmoniques de courant (rangs inférieurs) qui doivent être supprimés. Cette topologie a la possibilité de réduire les harmoniques de tension et de courant à un prix raisonnable

1.7. Concluions :

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Nous avons donné des définitions dont la connaissance nécessaire pour comprendre l'ensemble des développements de ce mémoire. Nous avons constaté l'importance de différentes solutions du filtrage, il y'a des points positifs ainsi que des points négatifs pour chaque type de solution. En vue de leur importance, les filtres actifs du courant sont aujourd'hui au stade de la recherche. On trouve des nouvelles techniques d'identification des perturbations, de commande, et de régulation ; le domaine du filtrage actif est en plein évolution. Dans ce cadre, le chapitre suivant sera consacré au Modélisation -contrôle-commande filtre actif parallèle à quatre bras.

Chapitre II:
Structure et commande
du filtre actif parallèle
à quatre fils

II.1 Introduction :

Le but de ce travail est d'améliorer le niveau harmonique, pour améliorer ce damier, nous proposons un filtre actif parallèle à quatre bras.

Dans ce chapitre, nous étudierons la structure d'un filtre actif parallèle à quatre bras, laquelle a été divisé en deux :

- ✚ La partie puissance.
- ✚ La partie commande.

Dans ce chapitre, nous donnerons une explication détaillée du filtre actif parallèle à quatre bras.

II.2 Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre bras :

Un filtre actif parallèle à quatre bras est essentiellement constitué de deux parties (Voir la figure (II.1)):

- Partie puissance.
- Partie commande.

Ces deux parties vont être détaillées dans les deux sections qui suivent [01].

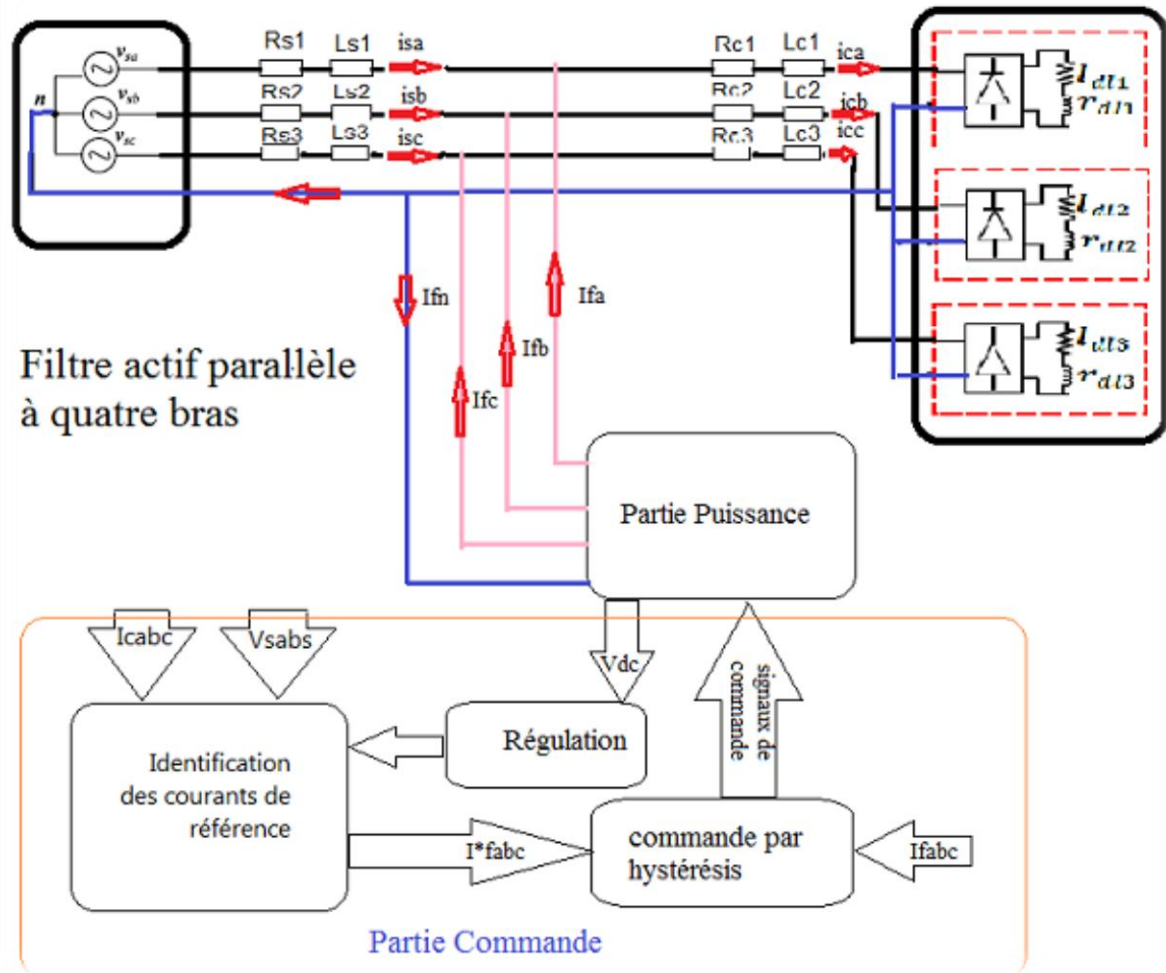


Figure II n°1: Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre bras.

II.2.1 Étude de la partie de puissance :

Dans cette section nous sommes intéressés à la partie puissance du FAP dont les composants sont les suivants [01-24] :

- L'onduleur à quatre bras.
- Le filtre de couplage.
- Le système de stockage de l'énergie.

II.2.1.1. Description d'un onduleur triphasé à quatre bras :

Dans cette topologie, nous utilisons un onduleur comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant (transistors bipolaires, IGBT, GTO) en antiparallèle avec une diode [01][03]. Comme l'illustre la figure (II.2).

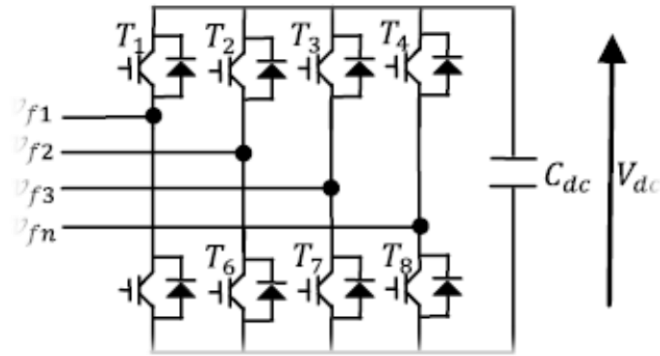


Figure II n°2: Onduleur à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau II.1. Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes

$$V_{f1} = (T_1 - T_4)V_{dc} \tag{II.1}$$

$$V_{f2} = (T_2 - T_4)V_{dc} \tag{II.2}$$

$$V_{f3} = (T_3 - T_4)V_{dc} \tag{II.3}$$

$$i_{dc} = T_1 i_1 + T_2 i_2 + T_3 i_3 \tag{II.4}$$

Avec : $T_i = 1$ si T_{i+4} est fermé, et $T_i = 0$ si T_{i+4} est ouvert, et $i = 1$ à 4

K	T4	T3	T2	T1	Vf3	Vf2	Vf1
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	vdc
2	0	0	1	0	0	vdc	0
3	0	0	1	1	0	vdc	vdc
4	0	1	0	0	vdc	0	0
5	0	1	0	1	vdc	0	vdc
6	0	1	1	0	vdc	vdc	0
7	0	1	1	1	vdc	vdc	Vdc
8	1	0	0	0	-Vdc	-Vdc	-Vdc
9	1	0	0	1	-Vdc	-Vdc	0
10	1	0	1	0	-Vdc	0	-Vdc
11	1	0	1	1	-Vdc	0	0
12	1	1	0	0	0	-Vdc	-Vdc
13	1	1	0	1	0	-Vdc	0
14	1	1	1	0	0	0	-Vdc
15	1	1	1	1	0	0	0

Tableau II n°1 : Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras

II.2.1.2. Filtre de couplage :

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

- assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt} \quad (II.5)$$

Où i_f : Courant du filtre

i_h : Courant harmonique de la charge

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

Pour satisfaire ces deux conditions, on utilise un filtre de premier ordre, composé d'une inductance L_f avec une résistance interne R_f , une petite valeur de cette inductance assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient [04][19]:

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{max} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (II.6)$$

Avec V_{fmax} : La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur.

V_{smax} : La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre

Prenons la valeur maximale de tension. $v_f = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc}$ avec la valeur maximale de la tension du réseau, pour des petites variations du courant du filtre, on obtient:

$$\left(\frac{\Delta i_f}{\Delta T}\right)_{max} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} - V_{smax}}{L_f} \quad (II.7)$$

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

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

$$L_F = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} - V_{smax}}{0.25 i_{smax} f_{ond}} \quad (II.8)$$

II.2.1.3 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 [01].

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} [09], 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 utilisés [12]:

- La première méthode est basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif et celle de la charge polluante comme suit [01] :

La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans les trois phases est où I_d représente le courant de charge coté continu. Le fondamental du courant de la charge est donné par :

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d^2 d(\omega t)} = I_d \quad (II. 9)$$

Les courants harmoniques produits par la charge représentent la différence entre le fondamentale et la valeur efficace du courant coté alternatif de la charge. Ces courants sont donnés par [01]:

$$\sum_{h=2}^{\infty} I_{sh} = \sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2} = 0.431 I_s \quad (II.10)$$

Le filtre actif doit fournir la puissance correspondante aux harmoniques produite par la charge. En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur six fois inférieure à celle de la tension du réseau électrique, on peut trouver [01]:

$$C_{dc} \geq \frac{0.43 I_s}{6f_s (V_{dcmax}^2 - V_{dcmin}^2)} \quad (II. 11)$$

f_s : La fréquence fondamentale du réseau électrique. On choisit un taux d'ondulation ΔV_{dc} acceptable, généralement de l'ordre de $2\%V_{dc}$.

-La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante [01-03]:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\Delta V_{dc} \omega_h V_{dc}} \quad (\text{II.12})$$

*Avec ω_h : la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser

II.2.2 Étude de la partie commande

II.2.2.1 Identification des courants polluant

L'identification du courant polluant est une étape essentielle dans le processus de commande des filtres actifs. A l'heure actuelle, les chercheurs continuent toujours à améliorer ces méthodes afin d'obtenir des meilleurs résultats.

Plusieurs méthodes d'identification des courants de référence ont été développées depuis la mise en place des premiers filtres actifs afin de générer les signaux de référence servant à la commande du filtre actif. Dans ce chapitre les deux méthodes d'identification habituellement utilisées seront développées pour être appliquées au filtre actif parallèle à quatre fils:

- ✚ La méthode des Puissances Instantanée Réelle, Imaginaire et homopolaire (PIRI) .
- ✚ La méthode de Référentiel Synchronique (SRF).

Dans le but d'appliquer des filtres d'extraction à ces deux méthodes, on utilise le Filtre Passe Bas et le Filtre Multi-Variables [03].

II.2.2.2 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire avec FBP+FMV :

Cette méthode introduite par [20], exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si on veut éliminer facilement la composante continue. Le principe de cette méthode est énoncé ci-dessous.

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec homopolaire, $v_{sa}(t)$, $v_{sb}(t)$, $v_{sc}(t)$ et $i_{ca}(t)$, $i_{cb}(t)$, $i_{cc}(t)$. La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes abc aux axes α - β -0, comme le montre les deux relations suivantes:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.13)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_\gamma \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_\gamma \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées $\bar{v}\alpha\beta$, les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanés sont données par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_\alpha & \bar{V}_\beta & 0 \\ -\bar{V}_\beta & \bar{V}_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \bar{V}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

Les composantes $\bar{v}\alpha\beta$ sont isolées par un filtre multi-variable (FMV) au lieu d'une PLL. Les puissances instantanées peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$P = \bar{P} + \tilde{P} \quad (II.17)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (II.18)$$

$$P_0 = \bar{p}_0 + \tilde{P}_0 \quad (II.19)$$

✚ \bar{p} , \bar{q} et \bar{p}_0 : Composantes continues des puissances instantanées.

✚ \tilde{p} , \tilde{q} et \tilde{P}_0 : Composantes alternatives des puissances instantanées.

A l'aide d'un filtre passe bas avec une boucle de retour ou d'un filtre passe haut, on peut éliminer de p et de q une (des) partie (s) selon les objectifs de la compensation montrés au tableau II.2 ci-dessous [01][03].

Parameter à Compenser	Parameter de Control
Courant harmonique	$p = \tilde{p}$ et $q = \tilde{q}$
Énergie réactive	$p=0$ et $q = \bar{q}$
Courant harmonique + Énergie réactive	$p = \tilde{p}$ et $q=q$

Table II n°2: paramètres à compenser

Pour la compensation du courant dans le neutre, le courant homopolaire I_0 sera utilisé directement comme référence sans passer par le calcul de la puissance homopolaire et donc l'isolation de la composante fondamentale de la tension homopolaire pour le calcul de la puissance homopolaire n'est pas nécessaire dans cette variante de la méthode des PIRI.

✚ L'objectif dans ce travail est de compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive.

Les composantes du courant $i_{f\alpha\beta}$.

* sont alors définies par [01][03] :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_\alpha & \bar{V}_\beta \\ \bar{V}_\beta & \bar{V}_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

Donc:

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\bar{V}_\alpha^2 + \bar{V}_\beta^2} \begin{bmatrix} \bar{V}_\alpha & -\bar{V}_\beta \\ \bar{V}_\beta & \bar{V}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

Soit :

$$i_{f\alpha}^* = \frac{\bar{V}_\alpha}{(\bar{V}_\alpha^2 + \bar{V}_\beta^2)} \tilde{p} - \frac{\bar{V}_\beta}{(\bar{V}_\alpha^2 + \bar{V}_\beta^2)} q \quad (II.22)$$

$$i_{f\beta}^* = \frac{\bar{V}_\alpha}{(\bar{V}_\alpha^2 + \bar{V}_\beta^2)} \tilde{p} + \frac{\bar{V}_\beta}{(\bar{V}_\alpha^2 + \bar{V}_\beta^2)} q \quad (II.23)$$

Sont les courants de référence dans le repère de Concordia. On remarque dans les expressions de ces derniers l'absence du courant homopolaire. On prend pour l'homopolaire : Maintenant, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia [03].

$$i_{f0}^* = i_0 \quad (II.24)$$

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{f0}^* \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

*** Filtres d'extraction**

Les deux types de filtre d'extraction sont présentés à la figure suivante [01]



Comme cela est exposé dans la littérature, ces filtres d'extraction permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes. Ils n'ont pas donné entière satisfaction car [01] :

- Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En générale, la fréquence de coupure est choisie assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif lors de variations rapides de la charge.
- Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante.

• Principe du FMV :

mais les filtres d'extractions (Passe Bas Ou Passe Haut) permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante, Pour ces raisons, un nouveau type de filtre d'extraction nommé ici Filtre Multi Variable (FMV) a été développé, Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok [01][03], et est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, directement selon les axes α, β comme cela est présenté à la figure (II.4)

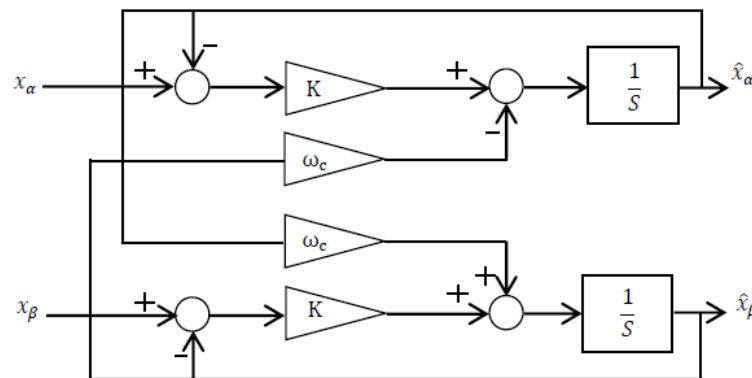


Figure II n°3: Schéma du FMV.

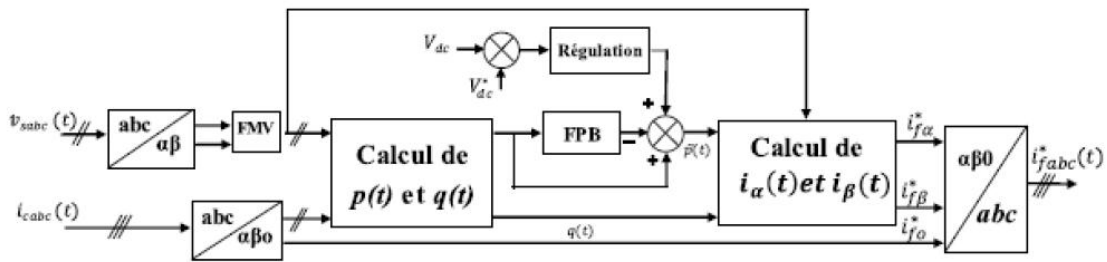
Selon les axes α, β , les expressions liant les composantes $\hat{X}_{\alpha\beta}$ sortie du FMV aux composantes d'entrée $X_{\alpha\beta}$ sont les suivantes

$$\widehat{x}_\alpha(s) = \left(\left(\frac{k}{s} [\widehat{x}_\alpha(s) - \widehat{x}_\alpha(s)] - \frac{w_s}{s} \widehat{x}_\beta(s) \right) \right) \quad (II.26)$$

$$\widehat{x}_\beta(s) = \left(\left(\frac{k}{s} [\widehat{x}_\beta(s) - \widehat{x}_\beta(s)] - \frac{w_s}{s} \widehat{x}_\alpha(s) \right) \right) \quad (II.27)$$

Où sont représentés par :

- : Le signal électrique d'entrée selon les axes.
- $\alpha - \beta$ de nature tension ou courant.
- \widehat{x} : Les composantes fondamentales de $x\alpha\beta$.
- K : Constante à fixer.
- $\omega c = 2\pi f$: Pulsation fondamentale du réseau [01][03].



La figure II n°4: illustre l'algorithme d'identification.

II.2.2.3 Méthode de référentiel synchrone avec FPB :

La méthode de référentiel synchrone, est appelée aussi méthode des courants instantanés d et q. Elle permet d'obtenir des meilleures performances même si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibré. La figure (2.6) représente le Schéma de principe de cette méthode Dans cette méthode les courants de la charge sont transformés dans le repère $\alpha\beta 0$ de Concordia avec la transformation C, puis dans le repère q de Park P(θ) de l'équation (2.26) pour obtenir $i_d(t)$ et $i_q(t)$.

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

$\theta = wt$ représente la position angulaire du repère tournant qui est une fonction linéaire de la pulsation angulaire. Ce repère de référence tourne à une vitesse constante en synchronisme avec les tensions triphasées [21]. Le courant dans ce repère peut être exprimé de la façon suivante:

$$i_d(t) = i_{dh}(t) + i_{df}(t) \quad (II.29)$$

$$i_q(t) = i_{qh}(t) + i_{qf}(t) \quad (II.30)$$

Réactive dans le repère dq, $i_{dh}(t)$ et $i_{qh}(t)$ représentent successivement les courants harmoniques sur l'axe d et l'axe q dans le même repère. Le courant de référence $i_{dh}(t)$ sera extrait dans ce repère à l'aide d'un FPB avec une boucle de retour. Avec la transformation inverse de Park $P^{-1}(\omega t)$ appliquée sur i_{dh} et i_q on obtient les courants $i_{f\alpha}^*$ et $i_{f\beta}^*$. Ensuite la transformation inverse de Concordia C^{-1} est appliquée sur $i_{f\alpha}^*$, $i_{f\beta}^*$ et $i_{f0}^* = i_0$ pour retrouver les courants de référence i_{fa}^* , i_{fb}^* et i_{fc}^* dans le repère triphasé.

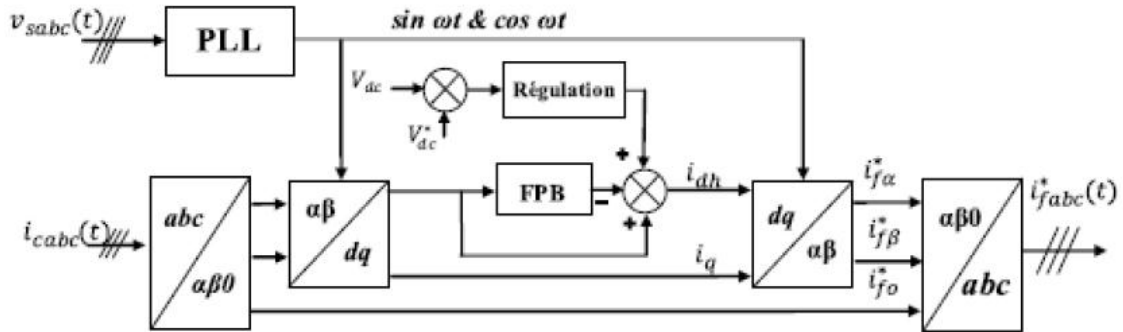


Figure II n°5: Identification par la méthode de référentiel synchrone avec FPB..

II.2.2.4 Régulation de la tension du bus continue :

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge et se décharge. La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante, à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance active entre la charge polluante et le réseau.

Les pertes dans les composantes de puissance font aussi varier la tension aux bornes de la capacité, d'où la nécessité de réguler cette tension de la maintenir à un niveau constant

- ✚ Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont [03] :
- ✚ 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.

Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire. Pour cela, nous pouvons utiliser un régulateur PI. Si nous négligeons les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme suivante [03] :

- ✚ La tension au borne de la capacité du bus continu est :

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int I_{dc} dt \quad (II.31)$$

en appliquant la transformé de Laplace on trouve :

$$V_{dc} = \frac{1}{SC_{dc}} I_{dc} \quad (II.32)$$

✚ La fonction de transfert du système est :

SC_{dc} , et la boucle de régulation par PI est montrée à la figure (2.8) [03]. La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit comme suit :

$$G_{BF} = \frac{\left(1 + \frac{k_p s}{k_i}\right) \frac{k_i}{c}}{s^2 + \frac{k_p}{c_{dc}} s + \frac{k_i}{c_{dc}}} \quad (II.33)$$

✚ L'expression générale d'une fonction de transfert du second ordre est :

$$G_{BF} = \frac{\left(1 + \frac{K_P s}{K_i}\right) \omega_c^2}{s^2 + 2\xi \omega_c s + \omega_c^2} \quad (II.34)$$

En comparant cette équation avec la forme générale, on trouve :

$$K1 = \omega_c^2 C_{dc} \text{ et } K_{pdc} = 2\xi \sqrt{C_{dc} K_i} \text{ tel que : } \omega_c = 2\pi f_c$$

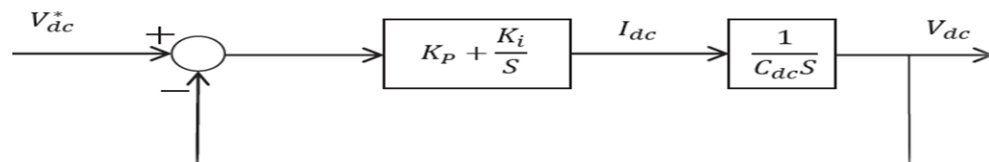
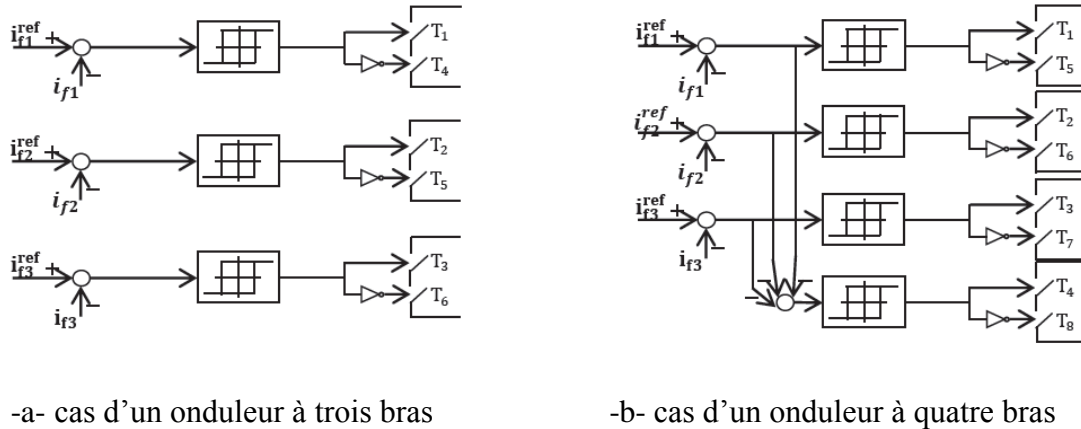


Figure II n°6: Boucle de régulation de la tension continue.

II.2.2.5. Contrôle de l'onduleur par hystérésis :

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure 2.8 expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence i_f et le courant produit par l'onduleur i . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs [03].



-a- cas d'un onduleur à trois bras

-b- cas d'un onduleur à quatre bras

Figure II n°7:Principe de la commande par hystérésis.

II.3 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la définition et la structure de filtre actif parallèle à quatre fils, cette structure partagée à deux parties: la partie de puissance et la partie de commande-contrôle, la partie de puissance est représentée par l'onduleur de tension, système de stockage de l'énergie et filtre de sortie, et la deuxième partie qui est la commande-contrôle représentée par la commande d'onduleur, régulation de la tension continue, l'identification des courants perturbés, plusieurs méthodes commandent sur l'onduleur. Dans ce chapitre nous avons choisi la commande par hystérésis.

Chapitre III:
Simulations et Interprétations
des Résultants

III.1. Introduction :

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

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

L'étude analytique de ce système est difficile et ne peut être menée, pour un point de fonctionnement donné, qu'avec des hypothèses simplificatrices importantes. C'est pour cette raison que la simulation numérique est devenue l'outil indispensable de l'étude de ces systèmes. Dans ce chapitre on propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, charges polluantes, redresseurs triphasés, filtre actif parallèle quatre bras sous l'environnement Matlab-Simulink. On donne et on interprète ensuite les résultats de simulation obtenus.

III.2. Schémas de simulation :

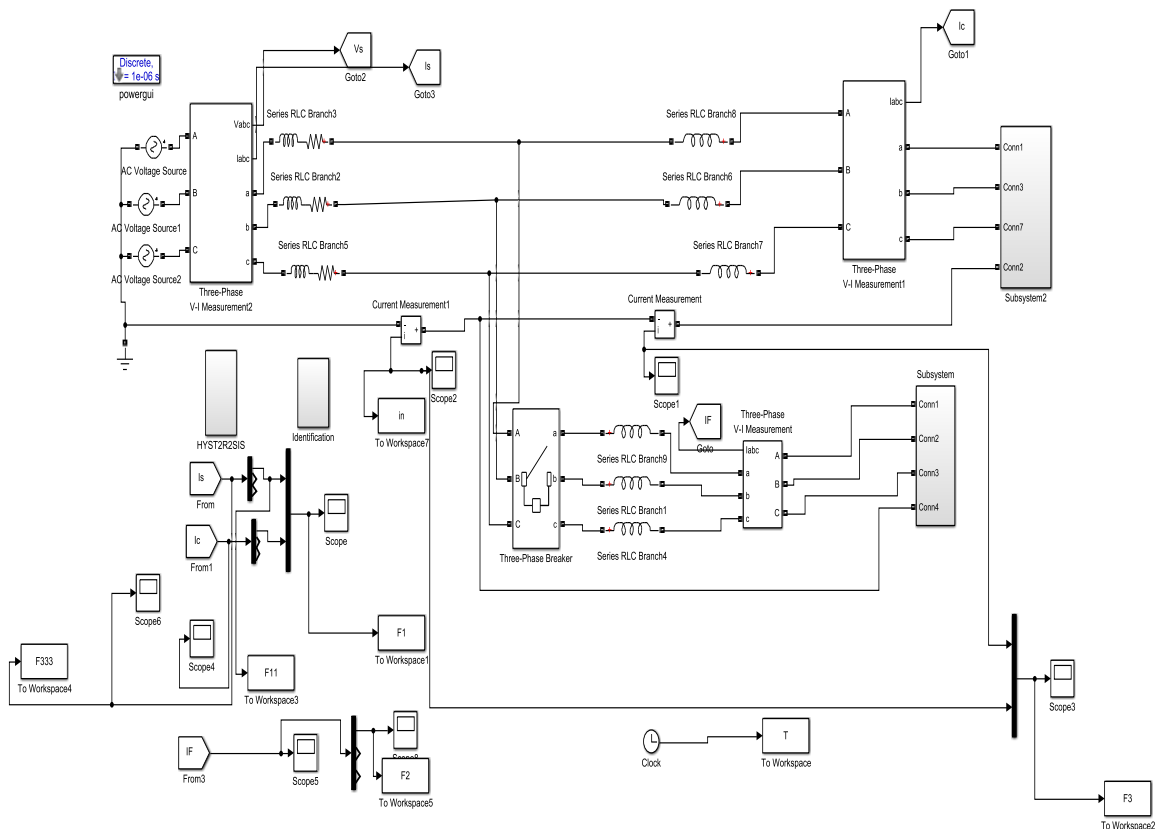


Figure III n°1: Schéma de FAP à quatre fils avec un onduleur à quatre bras sous Matlab-Simulink.

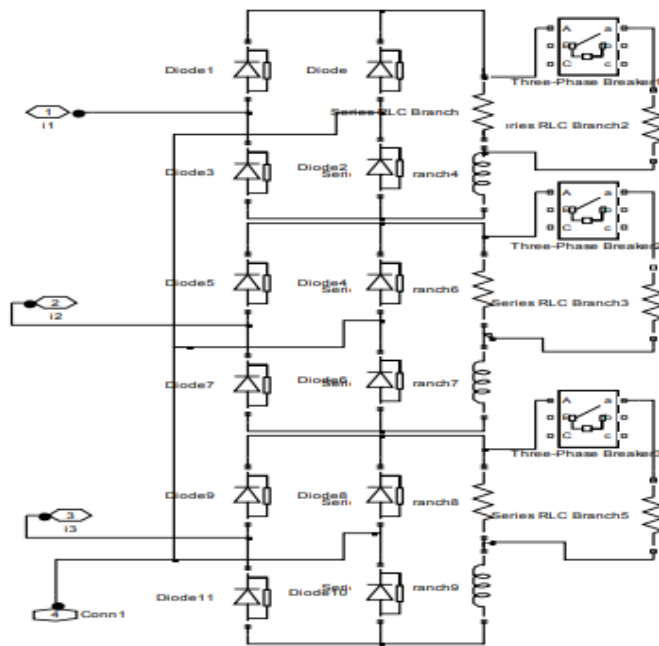


Figure III n°2: charges triphasées non linéaire sous Matlab- Simulink.

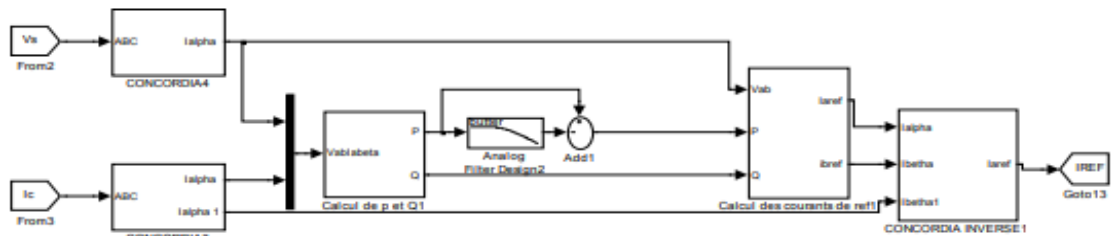


Figure III n°3: Identification par la méthode des puissances instantanées sous Matlab-Simulink.

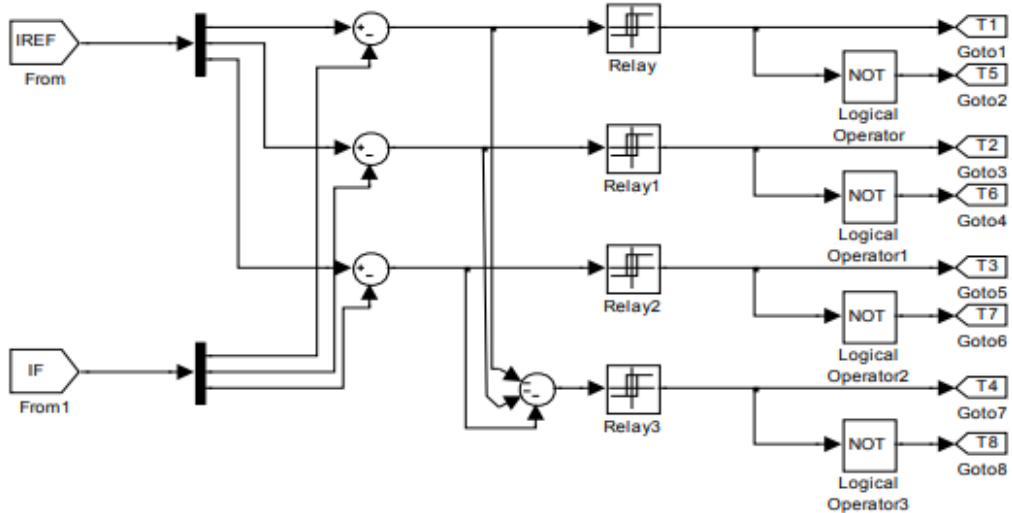


Figure III n°4: commande par hystérésis sous Matlab-Simulink

III.2.1. Paramètres de la simulation :

Pour simuler le modèle de l'association filtre actif-réseau-charge polluante de la figure(III.16) et figure(III.17) sous Matlab-Simulink, on a utilisé les paramètres suivants

$E[V]$	$F[Hz]$	$L_s[mH]$	$R_s[\Omega]$	$L_c[mH]$	$L_f[mH]$	$V_{dc}[V]$
94	50	2.3	0.42	1	3	200

Tableau III (n°1) : Paramètres du système étudié

Cas où les trois charges sont identiques

- $R_{d1} = R_{d2} = R_{d3} = 12.5\Omega$
- $L_{d1} = L_{d2} = L_{d3} = 200mH$.

Cas où les trois charges sont différentes :

- $R_{d1} = 12.5\Omega$, $R_{d2} = 8\Omega$, $R_{d3} = 17\Omega$
- $L_{d1} = 200mH$, $L_{d2} = 250mH$, $L_{d3} = 220mH$
-

III.2.2. Résultats des simulations sous Matlab-Simulink :**III.2.2.1. Cas de charge équilibrée :**

Dans ce premier cas nous avons pris un système de charge équilibré qui est utilisé pour deux filtres actifs à (trois ou quatre bras), c'est la raison pour laquelle nous ne tracerons que la courbe du courant de source de la phase 1, ainsi que le spectre d'harmonique de cette phase, les deux autres phases ont la même courbe de courant et le même spectre d'harmonique que ceux de la première phase. Les résultats des simulations du système étudié sont présentés sur les figures suivantes.

III.2.2.1.1. Cas de charge équilibrée avec un onduleur triphasé à quatre bras :

a- Les courbe avant et après filtrage :

A l'instant ($t=0.15$ s) on injecte le FAP

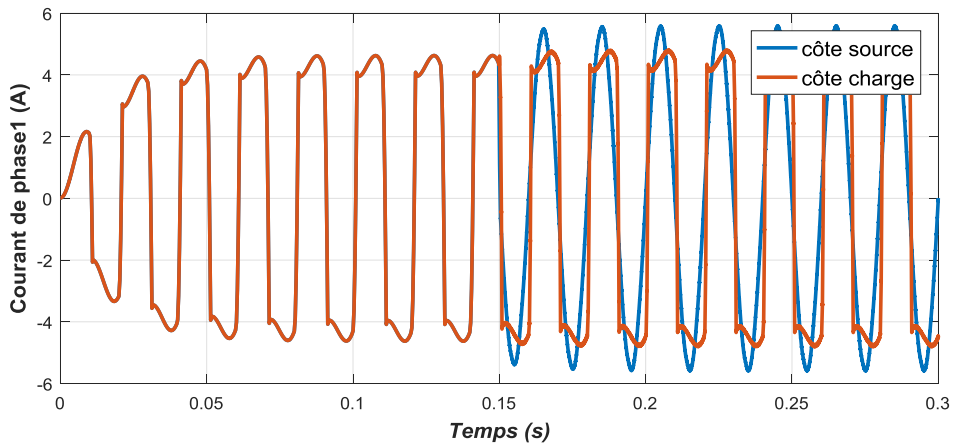
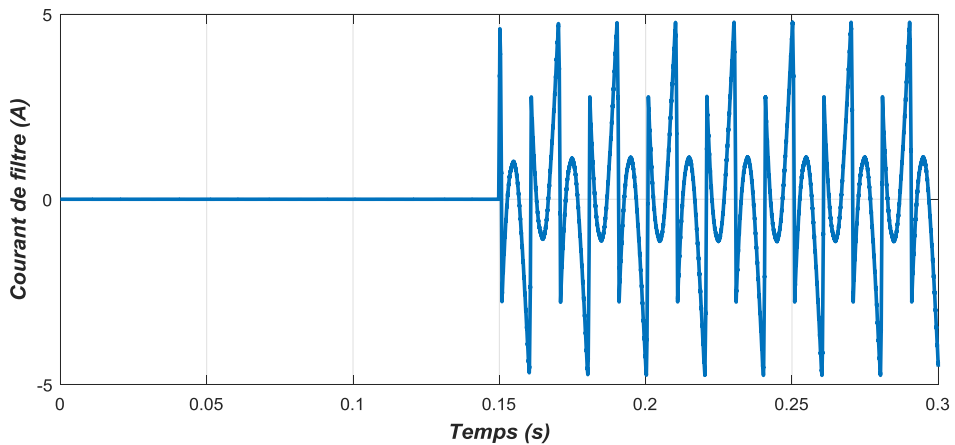


Figure III n°5 : Courant de source et de charge avant et après filtrage



FigureIII n°6 : Courant de filtre avant et après filtrage.

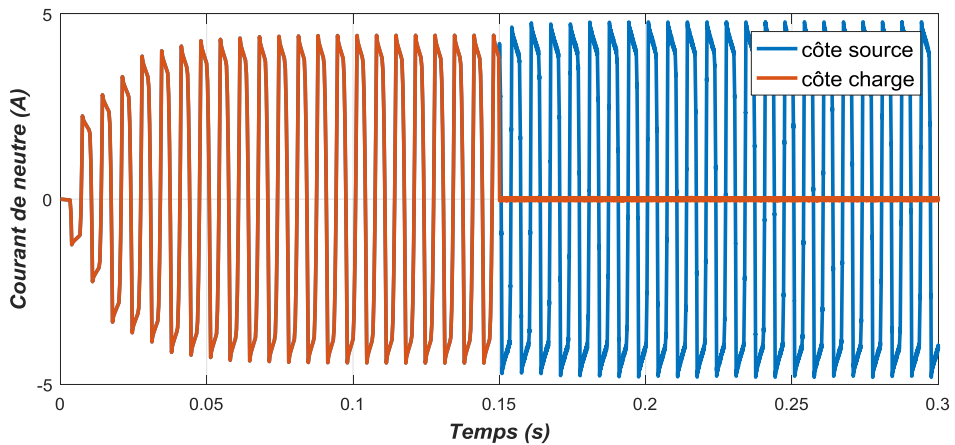
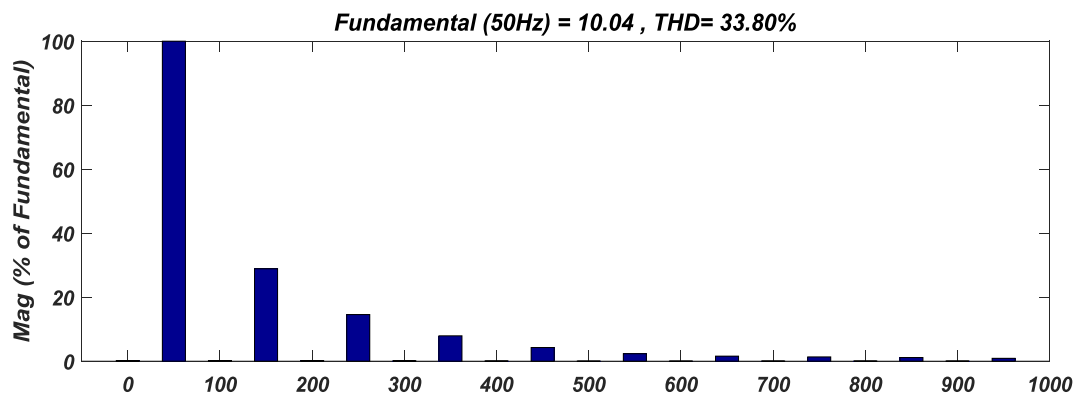
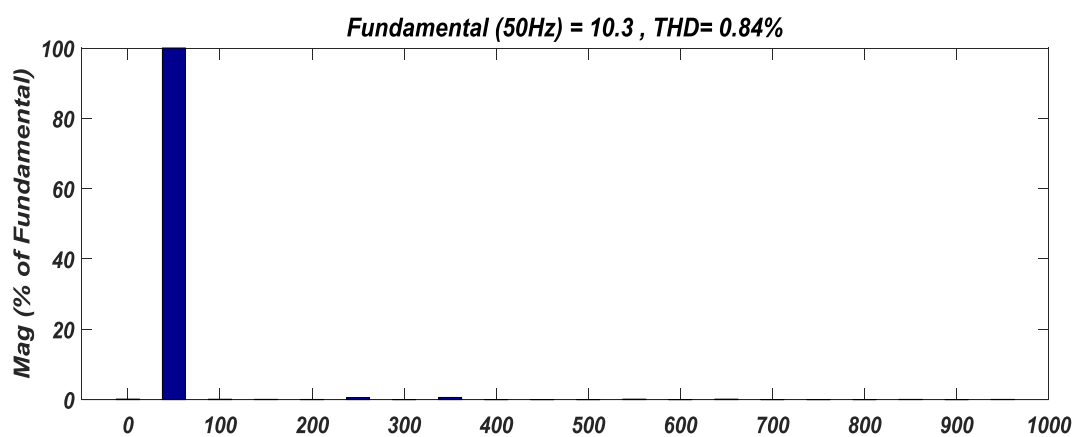


Figure III n°7: Courant de neutre côte source et côte charge avant et après filtrage.



a) Avant filtrage.



b) Après filtrage.

Figure III n°8: Spectre d'harmonique du courant de source.

b- Les courbes avant et après l'augmentation de la charge :

A l'instant ($t=0.2$ s) on a augmentée la charge.

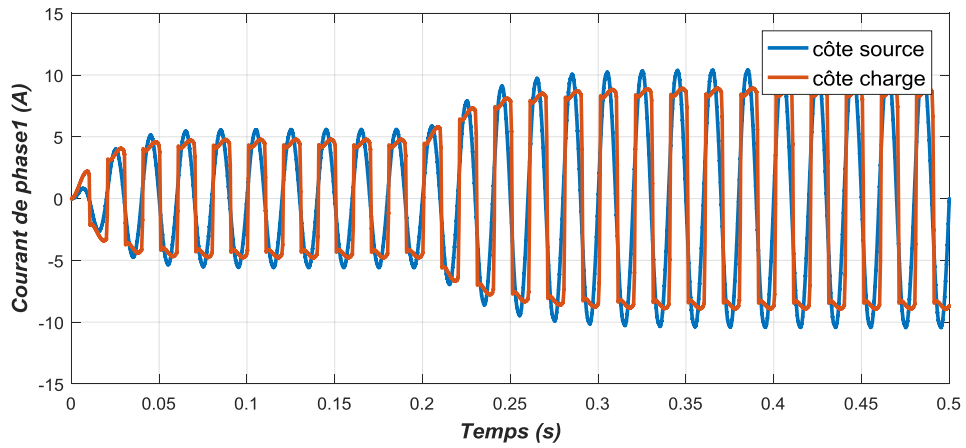


Figure III n°9: Courant de source avant et après l'augmentation de la charge .

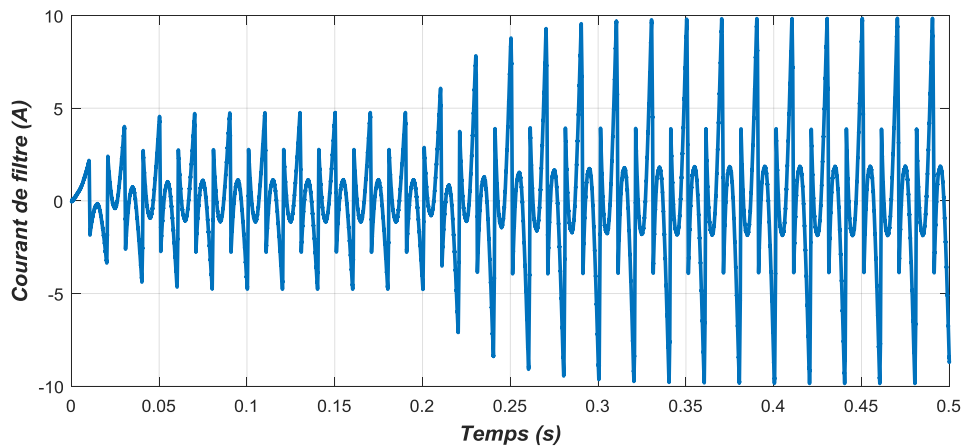


Figure III n°10 : Courant de filtre et après l'augmentation de la charge.

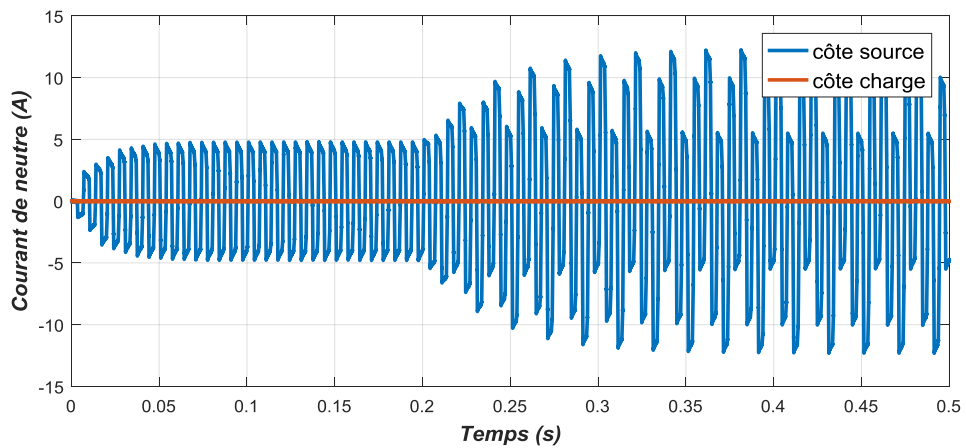
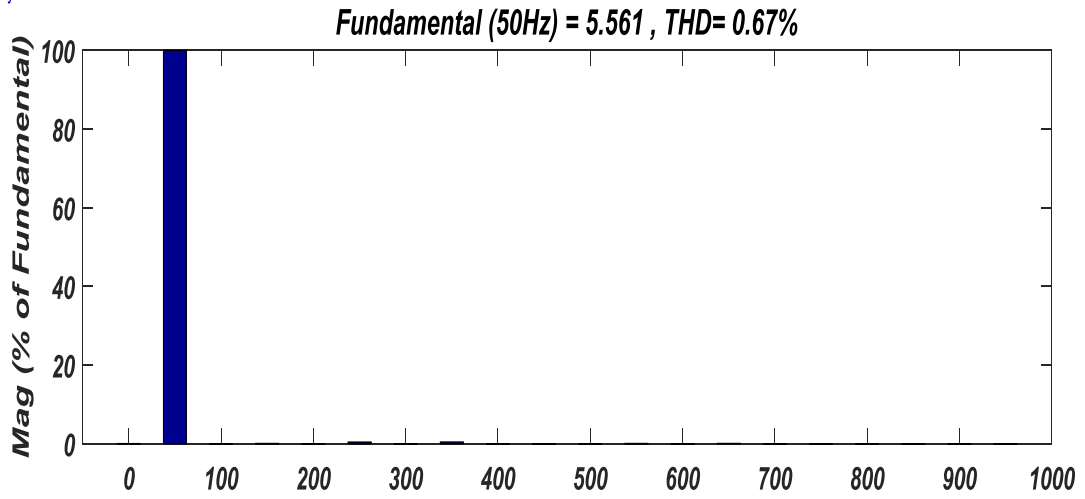
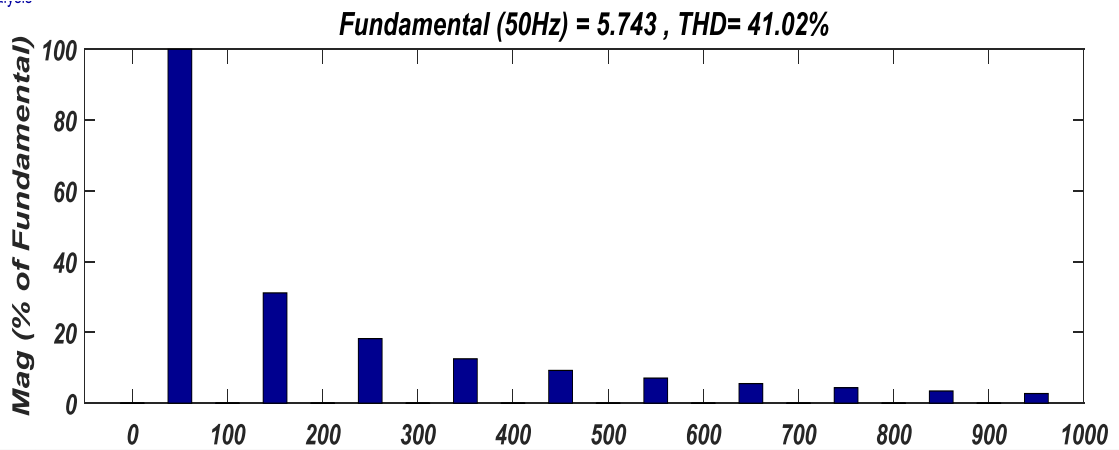


Figure III n°11: Courant de neutre avant et après l'augmentation de la charge.



a) Côté source



b) Côte charge

Figure III n°12: Spectre d'harmonique du courant après l'augmentation de la charge.

Dans le cas d'une charge équilibrée avec un onduleur à quatre bras, la forme des courants pour les trois phases, aussi bien que les spectres d'harmoniques, sont identiques. Il suffit de tracer la forme du courant pour la phase 1 uniquement.

Les figures (n°23, n°27) Avant l'insertion du filtre (avant 0.15s) : on observe le courant du côté charge et du côté source sont confondus et déformés et THD=33.80% est très élevé et dépasse à 5 %, la limite maximale admissible par la norme IEEE.

Après l'insertion du filtre (0.2 s à 0.5s) : le courant du côté charge est déformé, mais le côté source reste sinusoïdale et THD=0.93% (4 bras), sont inférieure à 5 %, (montré dans les figures n°26). Les figures (n°27) représentent l'étape de l'augmentation de la charge (0.2s à 0.5s) on observe le courant de source et de charge sont augmentés, les courants des côtés sources sont sinusoïdale et THD=0.84% (4 bras), sont inférieure à 5 %, (montré dans les figures n°26), mais dans les côtés charges sont déformés et THD=41.02% sont très élevés (montré dans les figures n°26)

Les figures n°24 représentent les courants injectés par le filtre on remarque : Avant l'insertion du filtre (avant 0.15 s) : le courant du filtre est nul, après l'insertion du filtre (après 0.15s) : le filtre injecte les courants harmoniques, mais dans les figures n°28 sont l'augmentation de la charge parmi (0.2s, 0.5s), on remarque le courant injectés par le filtre sont augmentés. Le figure n°25 montrent que le courant du neutre du côté source et de côté charge, on observe: le courant du neutre du côté source et côté charge ne sont pas nul malgré que la charge est équilibrée dans l'intervalle (0s,0.15s), mais après l'insertion du filtre (0.15 s,0.3s): on observe les courants du neutre du côté source sont nul et le courant de neutre du côté charge ne sont pas nul, dans l'intervalle (0.2s,0.5s) on observe le courant de neutre du côté charge sont augmentés.

III.2.2.2. Cas de charge déséquilibrée :

Dans ce deuxième cas nous avons pris un système de charges déséquilibré par le FAP avec un onduleur à quatre bras, c'est la raison pour laquelle nous tracerons les courbes du courant côté source et côté charge de chaque phase, ainsi que les spectres des harmoniques de chaque phase. Les résultats de simulation du système étudié sont présentés sur les figures suivantes : On injecte le FAP à t=0s.

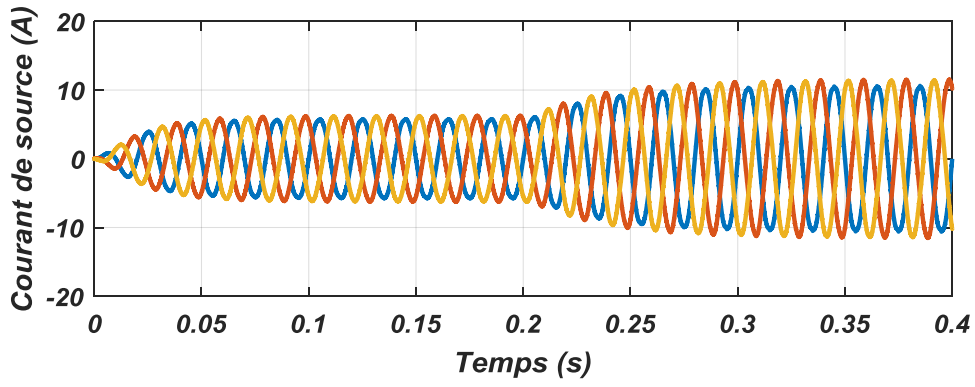


Figure III n°13: Courant de côté source.

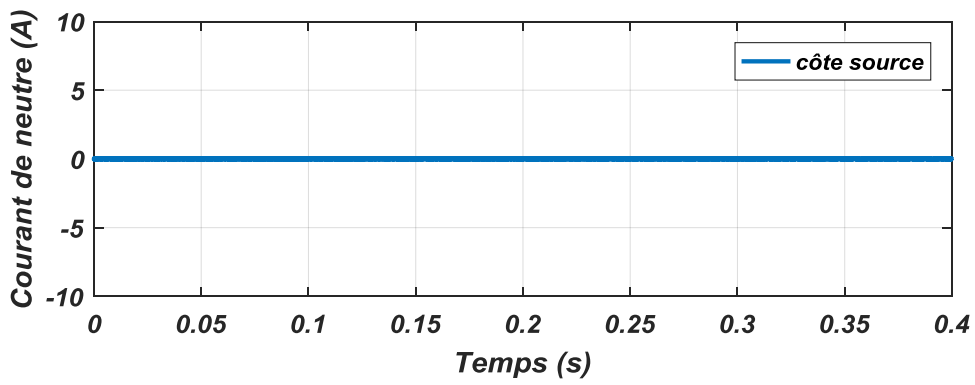
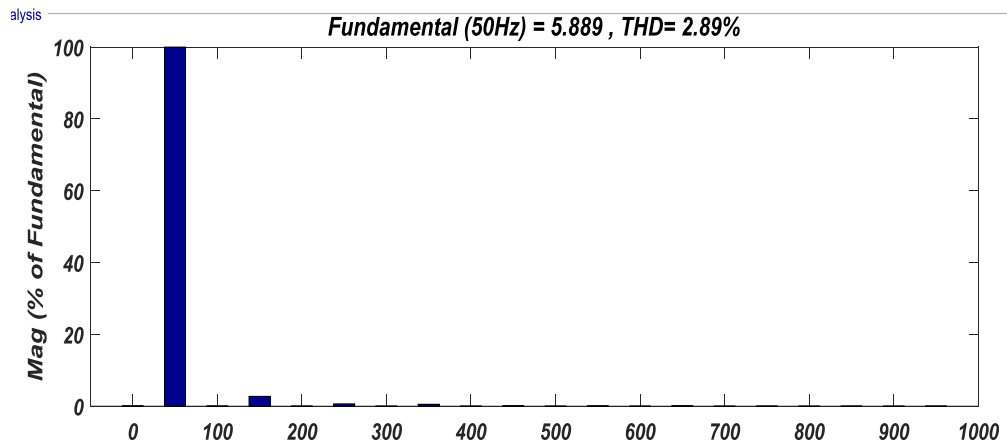
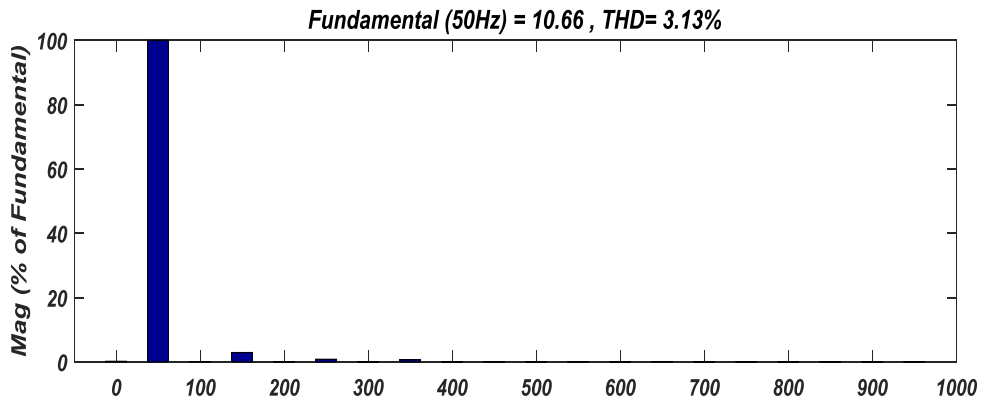


Figure III n°14 : Courant de neutre.

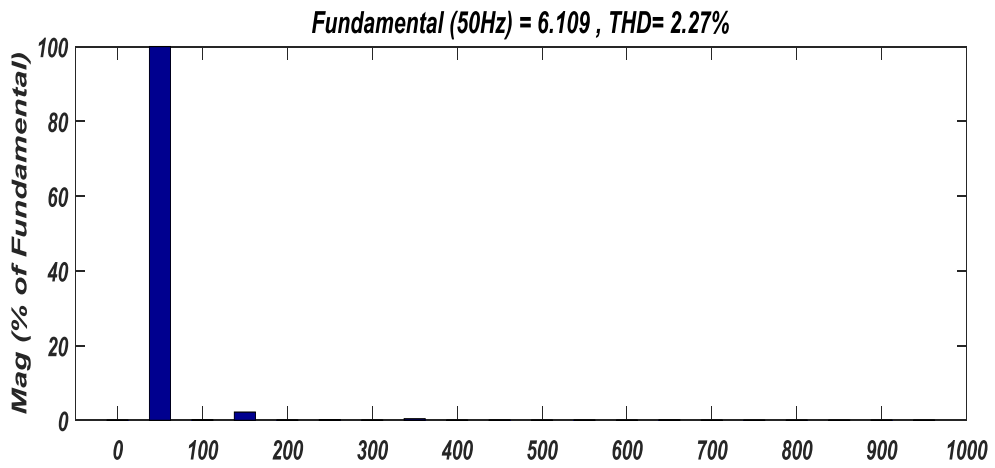


a) Avant l' augmentation

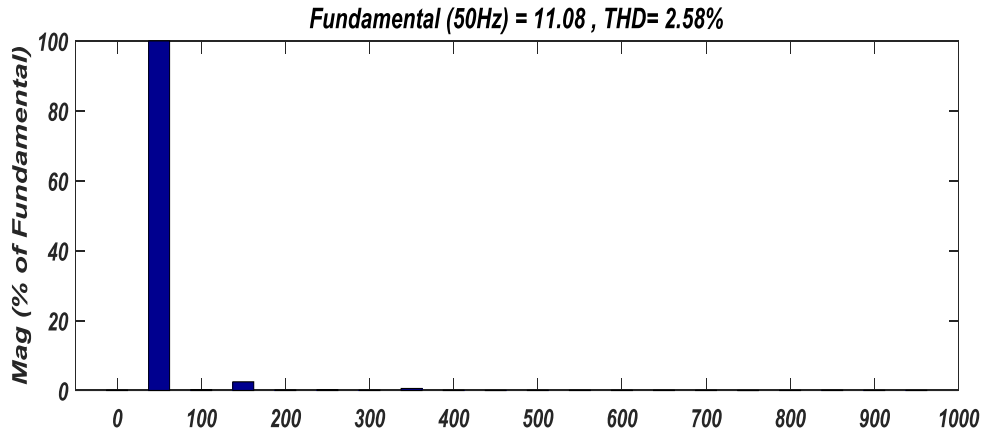


b) Après l' augmentation

Figure III n°15: Spectre d'harmonique du courant de la phase 1

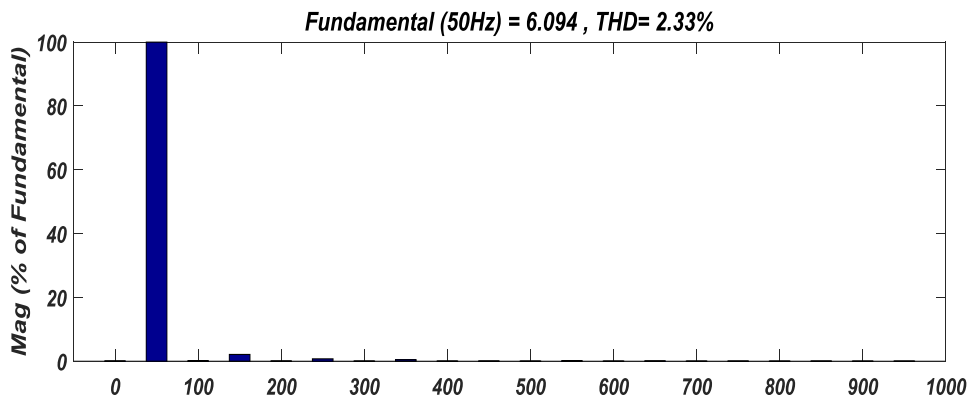


a) Avant l' augmentation

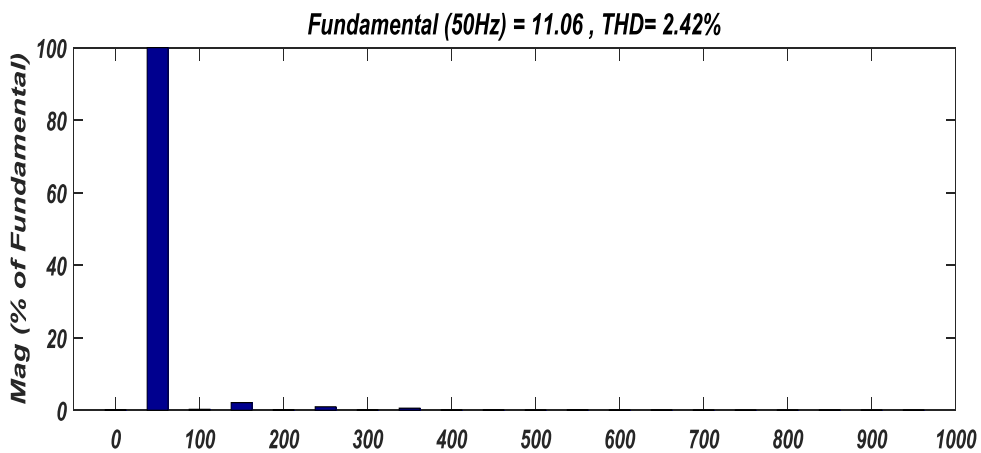


b) après l'augmentation

Figure III n°16: Spectre d'harmonique du courant de la phase 2



a) Avant l' augmentation



b) Après l'augmentation

Figure III n°17 : Spectre d'harmonique du courant de la phase 3.

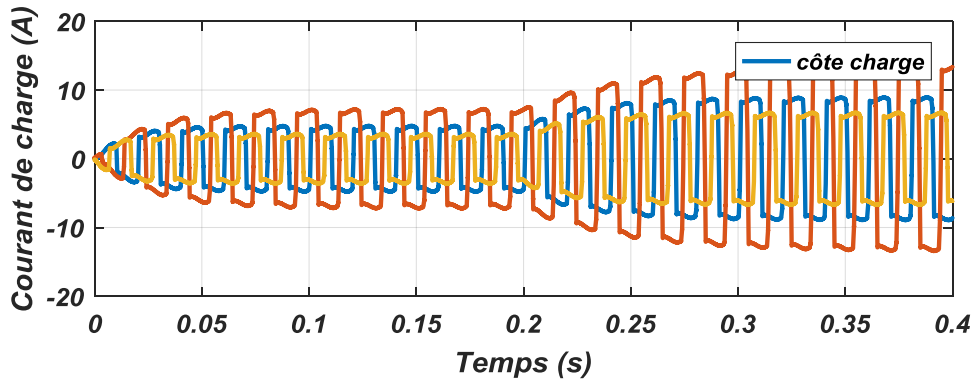


Figure III n°18 : Courant de côte charge

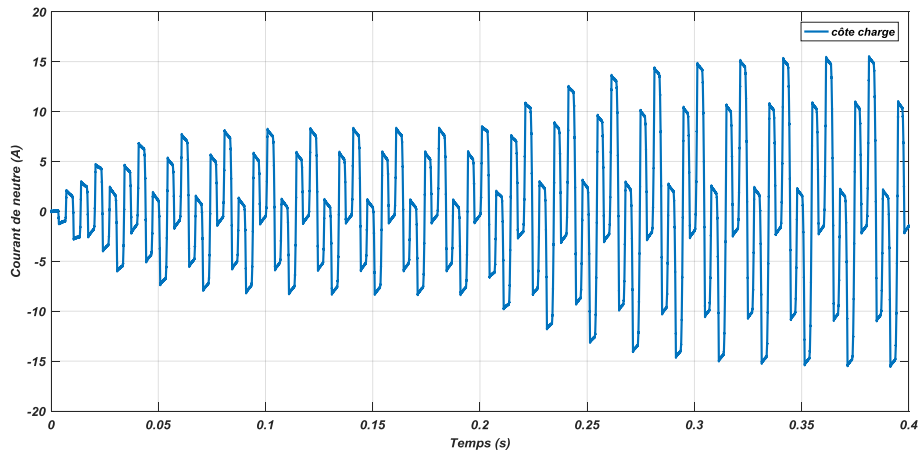


Figure III n°19 - Courant de neutre.

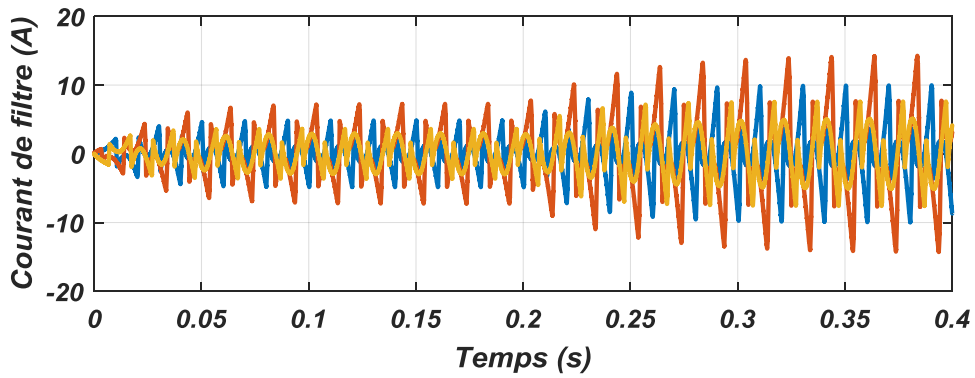
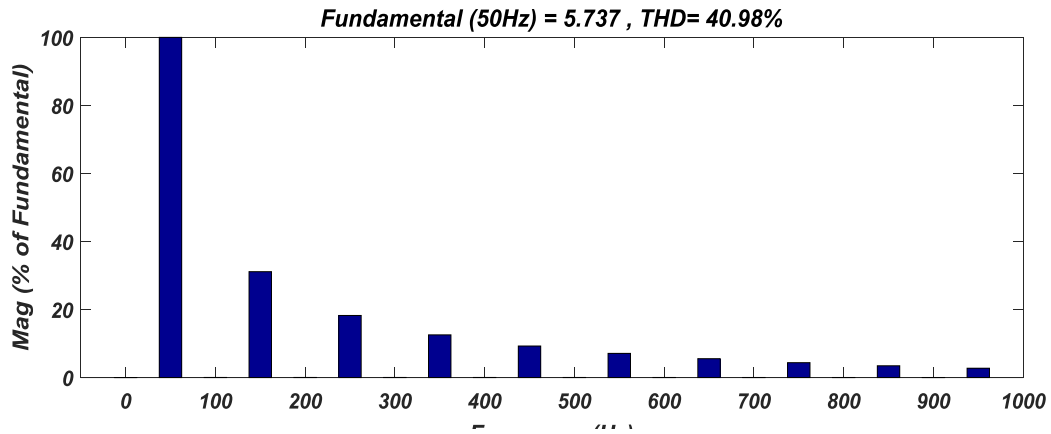
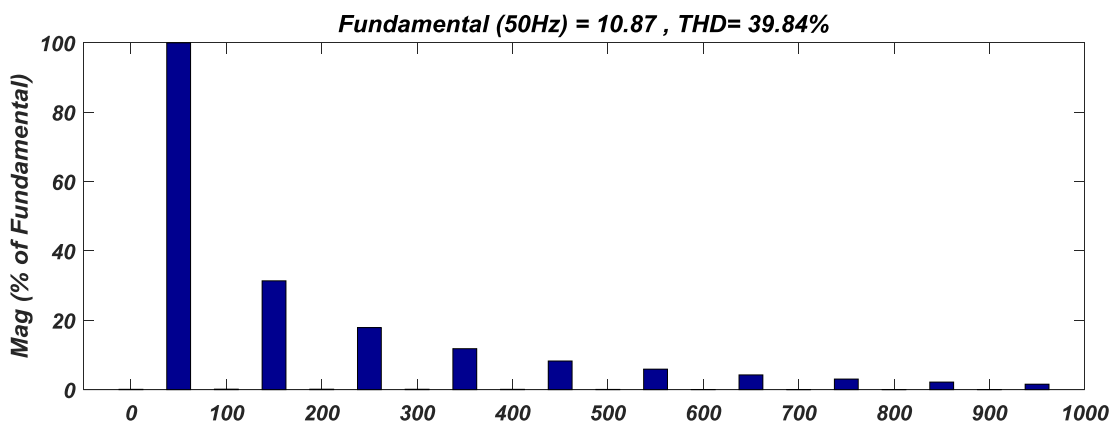


Figure III n°20 - Courant de filtre.

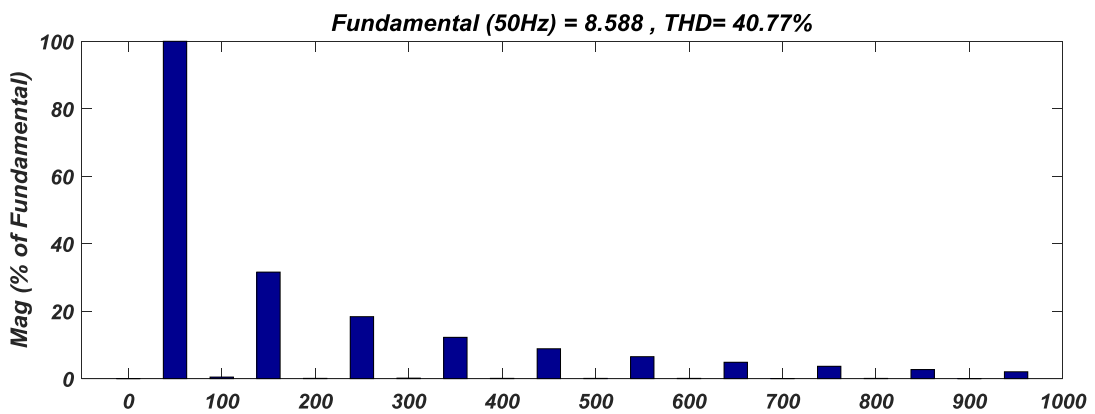


a) avant l' augmentation

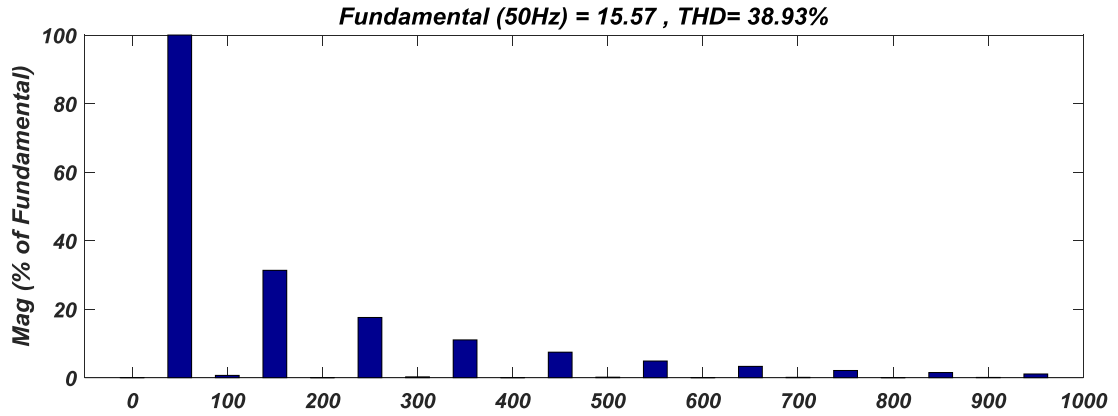


b) après l' augmentation

Figure III n°21: Spectre d'harmonique du courant de la phase 1

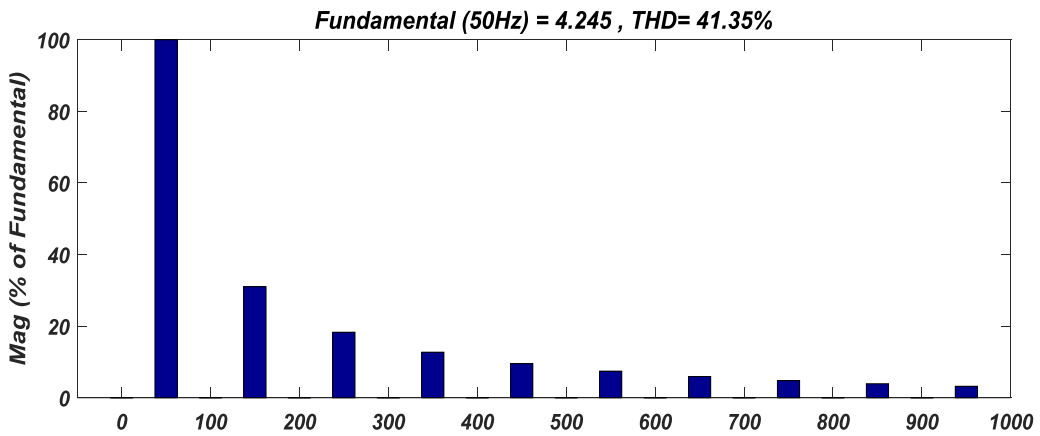


a) avant l' augmentation

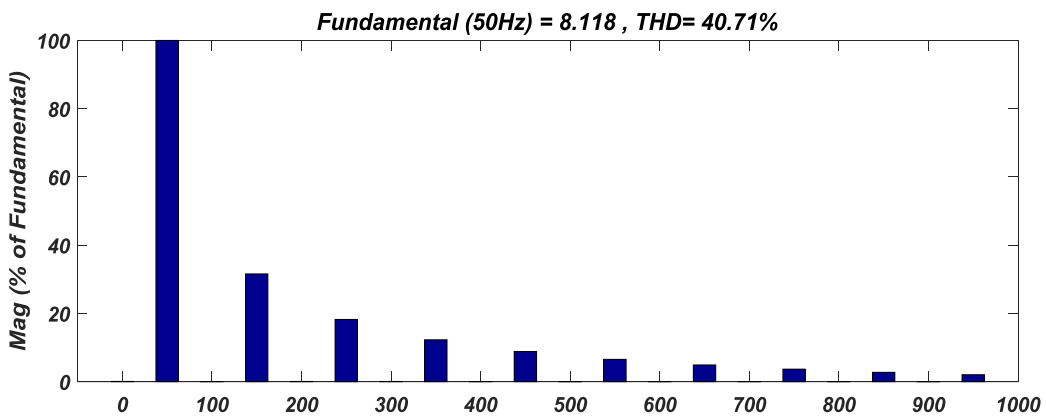


a) après l' augmentation

Figure III n°22: Spectre d'harmonique du courant de la phase 2



a) avant l' augmentation



b) après l' augmentation

Figure III n°23: Spectre d'harmonique du courant de la phase 3

La figure (n°35) représente les courants du côté source de trois phases où nous notons: avant l'augmentation (0s-0.2s):

les courants de trois phases sont sinusoïdale. Après l'augmentation (0.2s-0.4s): les courants de trois phases sont augmentés et sauvées sur la propriété sinusoïdale. La figure (n°36) montre que le courant de neutre du côté source est nul. Les figures (n°37, n°38 et n°39) représentent les taux de distorsion harmonique des courants du côté source de trois phases avant et après l'augmentation de la charge, THD on peut voir qu'il est très faible et inférieur 5 %. La figure (n°40) représente les courants du côté charge de trois phases où nous notons: avant l'augmentation (0s-0.2s): les courants de trois phases sont déformés, après l'augmentation (0.2s-0.4s): les courants de trois phases sont augmenté ensauvées la propriété déformable. La figure (n°41) montre que le courant de neutre du côté charge n'est pas nul est augmenté dans l'intervalle (0.2s-0.4s) après l'augmentation de la charge. La figure (n°42) représente le courant de filtre où nous notons: le filtre est injecté le courant harmonique (est insertion du filtre), il est augmenté dans l'intervalle (0.2s-0.4s) Le tableau (n°18): représente le résumé de la valeur du taux de distorsion harmonique du courant obtenir.

III.3. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté et commentée les résultats de simulation du FAP à quatre fils, Ainsi le filtrage était très bon dans les différents cas examinés. La topologie à quatre bras lorsqu'elle est utilisée dans un FAP donne de meilleurs résultats car l'onduleur à quatre bras pilote les trois courants de phase et celui du neutre.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, le filtre actif parallèle à quatre fils a été étudié en vue d'améliorer la qualité d'énergie dans les réseaux basse tension par la réduction des courants harmoniques créée par les charges non-linéaires. Différents cas de charges (équilibré, déséquilibré et variation de charge) ont été examinés. La méthode des puissances instantanées est utilisée dans la phase d'identification, la commande par hystérésis connue par son efficacité, mais aussi par sa fréquence de commutation variable est adoptée dans la phase de commande du FAP à quatre fils. topologie de l'onduleur de tension du FAP sont examinées : topologie à quatre bras.

On a effectué, dans le premier chapitre, une étude théorique sur la problématique des perturbations électriques, en se concentrant sur les harmoniques générées par des charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. On a ensuite présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées dans le filtrage. Dans le second chapitre, on a présenté en détail les différents éléments constituant le filtre actif parallèle à quatre fils, dont les deux grandes parties s'appellent : partie de puissance et partie de commande. Finalement, la structure complète du filtre actif parallèle a été simulée à partir du logiciel MATLAB/Simulink dans le troisième chapitre.

On peut conclure de ce travail que le filtrage actif parallèle à quatre fils permet une réduction significative des harmoniques du courant quelque soit la charge (équilibrée, déséquilibrée ou variation de charge). Le courant fourni par la source après filtrage est toujours sinusoïdale presque dépourvue des harmoniques dans tous les cas des simulations, avec un THD max qui ne dépasse pas 5 % ; la valeur maximale ordonnée par la norme IEEE.

Toutefois, on a constaté que l'efficacité du filtre est meilleure avec l'onduleur à quatre bras. L'identification par la méthode des puissances instantanées, utilisée dans ce travail, est largement utilisée, car elle offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. On a constaté qu'elle donne de très bonnes performances. Enfin et pour continuer ce travail, on propose de faire les simulations dans le cas d'un système monophasé, et d'examiner d'autres méthodes d'identification afin de comparer les résultats de l'identification obtenus dans ce travail avec ceux des méthodes d'identification nouvelles. On peut aussi aborder dans un autre travail le filtrage dans le cas d'un réseau est perturbé, en examinant les cas des perturbations abordées dans le premier chapitre de ce travail.

Bibliographie

- [1]S. BEN ALI et S. BOUHANAK «Etude et Simulation d'un Filtre Active Parallèle à Quatre Fils». Mémoire de master, Université echahid hama lakhder d'el-oued , 2015.
- [2]T. MAHNI «Etude et Conception d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé à Quatre Fils envue de sa Commande par des Méthodes d'Intelligence Artificielle». Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [3]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.
- [4]L. ZELLOUMA. « Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif » Thèse de doctorat. Université badjimokhtarannaba , 2010
- [5] F. HAMOUDI. « Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt à Quatre Fils ». Mémoire deMagister, Université de Batna, 2008.
- [6]I. EXEBERRIA-OTADUI. « Evaluation of Different Strategies for Series Voltage Sag Compensation ». IEEE, P. 1797-1802, 2002.
- [7]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 20302005 ,2037-
- [8] 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
- [9]T. DEFLANDRE et P. MAURS. « Les Harmoniques sur les Réseaux Electriques.» Direction des Etudes et Recherche en France -Edition EYROLLES, 1998.
- [10]L. ZELLOUMA. « Filtrage actif Parallèle des Harmoniques du Courant Génères Par unPont Redresseur Triphasé non Command'é ». Mémoire de magister, Université de BadjiMokhtar, Annaba, 2006.
- [11]C. COLLOMBET J. M. LUPIN Et J. SCHONEK. « Perturbations Harmoniques dans les Réseaux Pollués et Leur Traitement ». Extrait du Cahier technique n° 152, SchneiderElectric, 1999.
- [12]C. COLLOMBET, J. LUPIN et J. SCHONEK. «Perturbations Harmoniques dans lesRéseaux Pollués, et Leur Traitement»,Cahier Technique Schneider Electric n° 152, 1999.

- [13]S .BOUGUERRA et I.BOURENNANE. « Filtrage Actifs Parallèles des RéseauxElectriques avec Compensation de l'Energie Réactive ». Mémoire d'ingénieur d'état en génieélectrotechnique, Université de m'sila,2007.
- [14]S. BERNARD et G. TROCHAIN. « Deuxième Génération de Compensateur Actif d'Harmoniques Forte Capacité Bas'é sur le Mode d'Injection du Courant ». MGE UPS SYSTEMS MGE0121UKI, p. 3 ,1998.
- [15]I. GHADBANE. « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs ». Mémoire de magistère, Université Mohamed Kheider-Biskra, 2009.
- [16]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.
- [17]Y. PAL et A. SWARUP. « A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power QualityImprovement ». Conference on Power System Technology and IEEE Power IndiaConference (POWERCON), p. 1-8, 2008
- [18] A.HAMIDI. « Contribution à l'Etude du Filtre Hybrides de Puissance Utilisé pour Améliore la Qualité de l'Energie dans les Réseau Electrique de Distribution » Thèse de doctorat ,Ecole de technologie supérieure –Québec, canada ,2010.
- [19]Y. PAL et A. SWARUP. « A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power QualityImprovement », Conférence on Power System Technology and IEEE Power India Conférence (POWERCON), p. 1-8, 2008.
- [20] M. C. BENHABIB. « Contribution à l'Etude des Différentes Topologies et Commandes des Filtres Actifs Parallèles à Structure Tension, Modélisation, Simulation et Validation Expérimentale de la Commande ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy France, 2004
- [21] B. OUAHID. « Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux ». Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [22]H. DJEGHLOUD. « Filtrage Actif de Puissance ». Thèse de doctorat, Université de Mentouri-Constantine, p. 3, 2007.
- [23]D. NEKKAR. « Contribution à l'Etude des Stratégies de Commande des Filtres ActifsTriphasés ». Mémoire de magister, Université de Souk-Ahras, 2014.

[24]H. AKAGI, S. OGASAWARA and H. KIM. « The Theory of Instantaneous Power in Three-Phase Four-Wire Systems and its Applications ». Electrical engineering in Japan, V 135 .p. 74-86, 2001.

[25]L. ZELLOUMA. « Filtrage Actif parallèle des Harmoniques du Courant Générés par un Pont Redresseur Triphasé non Commandé ». mémoire de magister. Université badjimokhtarannaba, 2006.