

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : (Electrotechnique)

Spécialité : (Commande Electrique)

Par : SELKA Mohammed et TALEB Abderrahmane Mortada

Sujet

**Etude et Simulation d'un filtre actif de puissance hybride
constitué d'un filtre actif de puissance série associé
à un filtre de puissance passif**

Soutenu en ligne, le / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

| | | | |
|----------------------------------|-------|---------------|--------------|
| M. MELIANI Sidi Mohammed | Pr | Univ. Tlemcen | Président |
| GHLAM. Karima | Dr | Univ. Tlemcen | Examineur |
| M. BRIKCI NIGASSA Mohammed Amine | M.A.A | Univ. Tlemcen | Encadreur |
| M. BENHABIB Mohamed Choukri M. | M.C.A | Univ. Tlemcen | Co-Encadreur |

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nos remerciements s'adressent avant tout à l'Éternel Dieu Tout-Puissant, Maître du temps et des circonstances qui, dans son amour, nous fait vivre et nous rend vainqueur. Gloire à lui, et louange éternelle.

A nos parents pour le mérite d'être venu au monde, leurs soins et leurs instructions si précieuses.

Nous remercions tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation sans exception.

Et enfin nos remerciements s'adressent également à tous nos amis de promotion électrotechnique 2021/2022 ainsi qu'à l'ensemble des personnes qui ont contribué de près ou de loin pour réaliser ce travail.

Dédicace

N*ous dédions ce modeste travail :*

A *nos parents, Nos frères et*

A *tous les membres de nos familles*

A *tous nos amis*

A *la promotion 2021/2022 de deuxième année Master
Commandes Electriques*

M. SELKA & M. A. TALEB

Introduction
Générale

L'évolution de la demande énergétique mondiale est due principalement au développement croissant de l'industrie ainsi qu'à la croissance démographique, rendant la gestion de la qualité de l'énergie électrique de plus en plus difficile principalement par l'avènement de la production énergétique décentralisé.

L'utilisation de plus en plus d'équipement à base d'électroniques de puissance a comme conséquence l'injection de courants harmoniques au niveau du réseau électrique qui à son tour mettra à disposition aux charges une énergie polluée d'où l'intérêt d'éliminées toutes les types de perturbations qu'elles soient de nature tension ou courant pour un meilleur rendement des charges connectés.

La qualité de l'alimentation est très importante pour le fonctionnement des appareils électriques, domestique, médical ou industriel. Cette qualité est très fragile et peut être affectée par des perturbations à l'intérieur comme à l'extérieur de la ligne du Production. Les perturbations peuvent se présentée sous deux types : courant ou tension, pouvant affecter les processus industriels ou provoquée la destruction d'appareils électriques.

Pour minimiser ou éliminer ces perturbations, plusieurs méthodes ont été proposées, parmi ces méthodes, on peut citer celles qui traites les perturbations de type tension tel que les filtres actif série ainsi que le filtre actif de puissance série hybride qui prennent en charge à la fois les perturbations de type de tension et l'élimination de certains courant harmonique.

Notre mémoire est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre introduira certaines définitions relatives à la qualité de l'énergie, avec la définition des perturbations pouvant apparaitre dans le réseau électrique, en plus de la présentation des principales charges émettrices d'harmoniques, ainsi que les solutions proposées pour leur élimination.

Le chapitre deux, nous permettra d'étudier la structure générale du filtre actif série (FAS), dédié à la compensation des harmoniques de type tension. Le FAS est divisé en deux parties : la première désigne la partie puissance et la seconde la partie commande. La structure de première partie sera détaillée, pour ce qui est de la seconde partie, nous présenterons les méthodes d'identification des composantes harmoniques de la tension du cas d'étude d'un réseau pollué, il s'ensuivra une série de simulations qui mettra en évidence les performances de notre FAS.

Le chapitre trois portera sur l'étude combiné d'un filtre passif et d'un filtre actif de puissance série appelée communément filtre actif de puissance hybride. Nous nous proposons de diviser notre travail en trois, à savoir : une première partie s'intéresse aux filtres passifs résonnants, leurs configurations et le calcul des différents éléments les constituants suivis par une série de simulation. La deuxième partie sera consacré à l'étude des performances du filtre actif hybride (FAH) à travers une série de simulation.

Liste des Figures

Chapitre I : Qualité de l'énergie électrique

| | | |
|------------|--|----|
| Figure I.1 | Creux de tension. | 6 |
| Figure I.2 | Synthèse d'un signal à partir des harmoniques. | 10 |
| Figure I.3 | Différents types de filtres amortis | 11 |
| Figure I.4 | Filtre actif parallèle | 12 |
| Figure I.5 | Filtre actif série | 13 |
| Figure I.6 | Filtre actif de puissance hybride | 13 |

Chapitre II : Filtre actif de puissance série

| | | |
|--------------|--|----|
| Figure II.1 | Schéma de l'onduleur de tension triphasé | 17 |
| Figure II.2 | Transformateur d'injection de notre réseau | 18 |
| Figure II.3 | Structure générale du filtre actif série | 19 |
| Figure II.4 | Topologie d'un redresseur triphasé à MLI de tension | 20 |
| Figure II.5 | Schéma fonctionnel de base d'une PLL | 22 |
| Figure II.6 | Schéma fonctionnel d'une PLL | 23 |
| Figure II.7 | Schéma principe de la commande | 23 |
| Figure II.8 | Schéma de principe d'une P.L.L classique | 25 |
| Figure II.9 | Principe de commande par hystérésis | 26 |
| Figure II.10 | Commande des interrupteurs par hystérésis | 26 |
| Figure II.11 | Tension de sortie (filtrée) de l'onduleur commandé par régulateur à hystérésis | 27 |
| Figure II.12 | Model de notre cas d'étude de simulation du réseau | 27 |
| Figure II.13 | Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c suite à une chute de tension | 28 |
| Figure II.14 | THD de la tension de charge (chute tension) | 29 |
| Figure II.15 | Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c suite à sur tension | 30 |
| Figure II.16 | THD de la tension de charge (surtension) | 30 |
| Figure II.17 | Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c suite à un déséquilibre | 31 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Figure II.18 | THD de la tension de charge (déséquilibre de tension) | 31 |
| Figure II.19 | Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c suite à Harmonique | 32 |
| Figure II.20 | THD de la tension de charge (harmonique) | 32 |

Chapitre III : Etude et simulation d'un filtre hybride série

| | | |
|---------------|--|----|
| Figure III.1 | Structure d'un filtre résonant | 36 |
| Figure III.2 | L'allure d'une impédance harmonique | 37 |
| Figure III.3 | Filtre amortis | 38 |
| Figure III.4 | Inductance anti-harmonique | 39 |
| Figure III.5 | Le circuit électrique avec les filtres passifs | 41 |
| Figure III.6 | Signal du courant de charge | 41 |
| Figure III.7 | THD du courant de charge avant filtrage | 41 |
| Figure III.8 | Signal du courant de charge après filtrage d'Harmonique 5 | 42 |
| Figure III.9 | THD du courant de charge après filtrage d'Harmonique 5 | 42 |
| Figure III.10 | Forme du signal courant après filtrage de 7 ^e Harmonique | 42 |
| Figure III.11 | THD du courant de charge après filtrage d'Harmonique 7 | 42 |
| Figure III.12 | Signal du courant de charge après filtrage les deux Harmonique | 43 |
| Figure III.13 | THD du courant de charge après filtrage les deux Harmoniques | 43 |
| Figure III.14 | Configurations de filtres hybrides | 44 |
| Figure III.15 | Filtre actif série avec filtre passif parallèle | 45 |
| Figure III.16 | Filtre actif hybride avec transformateur | 46 |
| Figure III.17 | Filtre actif hybride sans transformateur | 47 |
| Figure III.18 | Filtre hybride composé d'un filtre actif shunt et un filtre passif parallèle | 48 |
| Figure III.19 | Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif | 48 |
| Figure III.20 | Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif | 49 |

| | | |
|---------------|---|----|
| Figure III.21 | Model de simulation FAS+FP | 50 |
| Figure III.22 | Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c suite à une chute de tension de 10% | 51 |
| Figure III.23 | THD du tension hybride (chute tension) | 51 |
| Figure III.24 | Evolution des courant I_s , I_{inj} et I_c suite à une chute de tension de 10% | 52 |
| Figure III.25 | THD du courant hybride (chute tension) | 52 |
| Figure III.26 | Filtre hybride : Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c suite à une sur tension de 10% | 53 |
| Figure III.27 | THD du tension hybride (sur tension) | 53 |
| Figure III.28 | Evolution des courants I_s , I_{inj} et I_c suite à une surtension de 10% | 54 |
| Figure III.29 | THD du courant hybride (sur tension) | 54 |
| Figure III.30 | Filtre hybride : Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c déséquilibre | 55 |
| Figure III.31 | THD du tension hybride (déséquilibre) | 55 |
| Figure III.32 | Evolution des courant I_s , I_{inj} et I_c suite à un déséquilibre | 56 |
| Figure III.33 | THD du courant hybride (déséquilibre) | 56 |
| Figure III.34 | Filtre hybride : Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c Harmonique | 57 |
| Figure III.35 | THD du tension hybride (harmonique) | 57 |
| Figure III.36 | Filtre hybride : Evolution des courants I_s , I_{inj} et I_c Harmonique | 58 |
| Figure III.37 | THD du courant hybride (harmonique) | 58 |
| Figure III.38 | Les valeurs numériques des différents courants harmoniques avant le filtrage | 59 |
| Figure III.39 | Les valeurs numériques des différentes tensions harmoniques avant le filtrage | 59 |
| Figure III.40 | Les valeurs numériques des différentes tensions harmoniques après le filtrage | 60 |
| Figure III.41 | Les valeurs numériques des différents courants harmoniques après le filtrage | 60 |

Glossaire

| | |
|-------------------------------------|--|
| <i>FAP</i> | : Filtre Actif Parallèle |
| <i>FAS</i> | : Filtre Actif Série |
| <i>FAH</i> | : Filtre actif hybride |
| <i>CRE</i> | : Commission de régulation de l'énergie |
| <i>MLI</i> | : Modulation en largeur d'impulsions |
| <i>m_s</i> | : Pulsation de la tension du réseau |
| <i>δ_d</i> | : L'angle de la composante directe de la tension du réseau |
| <i>X_C</i> | : Réactance capacitive |
| <i>I_c</i> | : Courant de la charge |
| <i>I_{inj}</i> | : Courant injecté |
| <i>I_s</i> | : Courant source |
| <i>IGBT</i> | : Isolated Gate Bipolar Transforme |
| <i>X_L</i> | : Réactance inductive |
| <i>PLL</i> | : Phase lacked loop (boucle à verrouillage de phase). |
| <i>Q</i> | : Puissance réactive |
| <i>R</i> | : Résistance. |
| <i>THD</i> | : Taux de Distorsion Harmonique |
| <i>V_s</i> | : Tension de la source |
| <i>V_{inj}</i> | : Tension injecter par le filtre actif série |
| <i>V_c</i> | : Tension de charge |
| <i>V_p</i> | : Tension perturbé |
| <i>V_d</i> | : Tension directe de référence |

Introduction Générale

Chapitre I : Qualité de l'énergie

| | | |
|--|--|----|
| I.1 | Introduction | 5 |
| I.2 | Perturbations dans les réseaux électriques | 5 |
| I.3 | Creux de tension et coupure | 6 |
| I.3.1 | Causes de creux de tension | 7 |
| I.3.2 | Effet des creux de tension sur le réseau | 7 |
| I.4 | Coupures de tensions | 7 |
| I.4.1 | Causes des coupures de tensions | 7 |
| I.4.2 | Effet des coupures de tension sur le réseau | 8 |
| I.5 | Surtensions | 8 |
| I.5.1 | Cause des surtensions | 8 |
| I.5.2 | Effet des surtensions sur le réseau | 8 |
| I.6 | Chute de tension | 8 |
| I.6.1 | Conséquence de sous-tension | 9 |
| I.7 | Déséquilibre du système triphasé tension | 9 |
| I.8 | Harmonique et inter-harmonique | 9 |
| I.8.1 | Cas particulier des perturbations harmoniques | 10 |
| I.8.2 | Textes et normes de référence | 10 |
| I.9 | Exemples de solutions pour éliminer les perturbations dans les réseaux électriques | 10 |
| I.9.1 | Filtre amortie (passif) | 11 |
| I.9.1.1 | Avantages et inconvénients | 11 |
| I.9.2 | Filtre actif de puissance | 11 |
| I.9.2.1 | Filtre actif de puissance parallèle | 12 |
| I.9.2.2 | Filtre actif de puissance série | 12 |
| I.9.2.3 | Filtre actif de puissance hybride | 13 |
| | Conclusion | 14 |
| Chapitre II Filtre actif de puissance série | | |
| II.1 | Introduction | 16 |
| II.2 | Mise en œuvre | 16 |

| | | |
|--------|--|----|
| II.3 | Principe de fonctionnement | 16 |
| II.4 | Partie puissance du FAS | 16 |
| II.4.1 | Onduleur de tension | 17 |
| II.4.2 | Transformateurs d'injection et protection du F.A.S | 17 |
| II.5 | Identification des perturbations de tension | 18 |
| II.5.1 | Structure générale d'un filtre actif série | 18 |
| II.5.2 | Redresseur à MLI de tension | 19 |
| II.6 | Commande des F.A.S | 20 |
| II.6.1 | Lois de commande | 20 |
| II.6.2 | Méthode des puissances instantanée | 24 |
| II.6.3 | Méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF)..... | 24 |
| II.6.4 | Structure générale du PLL | 24 |
| II.6.5 | Commande par hystérésis | 25 |
| II.7 | Simulations | 27 |
| | Conclusion | 33 |

Chapitre III : Etude et simulation d'un filtre hybride série

| | | |
|---------|--|----|
| III.1 | Introduction | 35 |
| III.2 | Filtre passif | 35 |
| III.3 | Types des filtres passifs | 35 |
| III.3.1 | Les Filtres résonants | 35 |
| III.3.2 | Les Filtres amortis | 38 |
| III.3.3 | Inductance anti-harmonique ou filtre de barrage | 39 |
| III.4 | Le taux de distorsion harmoniques THD | 39 |
| III.5 | Application numérique | 40 |
| III.5.1 | Calcul de la 5 ^{ème} harmonique..... | 40 |
| III.6 | Interprétation | 43 |
| III.7 | Filtre Hybride | 44 |
| III.8 | Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles | 44 |
| III.8.1 | Filtre hybride shunt avec transformateur | 45 |
| III.8.2 | Filtre hybride shunt sans transformateur | 46 |

| | | |
|---------|---|----|
| III.8.3 | Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle | 47 |
| III.8.4 | Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif | 48 |
| III.8.5 | Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif série ... | 49 |
| III.9 | Filtre hybride série | 49 |
| III.10 | Calcul théorique de THD | 59 |
| III.11 | Conclusion..... | 61 |

Conclusion Générale

Bibliographie

Chapitre I
Qualité de l'énergie

I.1 Introduction

La qualité de l'énergie désigne plus concrètement la qualité des signaux électrique qui circule dans le réseau électrique, définie à partir de trois grands critères conformément aux critères établie par la Commission de régulation de l'énergie « *CRE* », à savoir :

- Continuité de l'alimentation,
- Qualité de l'onde de tension,
- Qualité de service.

La qualité de l'énergie électrique est fondamentale pour l'utilisateur final, notamment lorsqu'il met en œuvre des process. Dite sensibles. Elle doit constituer alors un engagement réciproque entre le distributeur d'énergie et l'exploitant. [1]

Le bon fonctionnement du réseau électrique est souvent conditionné par la maîtrise, voire la compensation des différentes perturbations pouvant apparaître dans ce même réseau, à savoir : creux de tension et coupure, surtension temporaire ou transitoire, fluctuations lentes de la tension, variation de la fréquence, déséquilibres du système triphasé, harmonique et inter-harmonique et tensions continues dans les réseaux alternatifs.

Ils peuvent être regroupés en quatre catégories pouvant affecter :

- L'amplitude,
- La forme d'onde,
- La fréquence,
- La symétrie du système triphasé.

I.2 Perturbations dans les réseaux électriques

Les problèmes liés à la qualité de l'énergie électrique impliquent l'ensemble des partenaires, allant du distributeur d'énergie à l'utilisateur. Ils concernent principalement les imperfections de la tension électrique, ces perturbations électriques font l'objet d'une norme européenne EN 50160 élaborée par le comité européen de normalisation électrotechnique « Cenelec » [2].

La plage de variation nominale de la tension réseau est généralement fixée par le distributeur

d'énergie à $\pm 10\%$ de la tension composée, conformément à la norme EN 50160. Toute variation de la tension au-delà du seuil haut ou bas de la plage nominale de la tension, génère une perturbation de la qualité de l'électricité distribuée.

Origines des perturbations de la qualité de l'énergie électrique

Les perturbations de la qualité de l'énergie électrique distribuée sont principalement provoquées par les phénomènes suivants [3] :

- Creux de tension,
- Coupures de tension,
- Surtensions,
- Variations rapides de la tension – Flicker,
- Déséquilibre du système triphasé de tensions,
- Harmoniques et inter-harmoniques.

I.3 Creux de tension

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension en dessous du seuil inférieur de la plage nominale. Ils sont provoqués par l'apparition de défauts sur le réseau électrique.

La coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Une coupure est dite brève si elle n'excède pas trois minutes et sa profondeur est supérieure à 90 %. Au-delà de trois minutes, la coupure est dite longue.

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.

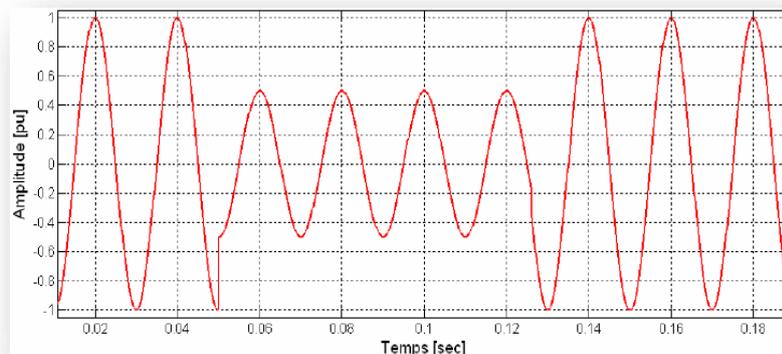


Figure I.1 : Creux de tension

I.3.1 Causes de creux de tension

Les creux de tension proviennent soit du réseau électrique :

- Contact avec la végétation, un animal, un oiseau, etc.,
- Collision automobile,
- Conditions climatiques (vent, foudre, pluie, verglas...etc.

Soit des installations des clients :

- Démarrage de moteur
- Variation de charge soudaine
- Défaut électrique (bris de câble, accident, etc.) Contact avec la végétation, un animal, un oiseau, etc.

I.3.2 Effet des creux de tensions

Tout creux de tension peut causer l'arrêt imprévu d'équipements, et dans certains cas, entraîner des dysfonctionnements selon le type d'équipement et de procédé utilisés. L'impact financier est aussi fonction du secteur d'activité en cause et du niveau de protection déjà mis en place.

I.4 Coupures de tensions

La tension d'alimentation tombe en dessous de 10% de sa valeur nominale durant plus de 1 minute est considéré comme des longues interruptions.

Les coupures de tension de plus d'une minute sont généralement de nature permanente, nécessitant une intervention manuelle pour la restauration.

I.4.1 Causes des coupures de tensions

Parmi les causes de coupures les plus fréquentes, citons un court-circuit dans les câbles de moyenne tension, un problème de transformateur, une surtension sur le réseau, du matériel vétuste, un incident imprévisible, des travaux d'entretien sur la ligne, des chantiers sur la voirie ou un acte de vandalisme.

Ces différents incidents provoquent généralement des coupures au niveau local que l'intervention rapide du gestionnaire de réseau permet de réparer dans les meilleurs délais. [4]

I.4.2 Effet des coupures de tension sur le réseau

Les conséquences sont similaires aux creux de tension mais souvent plus importantes.

I.5 Surtensions

Lorsqu'un composant électrique à deux bornes reçoit une tension électrique supérieure à la tension normale du circuit, on dit qu'il est en « **surtension** ». C'est une augmentation de la tension efficace supérieure à 1,10 pu pour une durée de 0.5 à 1 min.

Comme avec les creux, les surtensions sont généralement associées aux conditions de défaut du système, mais ils sont beaucoup moins fréquents que les creux de tension. [5]

I.5.1 Cause des surtensions

- **Cause interne** : la surtension provient des appareils électriques eux-mêmes. Ce sont généralement de petites hausses de tension, en particulier lors du démarrage ou l'arrêt des appareils.
- **Cause externe** : la surtension est due à un phénomène extérieur, comme la foudre ou de possibles fluctuations de tension sur le réseau d'électricité. Dans ce cas, les conséquences peuvent être plus graves.

I.5.2 Effet des surtensions sur le réseau

Lorsque la foudre tombe à proximité des habitations ou sur le réseau de lignes de distribution d'électricité, peut provoquer une importante surtension affectant le bon fonctionnement des appareils électriques voir même les endommager de façon irréversible. Dans certains cas, heureusement très rares, les appareils mis sous surtension peuvent dégager de la fumée, voire imploser ou prendre feu. [6]

I.6 Chute de tension

La sous-tension est la chute de tension inférieure à 0,9 pu valable plus d'une minute. La sous-tension est due à l'événement opposé à l'événement qui a provoqué la surtension. Une bascule de la charge ou la désactivation de la batterie de condensateurs peut provoquer une sous-tension de récupération de l'équipement de régulation de la tension du système d'alimentation dans le seuil de tolérance. La surcharge du circuit peut également provoquer une sous-tension.

Les chutes de tension traversent généralement le réseau et peuvent y rester longtemps.

I.6.1 Conséquence de sous-tension

- Les charges (l'éclairage, chauffage...) seront peu affectées par la baisse de tension il y aura simplement une légère baisse de la puissance de ces appareils.
- Les moteurs à induction tenteront de conserver la même puissance, tirant plus de courant de source pour compenser la baisse de tension. Ceci peut causer un échauffement du moteur et griller ses enroulements.

I.7 Déséquilibre de système triphasé de tension

Le déséquilibre de récepteurs électriques (triphases ou monophasés) alimentés par un réseau triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou lorsqu'elles ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres.

Ces déséquilibres sont essentiellement dus à la circulation de courant non équilibré par les impédances de réseau et ont pour conséquence des couples de freinage.

Le taux de déséquilibre inverse admissible est de 2 % sur les valeurs efficaces.

I.8 Harmonique et inter-harmonique

Pour résumer, les harmoniques sont des perturbations introduites dans le réseau par des charges non linéaires provenant d'équipements intégrant l'électronique de puissance.

Les harmoniques consistent à une superposition sur l'onde fondamentale de 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de la fréquence fondamentale.

Lorsque la fréquence superposée n'est pas multiple de la fréquence fondamentale, on parle d'inter-harmonique.

Les conséquences des harmoniques peuvent être instantanées ou à long terme. Les effets instantanés se manifestent par des troubles fonctionnels de synchronisation ou de commutation, des disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie, voir même la destruction d'équipements (condensateurs, disjoncteur).

Les effets à long terme se manifestent par une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

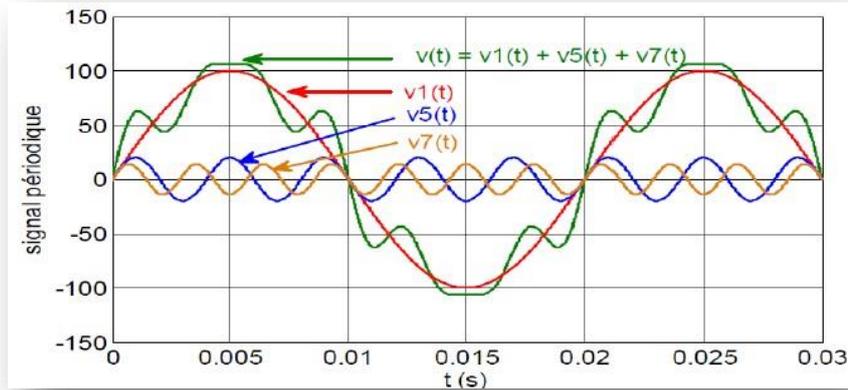


Figure I.2 : Synthèse d'un signal à partir des harmoniques.

I.8.1 Cas particulier des perturbations harmoniques

En ce qui concerne les perturbations harmoniques, celles-ci doivent être repositionnées dans un contexte global qui est celui de la compatibilité électromagnétique.

Il faut savoir que la limitation des perturbations harmoniques s'inscrit dans le cadre des règles de compatibilité électromagnétique.

I.8.2 Textes et normes de référence

Afin de limiter les effets des perturbations électromagnétiques sur les réseaux électriques, des normes ont été mises en place. Les deux principaux organismes qui ont établi de telles normes sont la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) et (PIEEE). Les normes qu'ils ont établies sont, de façon respective.

De façon générale ces normes, identifiant les principales sources de perturbations électromagnétiques, décrivent les effets de ces perturbations sur les réseaux, et donnent des méthodes d'analyse et de mesure pour les harmoniques.

I.9 Solutions pour éliminer les perturbations dans les réseaux électriques

Il suffit parfois d'une ligne frappée par la foudre, d'un court-circuit, voire d'une simple fluctuation de charge pour que tout un secteur se retrouve sans électricité. Ces perturbations des réseaux électriques causées par des phénomènes naturels ou des problèmes techniques peuvent perturber le réseau électrique. Parmi les solutions qui existent voici quelques-unes :

I.9.1 Filtre amortie (passif)

Un filtre passif est une combinaison des composantes capacitif, inductif et résistif, pour atténuer les harmoniques indésirables à l'aide ce type de filtre. On trouve deux types de filtre, à savoir : les filtres série et les filtres parallèles. Ces derniers sont couramment utilisés à cause de leurs avantages, car ils consomment moins d'énergie. On distingue trois types de filtres parallèles dit amortie, qui sont : Le filtre du premier ordre, le filtre du deuxième ordre et le filtre du troisième ordre, comme le montre la figure suivante.

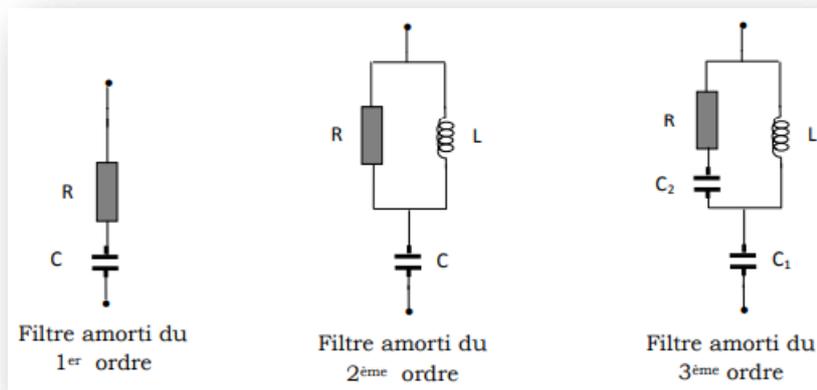


Figure I.3 : différents types de filtres amortis

I.9.1.1 Avantages et inconvénients des filtres passifs

Parmi les avantages des filtres passifs nous avons, un faible cout et une adaptation facile dans le milieu industriel. Cependant nous trouvons également des inconvénients tel que : Un vieillissement des éléments du filtre et une dégradation de leurs qualités, qui influe sur la précision des harmoniques à filtrer. De plus, les systèmes de distribution d'énergie et leur conception dépendent fortement du système l'alimentation à laquelle il est connecté.

I.9.2 Filtre actif de puissance

Les filtres de puissance active sont des filtres qui permettent d'éliminer plus efficacement le travail d'élimination harmonique que les filtres passifs. Les filtres de puissance active sont utilisés pour filtrer les harmoniques d'ordre supérieur et inférieur dans le système d'alimentation. Le rôle d'un filtre actif de puissance est de compenser en temps réel les perturbations présentes dans les réseaux électriques. Ils sont constitués d'une partie puissance et d'une partie commande.

I.9.2.1 Filtre actif de puissance parallèle

Le filtre actif de puissance connecté en parallèle sur le réseau (voir figure 4) est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante il est souvent commandé comme un générateur de courant. L'objectif du filtre actif de puissance parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

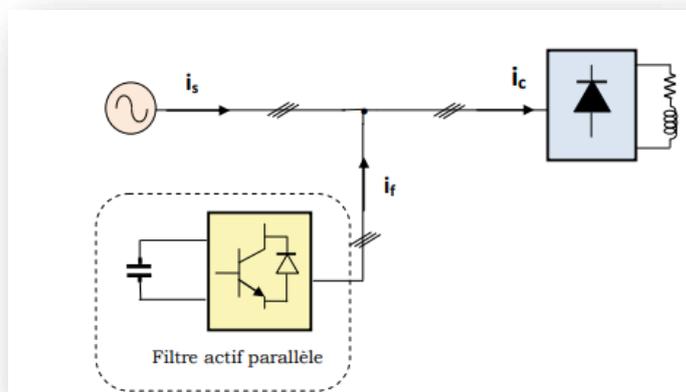


Figure I.4 : filtre actif parallèle

I.9.2.2 Filtre actif de puissance série

Le filtre actif de puissance série se compose d'une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Il est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des 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 les courts-circuits des réseaux. En effet lors d'un court-circuit coté réseau, ce dernier peut être amené à supporter tout le courant de court-circuit.

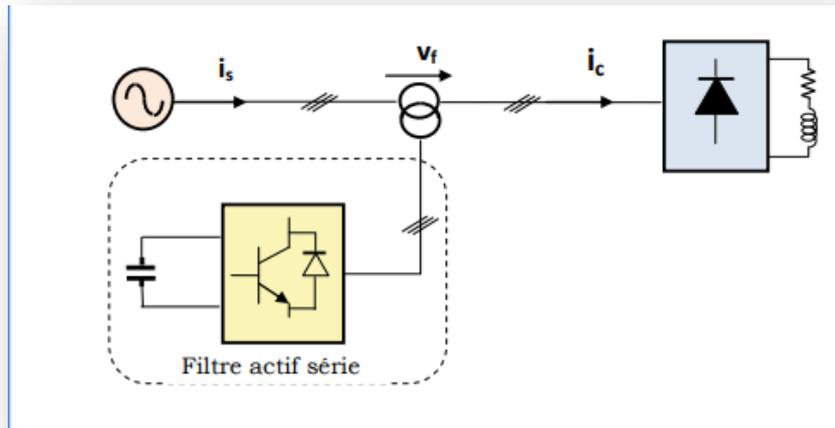


Figure I.5 : filtre actif série

I.9.2.3 Filtre actif de puissance hybride

Un filtre hybride résulte de l'association d'un filtre actif de puissance et d'un autre passif. Le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques de courant. Par contre, les filtres actifs de puissance maintiennent les performances de filtrage en fonction de la charge et de son évolution. Une telle combinaison avec le filtre passif permet de réduire considérablement le dimensionnement du filtre actif de puissance.

On a plusieurs structures de filtres hybrides les plus étudiées étant : le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.

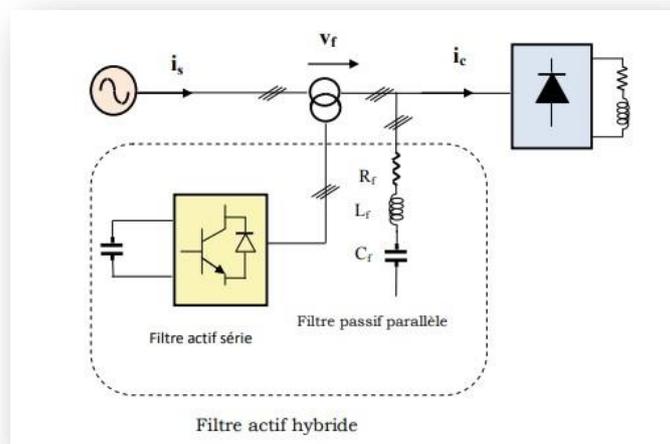


Figure I.6 : Filtre actif de puissance hybride

Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons introduit le principe de la qualité de l'énergie électrique et la notion de perturbations affectant les réseaux électriques en particulier les harmoniques. Après avoir montré les incidences que ces perturbations peuvent avoir sur les réseaux de distributions, nous avons présenté quelques solutions pour les réduire., voir même les éliminer. Les solutions existantes, notamment les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau. Cependant les structures de filtres actif de puissance ont une aptitude à travailler en temps réel. La solution d'un filtre actif de puissance série devra présentée des performances très intéressante. A cet effet, nous nous proposons de l'étudier dans le chapitre suivant un filtre actif de puissance série.

Chapitre II
Etude et simulation d'un filtre
actif de puissance série

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous proposons de présenter le principe de fonctionnement d'un filtre actif de puissance série dans le but d'éliminer différents types de perturbation tensions pour protéger les charges dites sensibles.

La partie puissance est composée de quatre éléments, à savoir : « onduleur de tension, filtre de sortie, transformateur triphasé et un élément de stockage ».

II.2 Mise en œuvre

Les filtres actifs de puissance série (FAS) sont considéré dans les ouvrages scientifique comme étant une solution appropriée pour la compensation des perturbations de type tension : les harmoniques de tension, les déséquilibres de tension ainsi que les creux de tension. [9].

Ces perturbations trouvent leur origine généralement dans le réseau lui-même, mais parfois elles peuvent être causée par la charge elle-même. En revanche, le filtrage actif de puissance série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge non linéaire.

II.3 Principe de fonctionnement

Un filtre actif de puissance série (SAF) est placé en série entre la source et la charge sensible. Il se comporte alors comme une source de tension, pour protéger les charges contre les tensions perturbatrices. Par conséquent, la tension fournie à la charge devra être purement sinusoïdale. La partie puissance est constituée le plus souvent d'un convertisseur de tension triphasé, d'un système d'alimentation en tension continue, d'un filtre de sortie et de transformateurs d'injection de tension.

II.4 Partie puissance du FAS

La partie puissance se compose d'un onduleur de tension triphasé contrôlé par une MLI associé à la source d'énergie de type tension continue.

Un filtre de sortie de premier ordre et un transformateur triphasé, permettant d'insérer le filtre en série pour pouvoir connecter la tension en série avec le générateur pour produire la tension nécessaire au récepteur.

II.4.1 Onduleur de tension :

Un onduleur de tension est une interface entre deux sources :

Sources de courant côté alternatif et de tension côté continue en respectant certaines règles de fonctionnement :

- La source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit jamais être court circuitée, les deux interrupteurs d'un même bras doivent donc avoir deux commandes complémentaires.
- La source de courant côté alternatif ne doit jamais être en circuit ouvert, le courant circulant doit toujours trouver un chemin libre d'où la mise en antiparallèle de diodes avec les interrupteurs. [10]

L'onduleur de tension utiliser est composé de six interrupteurs IGBT avec diode en antiparallèle. En règle générale, les onduleurs sont utilisés pour convertir la tension continue en tension alternatives. Pour l'alimentation coté continu de l'onduleur, le choix est porté sur un condensateur supportant une tension suffisante pour son bon fonctionnement.

La figure II.1 ci-dessous présente la structure de l'onduleur étudié :

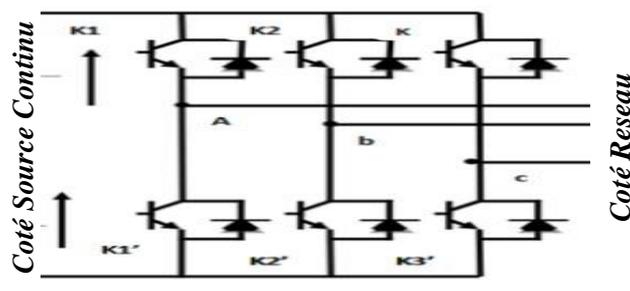


Figure II.1 : Schéma de l'onduleur de tension triphasé

II.4.2 Transformateurs d'injection et protection du F.A.S

Le transformateur de tension :

- Permet d'injecter la tension générée par l'onduleur en série avec le réseau au taux de conversion requis.

- Connecté à la sortie du filtre actif de puissance permettant d'injecter des harmoniques de tension ou de réguler les tensions coté charges.

Un condensateur connecté coté continu de l'onduleur doit délivrer une tension quasiment constante pour que le filtre puisse fonctionner correctement [11] [12] [21].

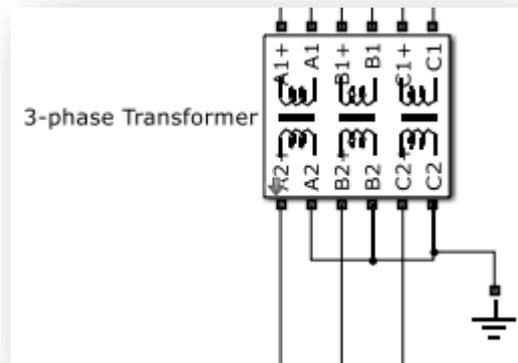


Figure II.2 : Transformateur d'injection de notre réseau

II.5 Identification des perturbations de tension :

La nomenclature présente plusieurs méthodes d'identification dans le but de séparer les perturbateurs de la composante fondamentale, à titre d'exemple :

- Méthode des puissances instantané p-q ;
- Méthode dite SRF (méthodes du référentiel lié au synchronisme) ;
- Etc.

Le diagramme fonctionnel de la figure II.3 illustre le principe de l'obtention de la composante fondamentale X_1 de la tension perturbée du réseau. Cette composante constitue la tension qu'on désire appliquer aux bornes de la charge. Cette composante X_1 est soustraite de la tension polluée X du réseau afin d'extraire la composante perturbée de la tension du réseau.

II.5.1 Structure générale d'un filtre actif série :

L'objectif du FAS est l'amélioration de la qualité du signal tension dans le réseau électrique.

Le principe de fonctionnement d'un filtre active série placé entre le réseau perturbé et la charge à protéger, est illustré dans la figure II.3 ci-dessous :

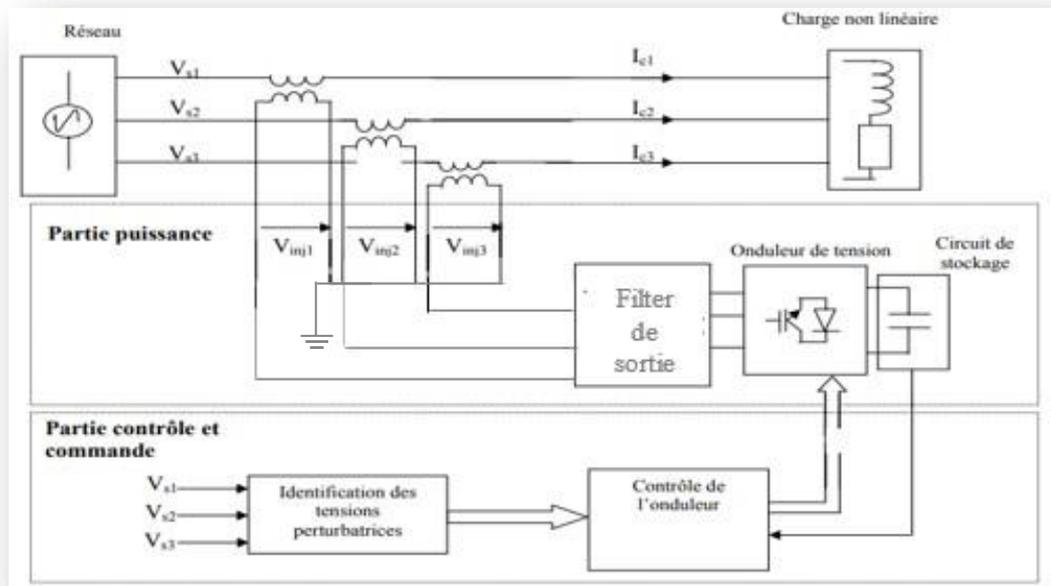


Figure II.3 : Structure générale du filtre actif série

II.5.2 Redresseur à MLI de tension :

Le redresseur à MLI de tension est simplement un onduleur de tension utilisé en sens inverse où il sera possible de produire une tension continue à partir d'un réseau alternatif (à l'image d'un redresseur à diodes), mais en absorption sinusoïdale de courant, donc à facteur de puissance unitaire illustré dans la figure I.4. Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT et d'une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Ainsi, ce convertisseur, de la part de sa structure, est réversible en courant. Il peut donc contrôler de façon instantanée la forme d'onde des courants prélevés sur le réseau [24]. Il alimente alors une charge (active ou passive) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant absorbé étant sinusoïdal et, éventuellement, en phase avec la tension du réseau correspondante. Le redresseur à MLI de tension est préféré pour diverses applications, principalement pour l'entraînement réglables de vitesse des machines électriques et l'alimentation en tension continue des charges électriques [25].

Le seul inconvénient du redresseur à MLI, par rapport aux convertisseurs, réside essentiellement dans son prix et le nombre d'interrupteurs de puissance utilisés et sa complexité de commande pour avoir de hautes performances, la structure mult niveau peut encore augmenter les performances du redresseur MLI. [8]

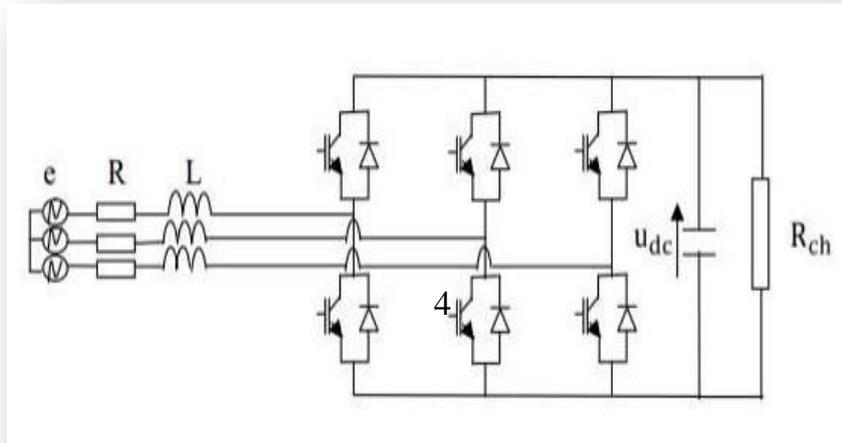


Figure II. 4 Topologie d'un redresseur triphasé à MLI de tension

II.6 Commande des F.A.S

L'objectif de la commande de l'onduleur est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui le compose de façon à obtenir une tension de sortie synthétisant les perturbations mais en opposition de phase [13] [14].

II.6.1 Lois de commande

Pour l'étude de notre cas, nous avons opté par l'exploitation des caractéristiques de la PLL pour développer notre commande, à cet effet, nous devons en premier lieux définir la «PLL».

Principe de fonctionnement de la PLL : (Phase Locked Loop) Est une technique largement utilisée pour l'extraction de la composante directe de la tension du réseau. C'est un système asservi comprenant un régulateur (PID, RST, ...), son fonctionnement se base sur la transformation de Park dans le repère d,q.

Nous souhaitons que l'angle de rotation estimé soit égal à l'angle réel de la tension directe. Cela peut être réalisé en choisissant la valeur de V_d qui satisfait cette condition. La PLL sera verrouillée lorsque l'angle estimé correspondra à la tension directe. [36][37]

Les tensions mesurées de la source au point de raccordement sont données comme suit :

$$\begin{aligned} V_{s1} &= \sqrt{2} \cdot V \sin(\theta_s) \\ V_{s2} &= \sqrt{2} V \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{s3} &= \sqrt{2} V \sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (\text{II1})$$

Pour le cas où la tension du réseau est sinusoïdale et équilibrée, on a :

$$\begin{aligned} V &= V_d & \theta_s &= \theta_d \\ \theta_d &= \omega_d t + \delta_d \end{aligned} \quad (\text{II2})$$

$\omega_d = \omega_s$ (pulsation de la tension du réseau),

δ_d : l'angle de la composante directe de la tension du réseau

On calcule des composantes tension V_{sd} et V_{sq} , en appliquant d'abord la transformation, (α , β) puis celle de (d,q) avec un angle de rotation θ_d

Cette approche de calcul est regroupée dans la relation suivante :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} p(-\theta_d^\wedge) V_{s123}(\theta_d) \\ &= \sqrt{3} V_d \begin{bmatrix} \sin(\theta_d - \theta_d^\wedge) \\ -\cos(\theta_d - \theta_d^\wedge) \end{bmatrix} \\ &= \sqrt{3} V_d \begin{bmatrix} \sin(\Delta\theta_d) \\ -\cos(\Delta\theta_d) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II3})$$

L'asservissement de phase sera réalisé lorsque $\Delta\theta_d = 0$, dans ce cas, l'angle de la tension du réseau et l'angle estimé de θ_d^\wedge sont égaux, ainsi, nous pouvons écrire :

$$V_{sd} = 0 \text{ et } V_{sq} = -3v_d \quad (\text{II4})$$

Dans la relation II.3, on remarque que pour obtenir, en même temps, l'angle et l'amplitude de la composante directe de tension (θ_d, V_d), la tension directe V_{sd} doit être nulle. Cela implique que la tension directe de référence V_d doit être nulle.

Chapitre II : Etude et simulation d'un filtre actif de puissance série

Après avoir verrouillé, nous utilisons ces paramètres (θ_d , V_d) pour reconstituer la composante directe triphasée de tension $V_{d1,2,3}$ qui serait égale à la tension du réseau $V_{s1,2,3}$ si celle-ci était non polluée.

Afin d'interconnecter des sources à base d'énergies renouvelables au réseau électrique, il faut synchroniser la tension du générateur de production d'énergie électrique avec celle du réseau en matière de phase et de fréquence tout en contrôlant celles relatives au réseau. La figure II.5 montre le principe fonctionnel d'une PLL.

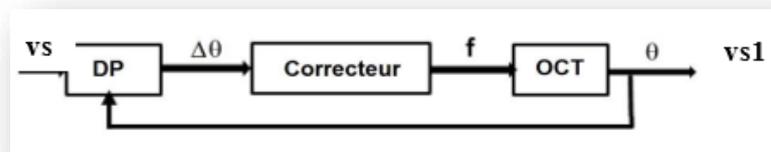


Figure II.5 : Schéma fonctionnel de base d'une PLL

Ces méthodes ont le même inconvénient de sensibilité aux perturbations. La méthode la plus efficace est la PLL (Phase Lock Loop). Sa structure est un système bouclé dont son comportement et ses performances sont étudiés et évalués moyennant la théorie des asservissements. Cette structure présente des configurations très diversifiées et comme, elle comprend principalement trois blocs :

- Le détecteur de phase, 'DP' ;
- Le correcteur ;
- L'oscillateur commandé en tension, 'OCT'.

Les techniques avancées utilisées dans la technologie de la PLL ont pour principal objectif d'utiliser une poursuite robuste de la phase du réseau qui permet de pallier à l'existence des perturbations décrit dans la figure ci-dessous :

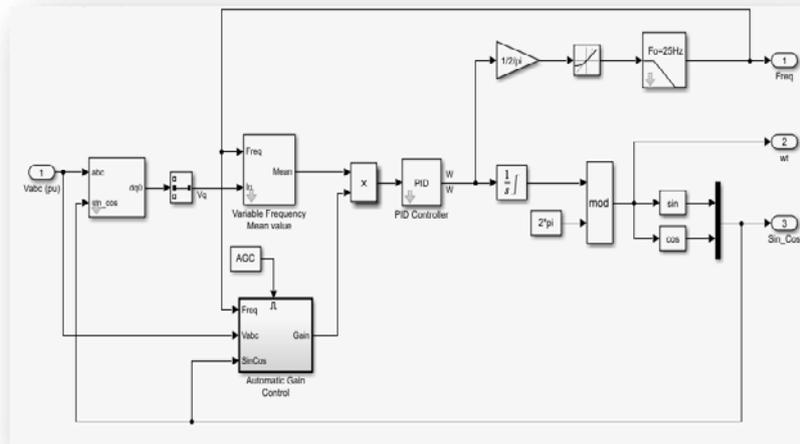
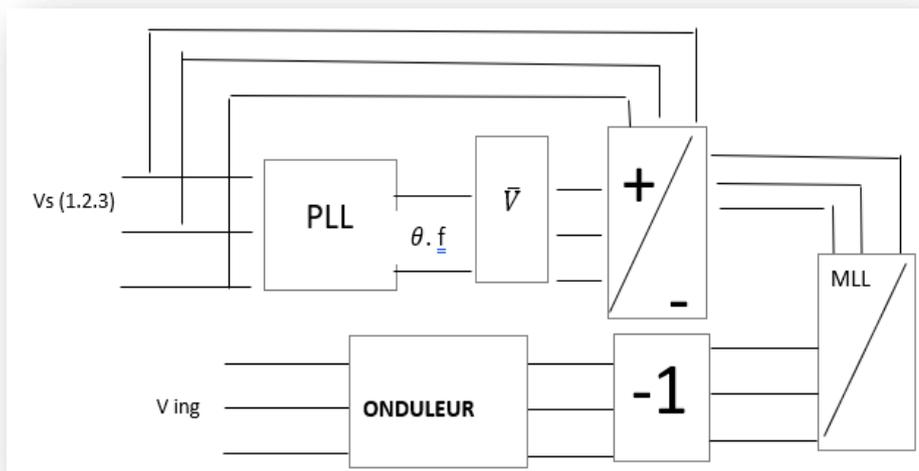


Figure II 6 : Schéma fonctionnel d'une PLL

Dans ce type de configuration de la PLL, nous supposons que les tensions du réseau sont équilibrées, et utilisées comme entrées dans la PLL et une fois contrôlées, sa sortie correspond à l'angle de phase de l'une des trois phases. Une fois ce dernier est détecté, nous faisons un décalage de 120 degrés pour chacune des deux autres phases.

Détermination de tensions perturbé :

$$V_p = V_s - V_{s1} \quad (\text{II } 5)$$



II.6.1 Méthode des puissances instantanée

L'algorithme théorique de la puissance instantanée active et réactive utilise une stratégie pour l'identification des tensions perturbatrices en utilisant la théorie des puissances actives et réactives instantanées. Admettons que la tension source soit triphasé symétrique et polluée, Un filtre actif série utilise la valeur instantanée de la tension et du courant mesurés.

Les méthodes des parties réelles et imaginaires instantanées sont essentiellement basées sur les principes de puissance instantanée active et réactive sont conçus pour déterminer les tensions fondamentales et harmoniques de la tension du réseau perturbée [18]

II 6.3 Méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF)

Cette méthode introduite par Bhattacharya [23], exploite également la transformation de Concordia mais appliquée uniquement aux tensions de phase v_{c1} , une seconde transformation est opérée pour passer des tensions de phase en d-q. Ce qui permet de transformer la composante fondamentale de la tension en une composante continue et les composantes harmoniques de tension en des composantes alternatives, cela nous permet d'éliminer à l'aide d'un simple filtre passe bas, la composante continue de la tension. L'avantage majeure de cette méthode a la précédente réside dans le fait que les éventuelles, les tensions harmoniques n'ont plus d'influence sur les tensions identifiées et par conséquent le filtrage sera meilleur la transformation de Concordia ramène ce système triphasé

II.6.4 Structure générale du PLL :

Dans les paragraphes suivants, nous présenterons une méthode pour identifier la tension interférence utilisée par les systèmes basés sur une boucle à verrouillage de phase

Cette technologie est née en 1932 dans le but de d'améliorer la réception des signaux électriques radio en modulation d'amplitude. Aujourd'hui, les applications PLL sont diverses (transmission FM, radar, contrôle de vitesse des moteurs à courant continu, etc.), qui illustre la structure d'un système basé sur PLL. Il est utilisé pour extraire la phase de la composante fondamentale de la tension continue et calcule l'amplitude de la composante continue à l'aide

d'un filtre passe-bas par rapport à ces méthodes, cette méthode réduit considérablement le nombre de calculs classique, et ne nécessite pas une connaissance très précise du réseau perturbé.

À cela, s'ajoute l'optimisation de la puissance apparente du filtre actif série grâce à la conservation de l'angle de la composante directe de tension [16] La figure II.8 montre le schéma fonctionnel d'une P.L.L.

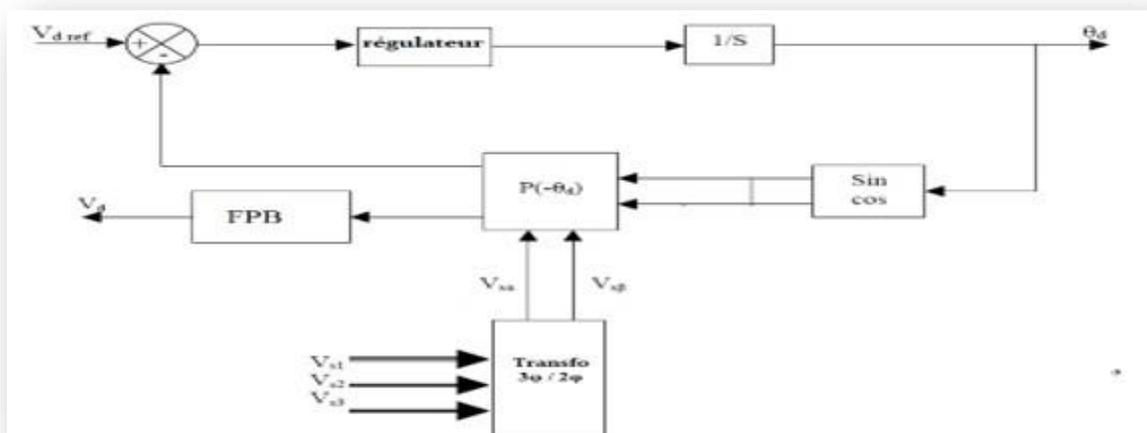


Figure II.8 Schéma de principe d'une P.L.L classique

II.6.5 Commande par hystérésis

La commande comprend et modifie le décalage de la tension de sortie de l'onduleur pour maintenir la tension dans une prise dite à hystérésis centrée sur une tension de référence. Cette taille de ce régleur se résume à fixer la largeur de cette bande, la pratique consiste à la prendre égale à 5% de la tension nominale. L'avantage du contrôle hystérétique est une vitesse illimitée et une configuration simple travail, sa robustesse et sa bonne dynamique.

La simplicité de la mise en œuvre, est le principal avantage de cette technique. D'autre part, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations. Enfin, la vitesse contrôlée par l'hystérésis offre de meilleures performances dynamiques et statiques. [15] [13]

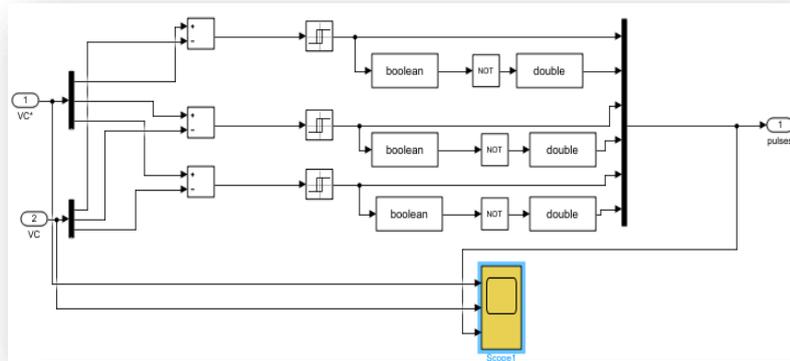


Figure II.9 : Principe de commande par hystérésis

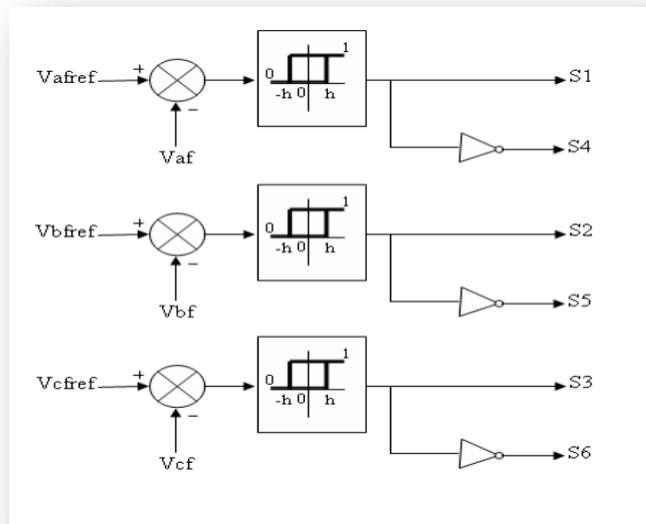


Figure II.10 : Commande des interrupteurs par hystérésis

a, b et c étant les numéros de phase, tel que :

- **si : $(\Delta V_a = V_{afref} - V_{af} > h) \rightarrow (V_{afref} - h > V_{af})$**

la tension V_{af} est à son niveau minimal, il faut faire accroître la tension V_{af} .

Donc $S1 = 1$ $S4 = 0$ ($v_{ao} = +V_{dc}/2$).

- **si : $(\Delta V_a = V_{afref} - V_{af} < -h) \rightarrow (V_{afref} + h < V_{af})$**

la tension V_{af} est à son niveau maximal, il faut faire décroître la tension V_{af} .

Donc $S1 = 0$ $S4 = 1$ ($v_{ao} = -V_{dc}/2$).

- si : $(\Delta V_a = V_{afref} - V_{af} \in [-h, h]) \rightarrow$ la tension V_{af} est à l'intérieur de dans la bande d'hystérésis.

Donc S1 et S4 sont maintenus à leurs états.

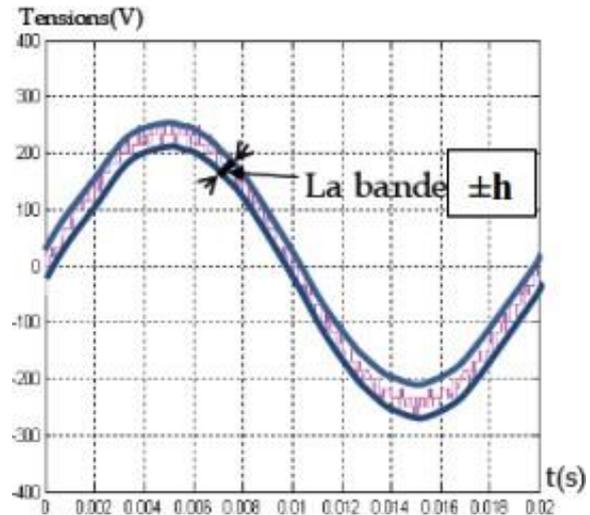


Figure II.11 : Tension de sortie (filtrée) de l'onduleur commandé par régulateur à hystérésis

II.7 Simulations :

On se propose d'effectuer une série de simulation sur un réseau électrique constitué d'une source triphasé alternative débitant sur une charge non linéaire. La source de tension triphasé sera une source perturbée d'où l'intégration d'un filtre actif de puissance série relié en série à notre réseau via un transformateur triphasé.

Le modele de reseau électrique est comme suite :

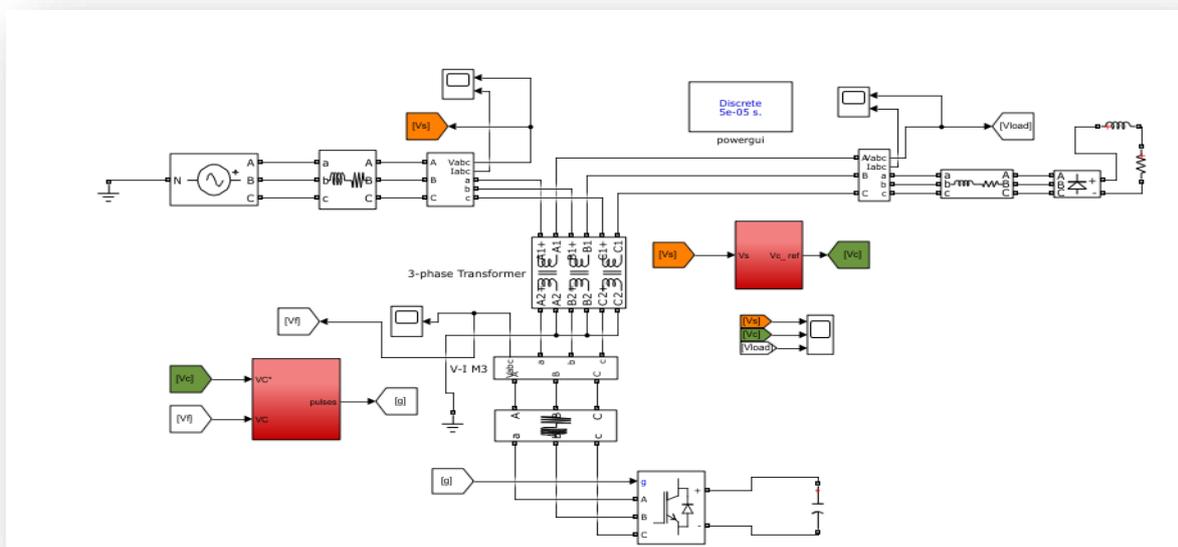


Figure II.12: Model de notre cas d'étude de simulation du réseau

Paramètres du système à simuler :

| Réseau électrique | Transformateur | Charge | Régulateur à hystérésis |
|---------------------------|----------------------------|-----------------|--|
| $V_{max} = 400 \text{ V}$ | $m=1$ | $R=30 \Omega$ | La bonde d'hystérésis= $\pm 5\text{V}$ |
| $f=50\text{Hz}$ | $R_s=R_p=90\text{m}\Omega$ | $L=10\text{mH}$ | |
| | $L_s=L_p=1.1\text{mH}$ | | |

Afin d'évaluer les performances de notre filtre actif de puissance série, nous allons effectuer une série de simulations sous environnement Power System de MATLAB/SIMULINK.

Nous appliquons à notre système à une chute de tension de 40 % au niveau de l'intervalle de temps compris entre 0.1 à 0.2 s pour ensuite revenir à son régime normal entre 0.2 à 0.3 s, il s'ensuivra une surtension de 40 % dans l'intervalle de temps [0.3 0.4] s pour ensuite revenir une nouvelle fois au régime normal. Le taux d'harmonique de distorsion est déduit à partir de powergui.

A. Chute de tension:

On applique une chute de tension dans l'intervalle 0,1 à 0,2 s, et on obtient les courbes suivantes de tension de source V_s , tension injecté V_{inj} par le filtre de puissance série et en dernier la tension de charge V_c

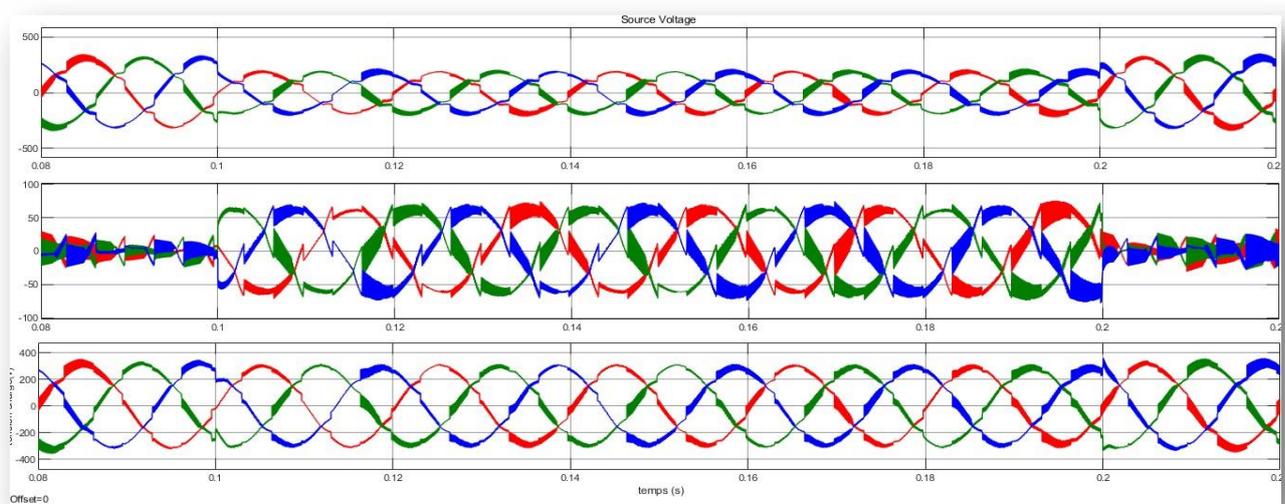


Figure II.13 : Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c suite à une chute de tension

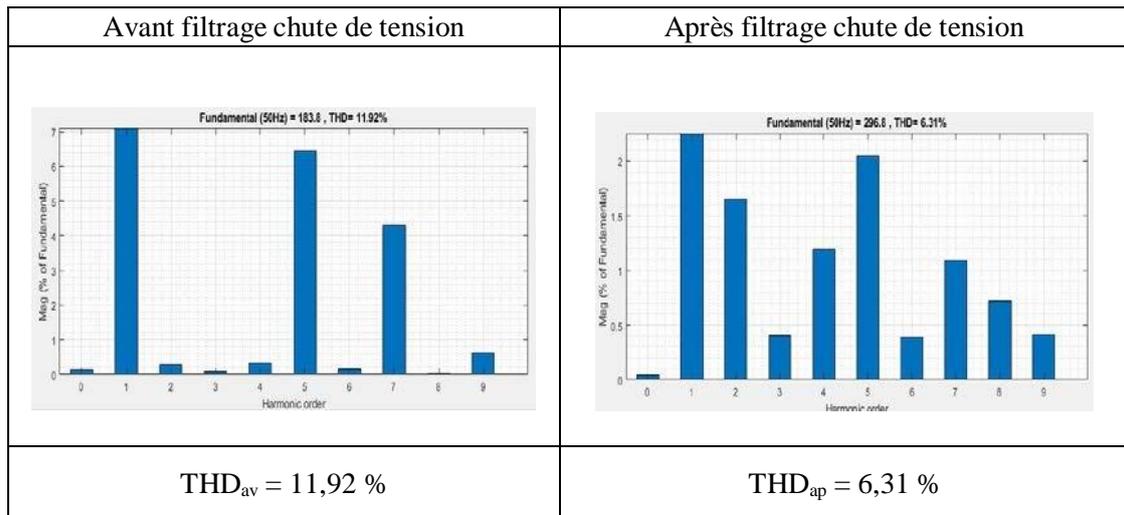


Figure II.14 : THD de la tension de charge après filtrage d'une chute tension

Interprétation :

Suite à l'application d'une chute de tension à notre modèle de simulation, le filtre actif série a eu pour effet une amélioration de la qualité du signal tension appliqué à la charge de sorte que le THD est passé de la valeur de 11,92 % à 6,31 % soit une amélioration de 5,61 %.

On remarque bien à l'œil nu que la tension appliquée à la charge est très proche d'une sinusoïde pure.

Les régimes transitoires au début et à la fin de l'application du défaut sont quasi-instantané et ne présente aucun régime transitoire qui affecte notre système.

B. Surtension :

On applique une surtension dans l'intervalle 0,3 à 0,4 s, et on obtient les courbes suivantes de tension de source V_s , tension injecté V_{inj} par le filtre de puissance série et en dernier la tension de charge V_c

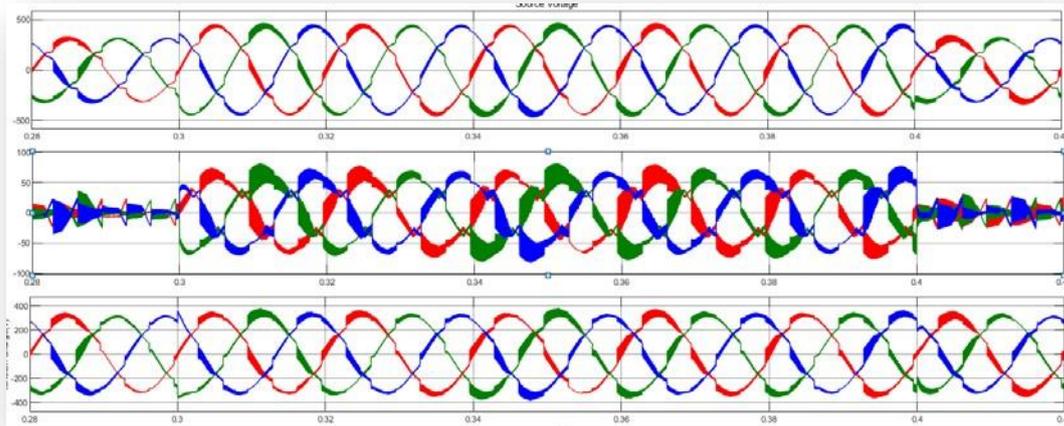


Figure II.15 : Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c suite à une surtension

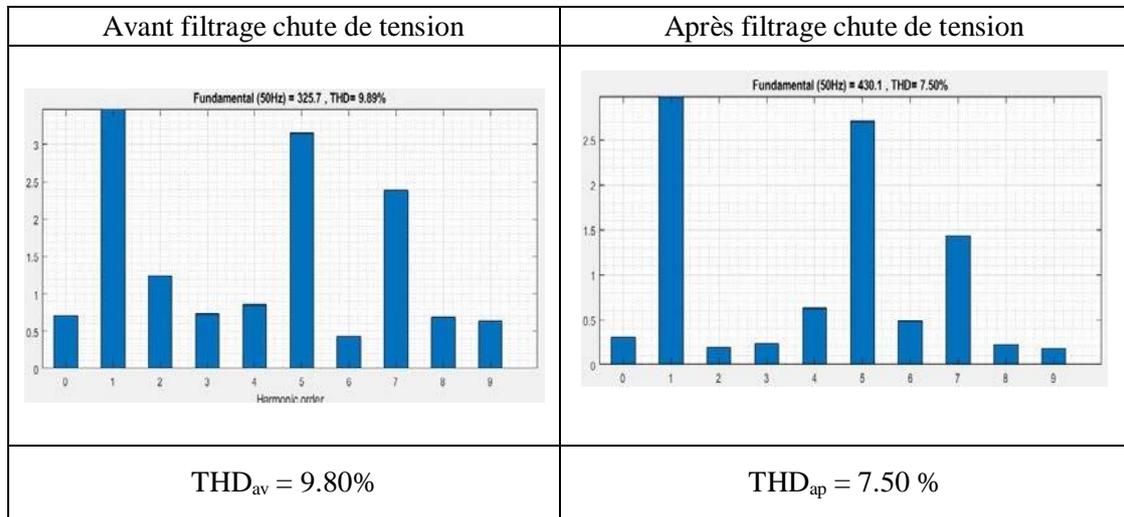


Figure II.16 : THD de la tension de charge après filtrage de la tension de source

Interprétation :

La Figure II.15 représente la tension du réseau électrique V_s (v) et la tension de charge V_{ch} (v) pendant une importante chute de tension coté source avant le filtrage. La Figure II.16 représente le THD après et avant le filtrage. Nous remarquons l'élimination de la surtension après la compensation. De plus, nous remarquons que la surtension commence à 0.03 (s) et elle n'est éliminée qu'au temps 0.1 (s). Donc notre filtre actif de puissance série compense correctement cette chute de tension coté charge.

C. Déséquilibre pour filtre série :

L'essai réalisé avec un réseau triphasé déséquilibré de tension $V_1=220\text{ v}$ $V_2=200\text{ v}$ $V_3=180\text{v}$

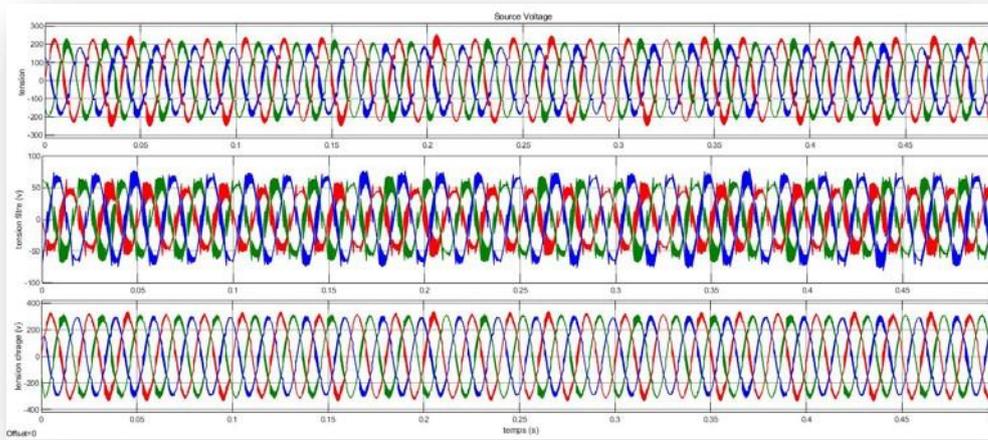


Figure II.17 : Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c suite à un déséquilibre de tension de source

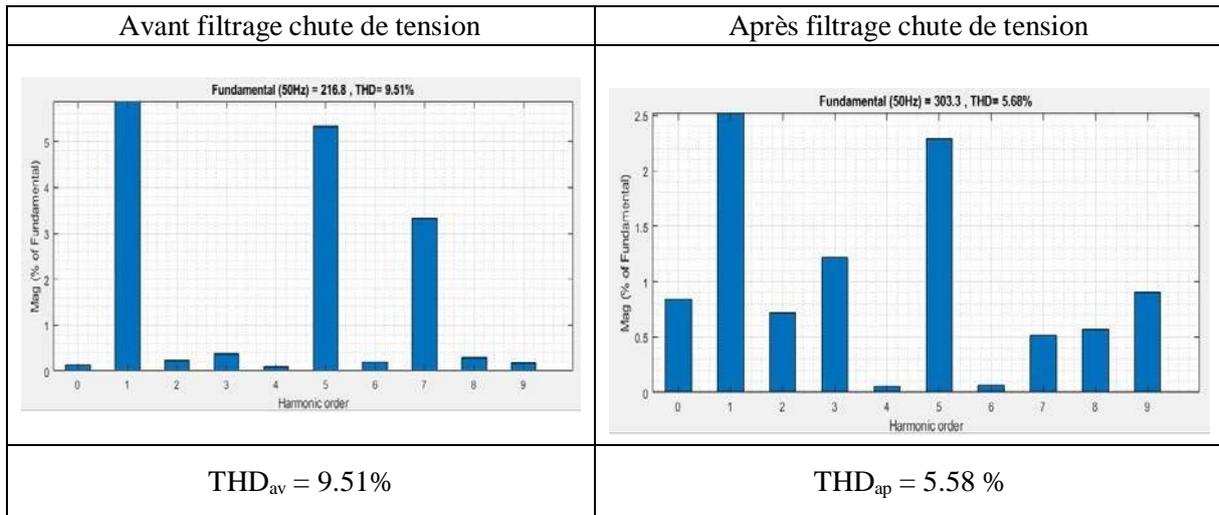


Figure II.18 : THD de la tension de charge après filtrage du déséquilibre de tension

Interprétation

Suite à l'application déséquilibre à notre modèle de simulation, le filtre actif série a eu pour effet une amélioration de la qualité du signal tension appliqué à la charge de sorte que le THD est passé de la valeur de 9.51 % à 5.58% soit une amélioration de 3.3 %.

On remarque bien à l'œil nu que la tension appliquée à la charge est très proche d'une sinusoïde pure.

D. Harmonique pour filtre série :

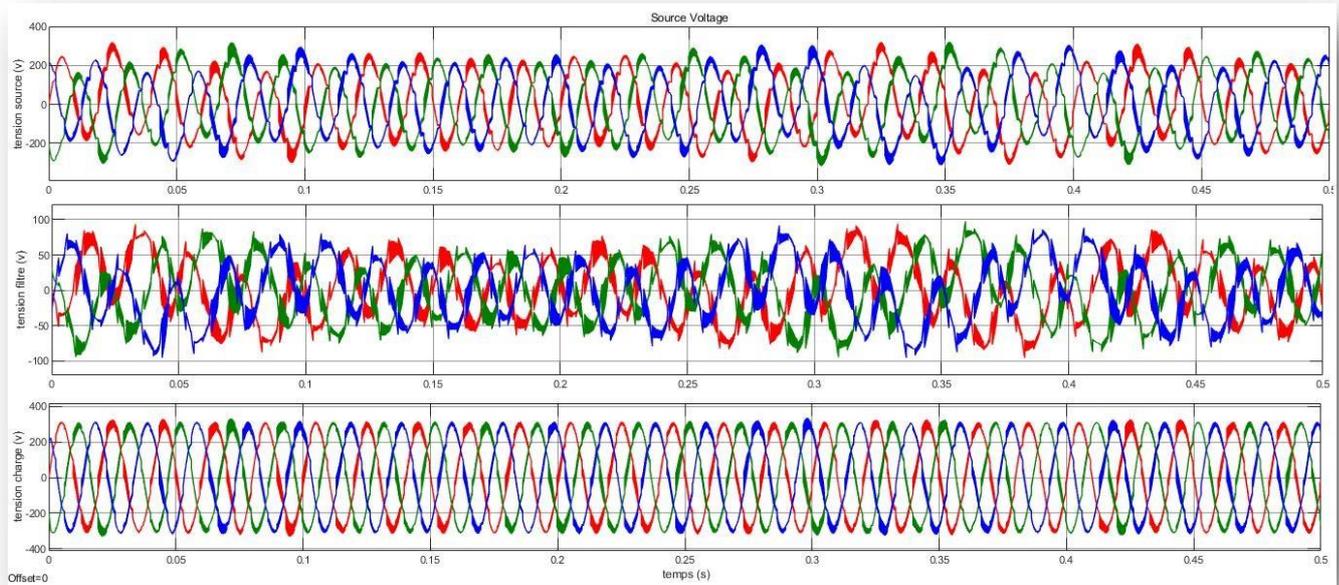


Figure II.19 : Evolution des tensions Vs, Vinj et Vc avec Harmonique de tension de source

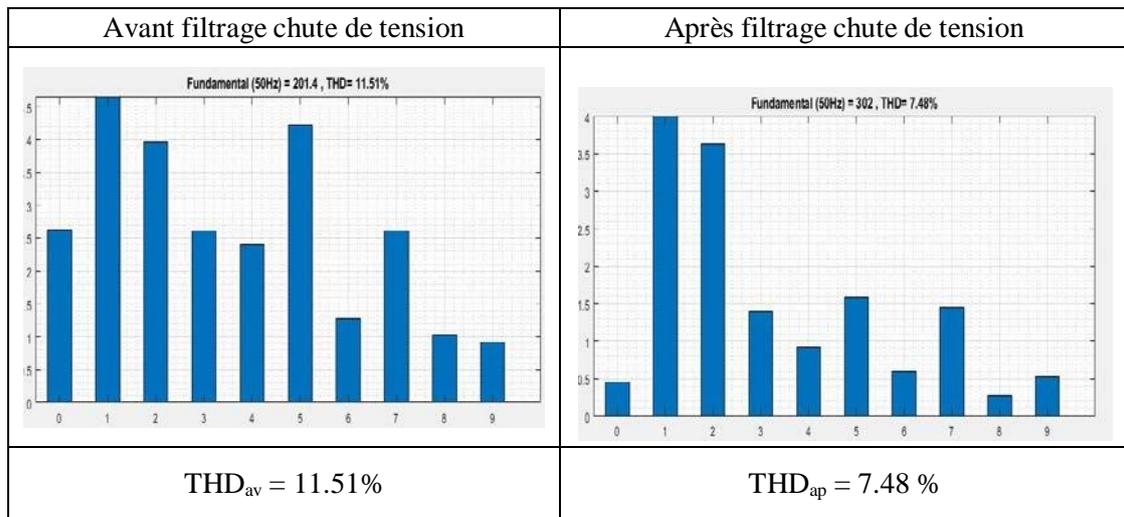


Figure II.20 : THD de la tension de charge après filtrage harmonique

Interprétation

Le filtre série élimine les harmoniques de tension et les rendre aux mêmes amplitudes.

Nous remarquons aussi que le THD avant le filtrage est égale 12,71 % par contre après la compensation le THD devient 7.57 %

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure générale d'un filtre actif de puissance série, on l'a soumis à différentes conditions de fonctionnement (perturbation).

La structure générale d'un filtre actif série est détaillée en deux parties :

- la partie puissance constituée d'un onduleur de tension, d'une source de tension continue, Filtre de sortie (filtre LC) et transformateur.
- Section de contrôle (commande) est régulé par un régulateur d'hystérésis de tension

Dans ce cas, la fréquence de commutation des composants de puissance (transistor) doit être très élevée afin de permettre à l'onduleur de générer des tensions de type MLI assurant la poursuite des références surtout pour les harmoniques à haute fréquence.

Suite aux différents essais de perturbation, il a été déduit que l'apport du FAS est réel et a amélioré la qualité du signal tension appliqué à la charge, où une amélioration du THD a été mesurée.

Chapitre III :
Etude et simulation
d'un filtre hybride série

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on se propose d'effectuer une étude intégrée qui regroupe un filtre actif de puissance série avec un filtre passif débitant sur une charge non-linéaire, nommé aussi « Filtre Hybride Série » qui présente un très bon cas d'étude pour évaluer leur performance à la suite d'une série de perturbation sur la tension d'alimentation en présence d'injection de courants harmonique dû à la présence d'une charge non-linéaire.

On va présenter dans un premier temps les topologies de filtres hybrides associées à différentes stratégies de filtrage afin d'améliorer la qualité de l'énergie mais surtout pour réduire le dimensionnement du filtre actif de puissance et par conséquent son coût. Puis, on présentera une étude plus détaillée du filtre actif passif, il s'en suivra une série de simulation

III.2 Filtre passif

Le filtrage passif est basé sur l'utilisation de circuits RLC (Résistances, Inductances, Condensateurs) sont appelés filtres passifs dont le principe est de modifier localement l'impédance du réseau et détourne ainsi le courant et élimine la tension harmonique.

On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie, ainsi lors du choix des composants constitutifs des filtres passifs et de leur dimensionnement, sachant exactement quel rang harmonique doit être filtré, et l'atténuation souhaitée est nécessaire car il existe plusieurs types des filtres passifs utilisés pour effectuer des différentes décontaminations. [26]

III.3 Types des filtres passifs

III.3.1 Les Filtres résonants

Le principe des filtres résonants est de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique d'un rang déterminé.

Un filtre passif résonant est un circuit RLC en série, accorder à la fréquence d'une harmonique généralement d'un rang inférieur. On installe très souvent plusieurs filtres résonants en parallèle, correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer. [37] C'est un filtre avec des données de réactance capacitive et inductive à la fréquence fondamentale de X_C et X_L . Lorsque ce filtre est exposé à un harmonique h_n , il produit un harmonique h_n

$$X_{Ln} = h_n X_L = X_{Cn} = X_C / h_n = X_n \quad (III.1)$$

On déduit alors la réactance caractéristique du filtre comme :

$$X_n = \sqrt{X_L X_C} = \sqrt{L/C} \quad (III.2)$$

La réaction capacitive du filtre est déterminée par la puissance réactive requise par la source harmonique.

$$X_C = V^2 / Q_c \quad (III.3)$$

La résonance de ce filtre aura lieu au rang

$$h_n = f_n / f_1 = \frac{1}{\omega_1 \sqrt{LC}} = \sqrt{X_C / X_L} \quad (III.4)$$

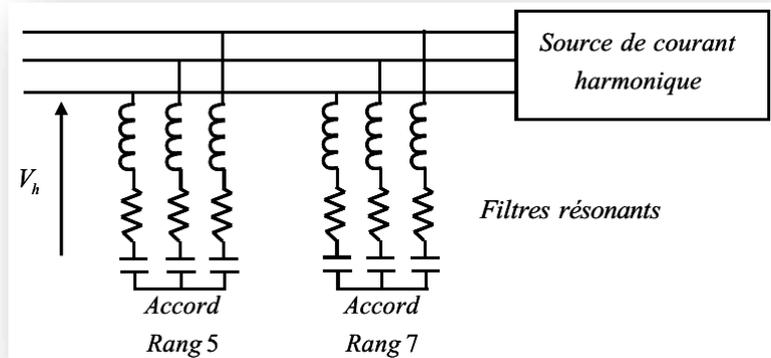
La résistance du filtre est déterminée par son facteur de qualité Q.

$$R = X_n / Q \quad (III.5)$$

Cette résonance aura donc lieu au rang h_n , si la réactance inductive est choisie comme

$$X_L = X_C / h_n^2 \quad (III.6)$$

Figure III.1 : Structure d'un filtre résonant



Afin d'ajuster la fréquence du filtre à la mise en service, l'inductance doit être munie de prises de réglage.

L'installation d'un filtre résonant donne naissance à une impédance harmonique dont l'allure est représentée dans la figure III.2.

- La fréquence d'accord correspond au rang harmonique 5.

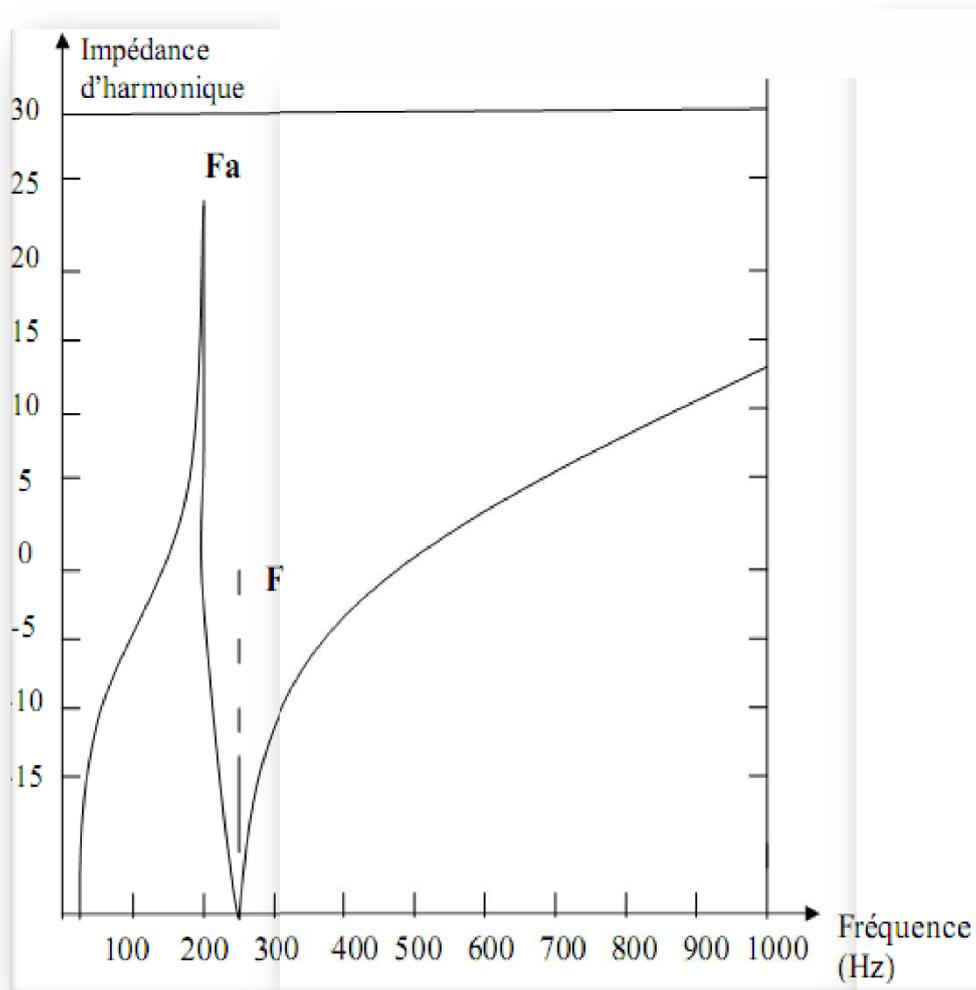


Figure III.2 : L'allure d'une impédance harmonique.

Dans le cas présent, la fréquence d'accord correspond au rang 5, c'est-à-dire 250 Hz, on remarque qu'à la fréquence de résonance, l'impédance est très faible ; ce qui dérive

les courants harmoniques vers le filtre. A une fréquence légèrement inférieure à la fréquence de résonance. Lorsqu'on veut filtrer un rang harmonique élevé, il faut toujours prendre garde à ce que l'anti-résonance n'amplifie pas les rangs harmoniques les plus faibles ; c'est pourquoi, lorsqu'on utilise des filtres accordés sur des rangs harmoniques différents, par exemple 5, 7, 11, leur mise en service doit se faire par ordre croissant aux rangs harmoniques filtrés et inversement lors de la mise hors service.

La présence de résonance au sein d'un réseau électrique entraîne un certain nombre de risques vis-à-vis des perturbations harmoniques. Cela signifie qu'en cas de résonance parallèle dans un réseau, les condensateurs peuvent être soumis à de fortes tensions harmoniques et se détériorer. Cette situation est typique d'un réseau de distribution ou d'un réseau interne d'usine où la source de courant est une installation d'électronique de puissance. [37]

III.3.2 Les Filtres amortis

Un filtre passif amorti est un circuit RLC en série monté conformément à la figure III.3 ci-dessous. On utilise les filtres amortis pour filtrer simultanément des harmoniques du rang supérieur, et non une harmonique d'un rang particulier. Il est recommandé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On l'appelle aussi un filtre passe haut. La résistance est dite résistance d'amortissement.

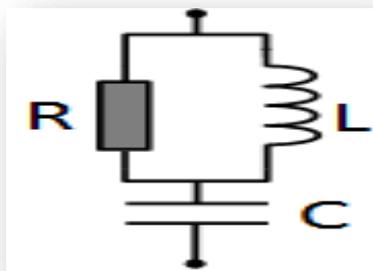


Figure III.3 Filtre amorti

III.3.3 Inductance anti-harmonique ou filtre de barrage :

L'inductance anti-harmonique consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs des compensations sur chaque branche monophasée. Ce type de filtre se comporte comme un court-circuit à sa fréquence d'accord, Ce dispositif a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques.

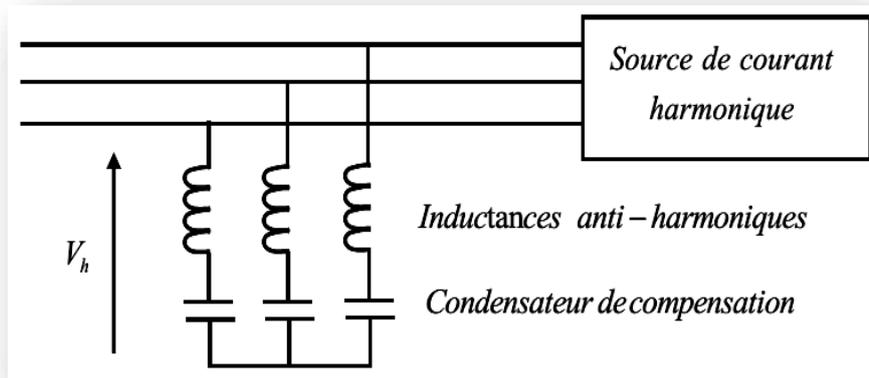


Figure III.4 Inductance anti-harmonique

III.4 Le taux de distorsion harmoniques THD

L'étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et le courant absorbé par la charge contenant des composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est utilisé pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformé. Il est donné par l'expression suivante :

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} i_h^2}}{i_1} \cdot 100\% \quad (III.6)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} v_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (III.7)$$

L'atténuation des harmoniques améliore la qualité d'onde, réduit les pertes dans le circuit, améliore le facteur de puissance et augmente la durée de vie du matériel [27]. Le choix du filtre passif est en fonction de l'application et dimensionné en fonction des paramètres de la charge. Le tableau ci-dessous indique le taux de distorsion permis selon la valeur de la tension [28]

| Bus voltage (v) | Individuel harmonique (%) | Total harmonique distorsion THD (%) |
|--|---------------------------|-------------------------------------|
| $V \leq 1 \text{ KV}$ | 5.0 | 8.0 |
| $1 \leq V \leq 69 \text{ KV}$ | 3.0 | 5.0 |
| $69 \text{ KV} \leq V \leq 161 \text{ KV}$ | 1.5 | 2.5 |
| $161 \text{ kv} \leq V$ | 1.0 | 1.5 |

III.5 Application numérique :

III .5.1 Calcul de la 5^{ème} harmonique

- Réactance capacitive :

$$X_C = V^2 / Q_c \quad X_C = \frac{400^2}{20 \cdot 10^3} = 8 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_C} \rightarrow C = 397.8410^{-6} \text{ F}$$

- Réactance inductive :

$$X_L = X_C / h_n^2 \quad X_L = \frac{8}{5^2} = 0,32 \Omega$$

$$X_L = 2\pi f L \quad L = \frac{X_L}{2\pi f} = 1,0185 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

- Resistance:

$$X_n = \sqrt{X_C X_L} \quad X_n = \sqrt{8 * 0.32} = 1.6 \Omega$$

$$R = \frac{X_n}{Q} \quad R = \frac{1.6}{50} = 0.032 \Omega$$

| Données | Filtre 1 | Filtre 2 | Filtre 3 |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| $Q_c \text{ (kVar)}$ | 20 | 20 | 14,57 |
| h_n | 5 | 7 | 11 |
| Q | 50 | 50 | 50 |
| $V \text{ (V)}$ | 400 | 400 | 400 |
| $C \text{ (uF)}$ | 397.84 | 397.84 | 397.84 |
| $L \text{ (mH)}$ | 1.0185 | 0.5195 | 0.2104 |
| $R \text{ (m}\Omega\text{)}$ | 0.032 | 0.022 | 0.0145 |

Model de simulation :

Sous environnement Sim power System, Simulink/Matlab, nous effectuons une série de simulation :

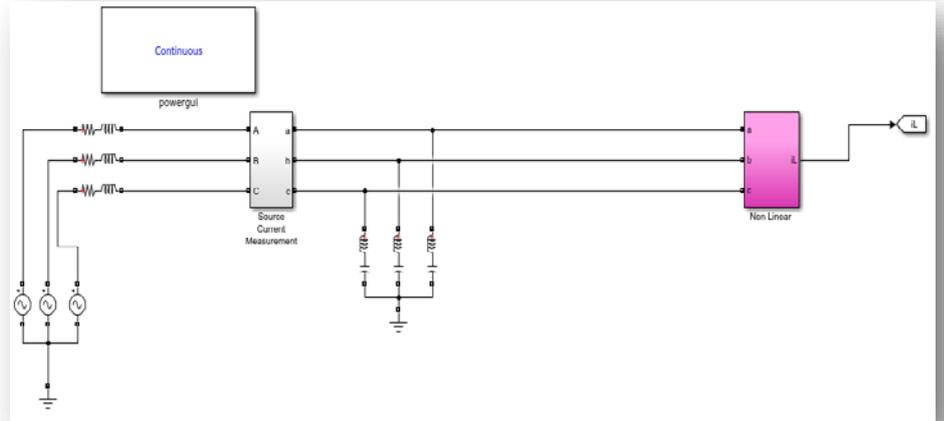


Figure III.5 Le circuit électrique avec les filtres passifs.

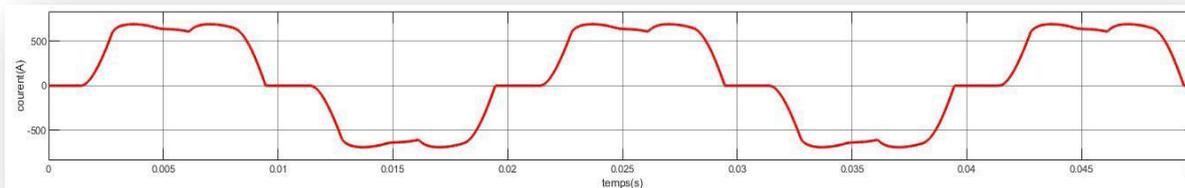


Figure III.6 : Signal du courant de charge

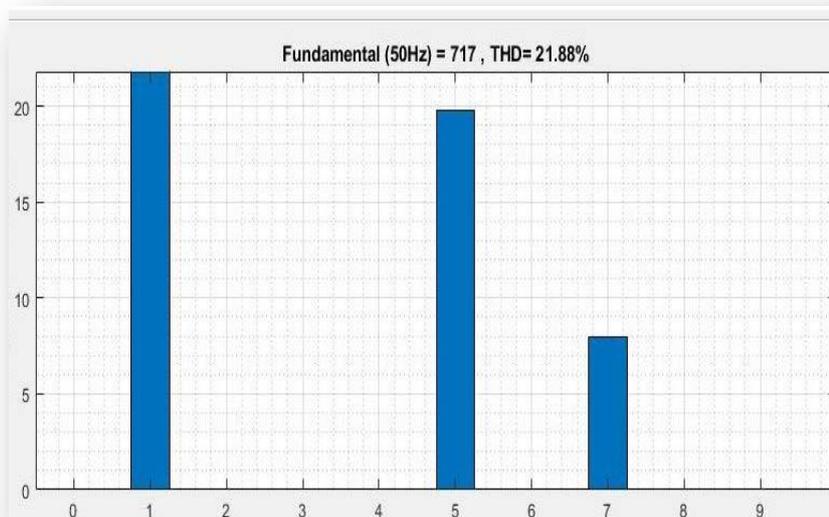


Figure III.7 : THD du courant de charge avant filtrage

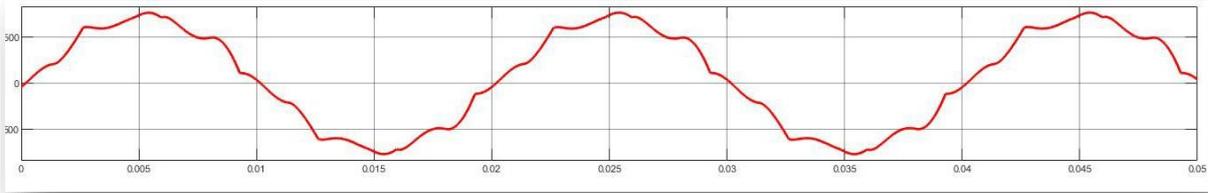


Figure III.8 : Signal du courant après filtrage d'Harmonique 5

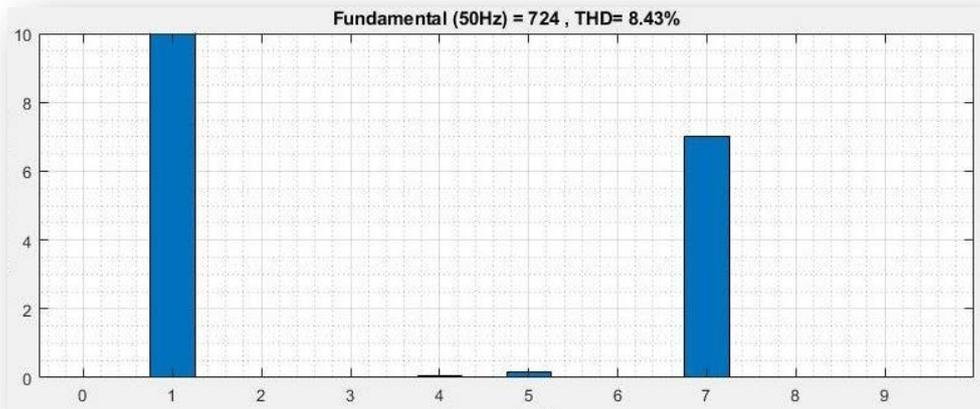


Figure III.9 : THD du courant après filtrage d'Harmonique 5

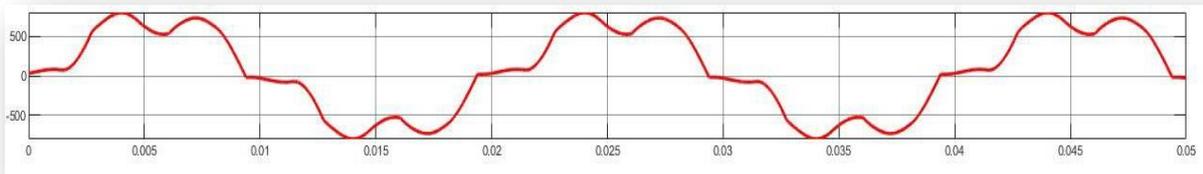


Figure III.10 forme du signal courant après filtrage d'Harmonique 7

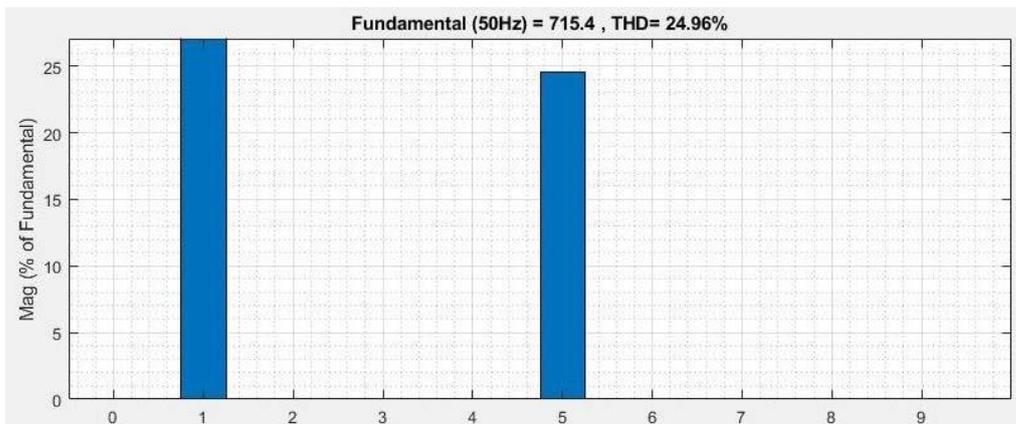


Figure III.11 : THD du courant après filtrage d'Harmonique 7

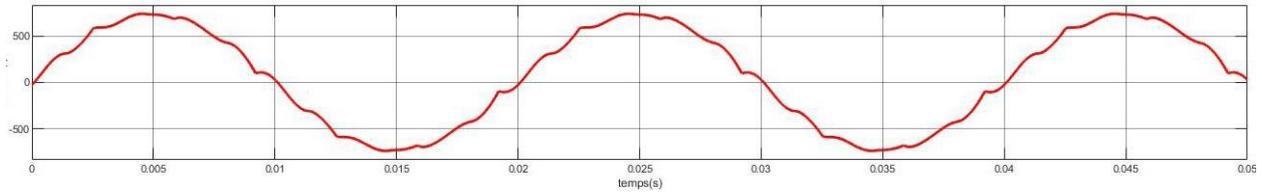


Figure III.12 : Signal du courant après filtrage les deux Harmoniques

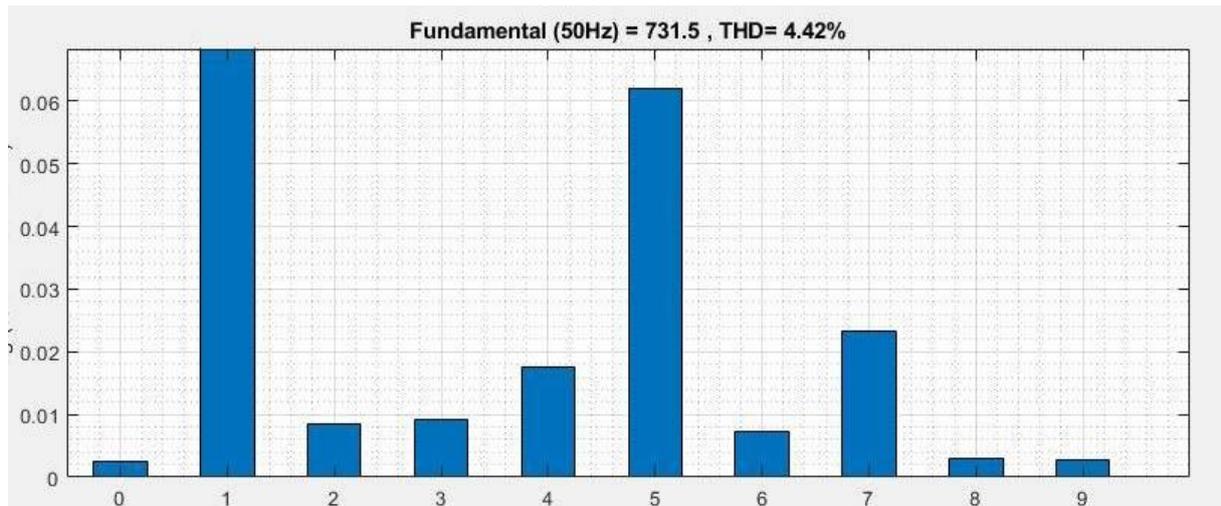


Figure III.13 : THD du courant après filtrage les deux Harmoniques

III.6 Interprétation

D'après la figure III.7 on remarque que la forme du courant est alternative mais non sinusoïdale à cause des harmoniques. Le taux de distorsion harmonique du courant est de 21.88%.

Après l'implantation du filtre passif accordé sur le rang 5 on voit dans la figure III.9 une nette amélioration de la forme d'onde du courant avec un taux de distorsion harmonique de 8.45% comme le montre la figure III.9, ce qui est compatible avec la norme C.E.I.

En suite un deuxième filtre passif sur le rang 7 afficher sur la figure III.11, nous observons une amélioration sur la figure III.13 mieux que ses derniers résultats avec un taux de 4.42%

III.7 Filtre Hybrides :

Les filtres hybrides peuvent être classés selon le nombre d'éléments mis en œuvre dans la topologie étudiée (filtres actifs et filtres passifs), le système traité (monophasé, triphasé trois fils et triphasé quatre fils) et le type d'onduleur utilisé. La figure III.14 présente quelques configurations de filtres hybrides selon le type de système étudié et les éléments associés [29]

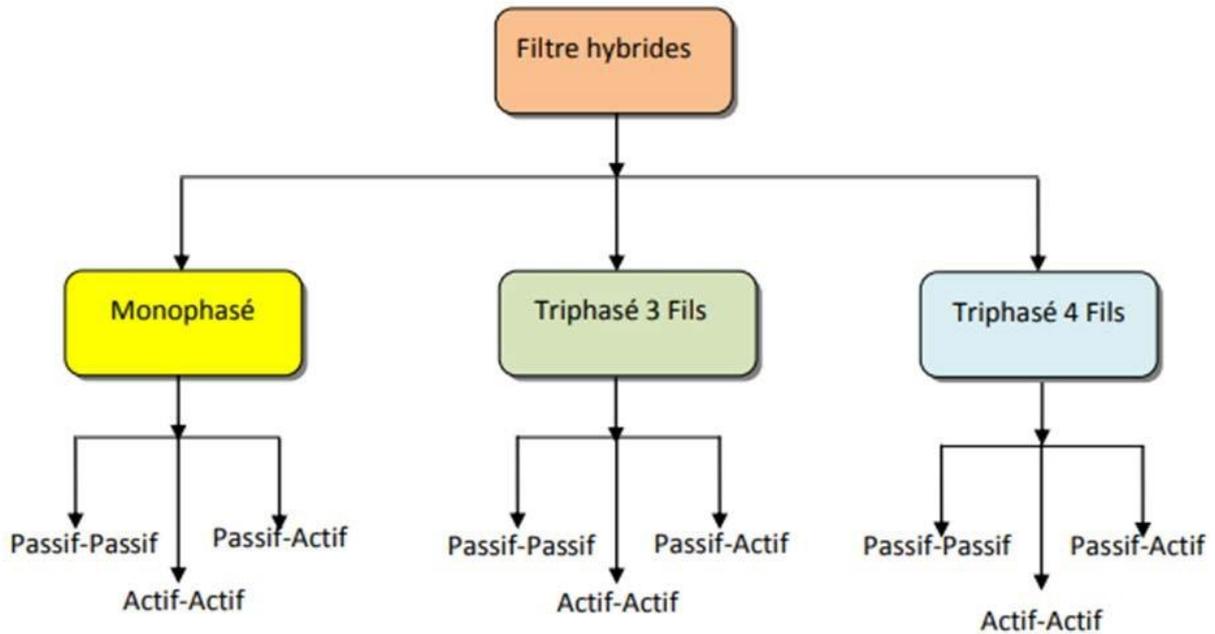


Figure III.14 : configurations de filtres hybrides

III.8 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Dans ce cas, le rôle du filtre passif est d'empêcher certains ordres des courants harmoniques de circuler dans le réseau et de les forcer à le traverser relia à leur fréquence, comme le montre la Figure III.15. [30].

A la fréquence fondamentale, le courant traversant le filtre actif est égal à la somme du courant fondamental de la charge et du courant fondamental du filtre passif.

Aux fréquences harmoniques, le filtre actif agit comme un isolant (circuit ouvert), forçant tous les courants harmoniques de la charge à travers le filtre passif. Les tensions harmoniques aux bornes du filtre passif sont considérées comme un inconvénient de

cette topologie. D'autres inconvénients apparaissent, notamment l'isolement et la protection du filtre actif, et l'effet d'une défaillance du filtre actif sur la charge.[31]

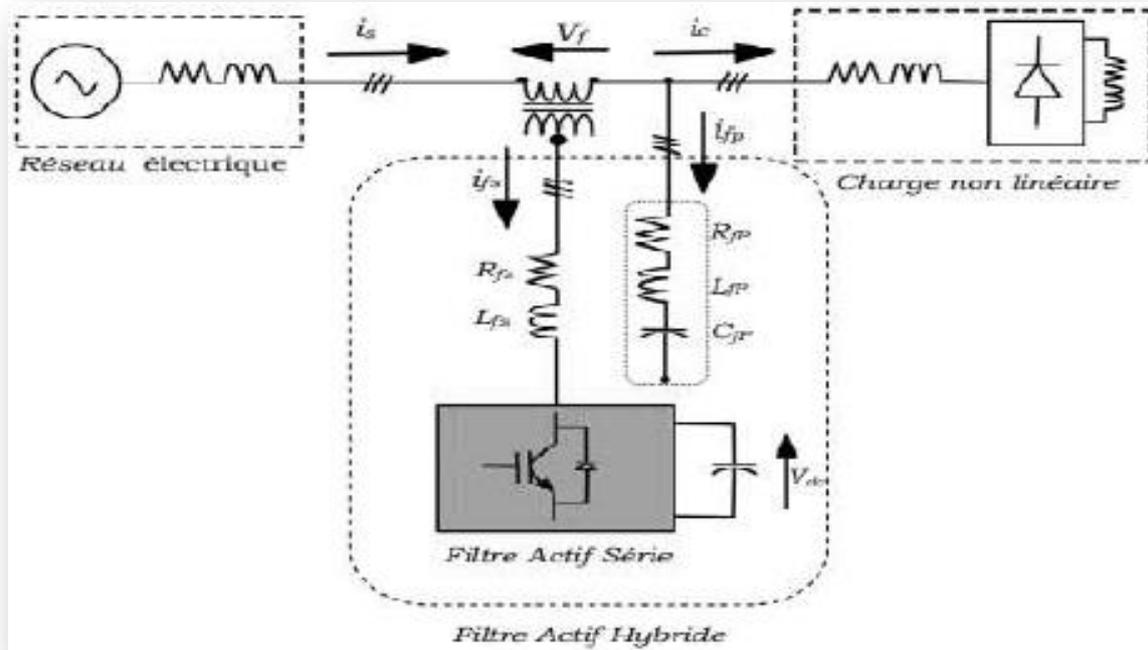


Figure III.15 : filtre actif série avec filtre passif parallèle

III.8.1 Filtre hybride shunt avec transformateur :

Le principe de fonctionnement de cette configuration, illustré à la Figure III.16, est la même que la configuration précédente, avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série puisque le courant qui le traverse est moins critique. De plus, un filtre actif en série évite les court-circuit de la charge. Dans cette configuration, le compensateur n'agit que sur les courants harmoniques et augmente l'efficacité du filtre passif en évitant d'amplifier les tensions harmoniques en amont de la fréquence anti-résonnante du filtre passif.

De plus, il atténue considérablement les courants harmoniques entre la charge et la source en réduisant l'impédance globale (filtre passif plus compensateur actif). De plus, le compensateur actif n'étant pas traversé par tout le courant du réseau, sa taille (notamment la taille du coupleur magnétique) peut être réduite. Cette structure est donc bien adaptée à traiter les réseaux de puissances et tensions élevées, tout en assurant le

déphasage des composantes fondamentales. Son principal inconvénient est que les filtres passifs sont définis en fonction de la nature de chaque charge ce qui nécessite toujours une étude préalable [20].

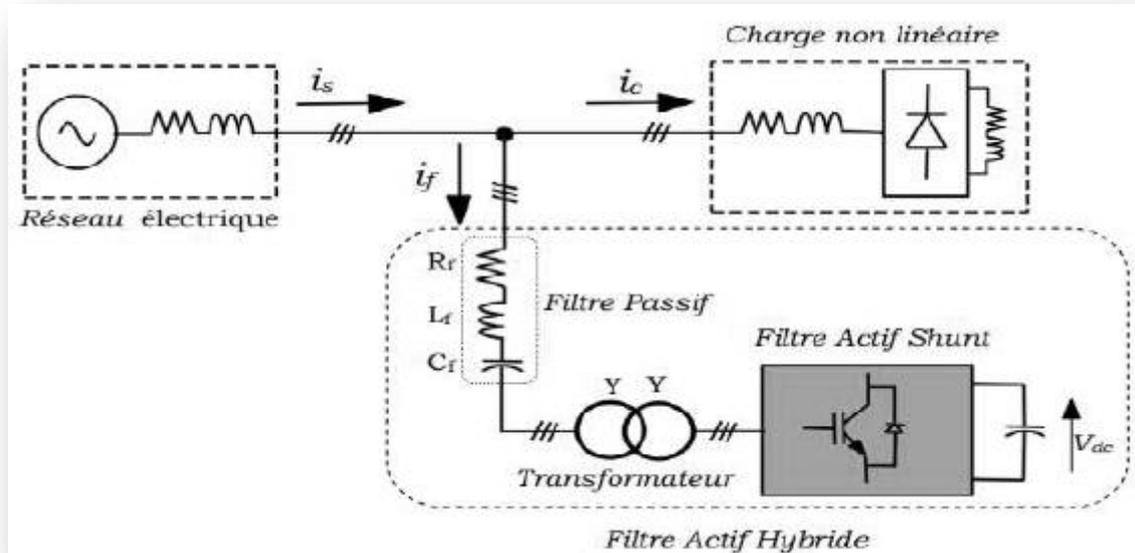


Figure III.16 : Filtre actif hybride avec transformateur

III.8.2 Filtre hybride shunt sans transformateur :

La topologie du filtre hybride shunt triphasé sans transformateur est illustrée dans la Figure III.17. Le filtre hybride shunt triphasé est composé d'un filtre passif accordé à la 5^{ème} ou 7^{ème} harmonique, et un filtre actif de dimensionnement réduit formé par un onduleur de type source de tension. Le filtre actif joue un rôle essentiel en réduisant les harmoniques de courant de source. Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une faible impédance à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale [32].

Ce système présente deux avantages :

- Dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible
- Filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

Dans cette configuration, le compensateur n'agit que sur les courants harmoniques, et améliore l'efficacité des filtres passifs en évitant l'amplification des tensions harmoniques qui sont en amont aux fréquences d'antirésonances des filtres passifs. De même, il atténue fortement les courants harmoniques entre la charge et la source par abaissement de l'impédance globale. En plus, puisque le compensateur actif n'est pas traversé par la totalité du courant réseau, son dimensionnement est peut-être réduit.

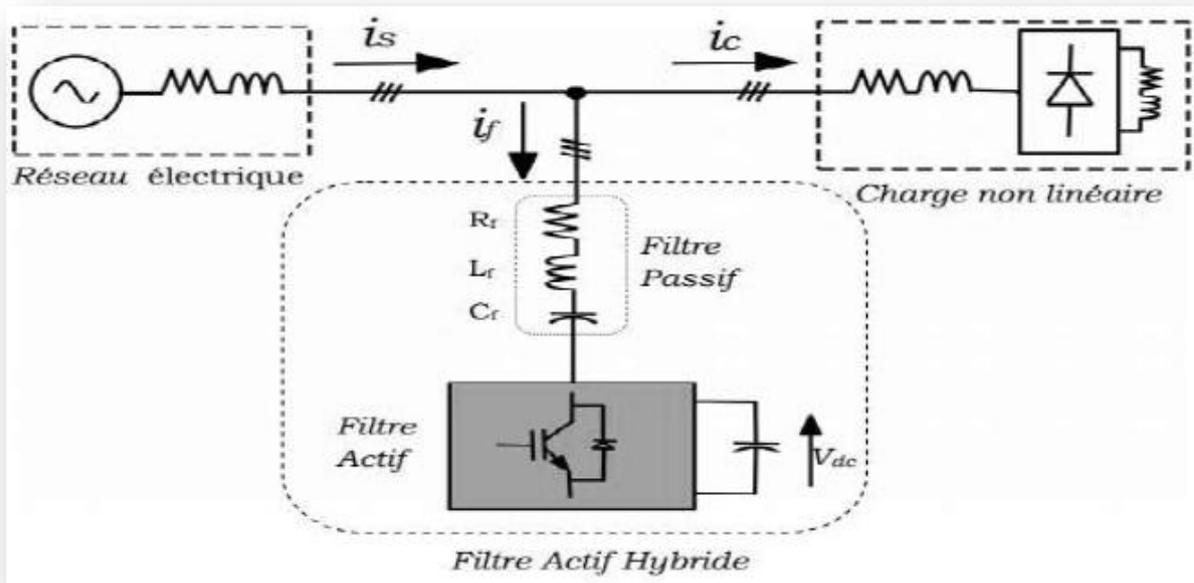


Figure III.17 Filtre actif hybride sans transformateur

III.8.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration figure III.18 est la compensation des courants harmoniques de basses fréquences émis par la charge polluante.[33]

Alors que le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle.

Cette combinaison permet d'introduire un bon amortissement pour éviter le problème d'antirésonance [34].

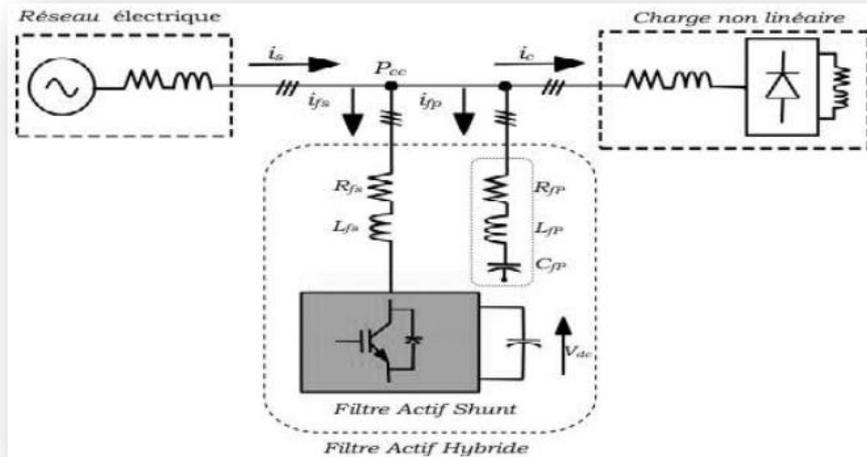


Figure III.18 Filtre hybride composé d'un filtre actif shunt et un filtre passif parallèle.

III.8.4 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif :

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme le décrit la figure III.19

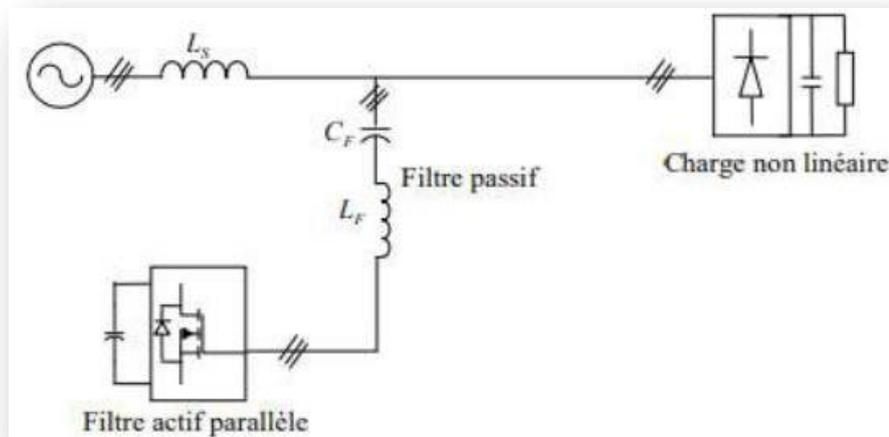


Figure III.19 Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abrid'un éventuel court-circuit de la charge [35].

III.8.5 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif série

Cette structure permet de réduire les risques d'antirésonance entre les éléments des filtres passifs et l'impédance du réseau. Dans ce cas, le filtre actif série agit comme une résistance vis à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif, tout en restant transparent à la fréquence fondamentale. La figure III.20 illustre cette topologie [36].

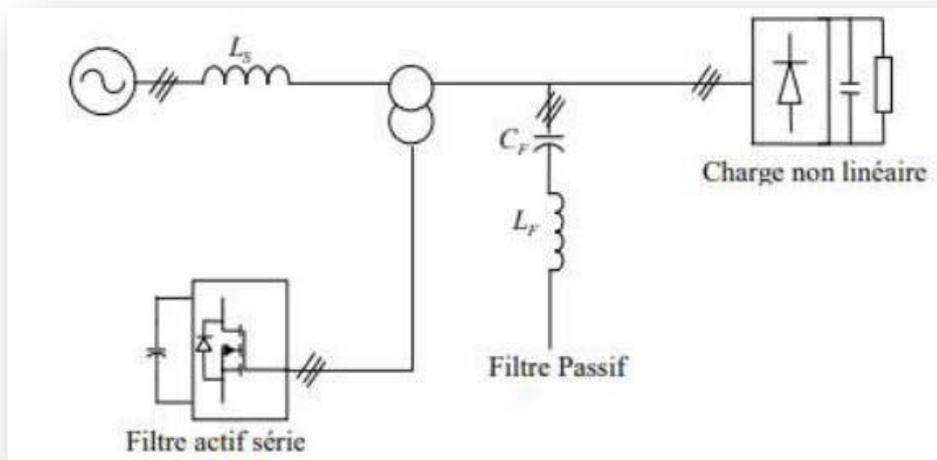


Figure III.20 : Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif

III.9 Filtre hybride série

La topologie à analyser ici est composée d'un filtre actif en série (Alimentation) et un filtre passif (HSSF) en série avec la charge. Filtre passif réglé aux fréquences harmoniques de tension les plus significatives. Ils sont des différentes topologies de filtre passif, en fonction du nombre d'éléments de stockage d'énergie [59], bien que Cela dit, certaines d'entre elles sont difficiles à mettre en œuvre d'un point de vue pratique [60]. Les filtres passe-bande sont les plus simples et les plus largement utilisés. Son principal avantage est qu'il a une Impédance pratiquement nulle à la fréquence de résonance.

Le model choisi pour nos simulations est comme suit :

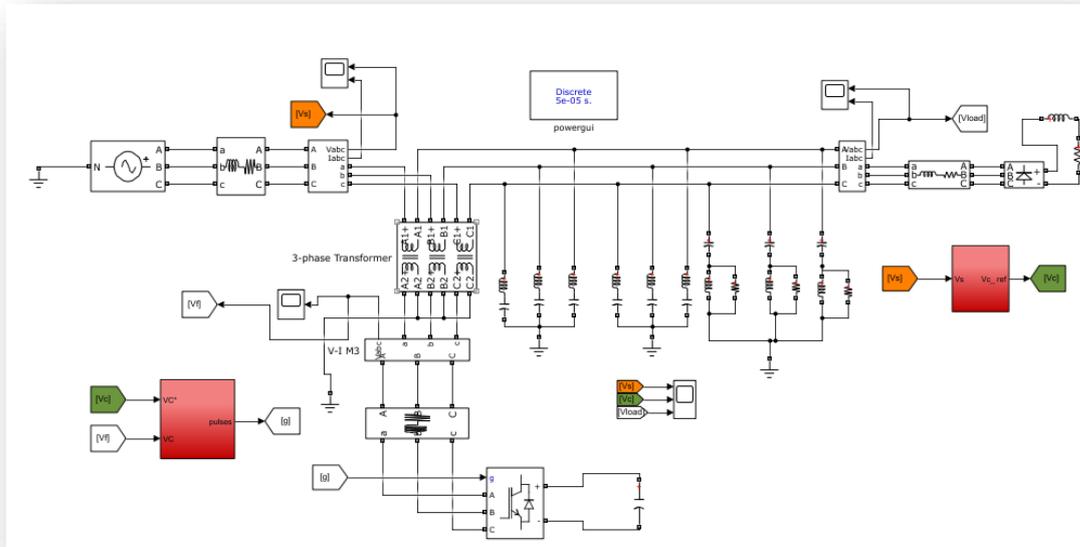


Figure III 21 : Model de simulation FAS+FP

Tableau de paramètre de simulation du filtre actif série pur et hybride.

| | Paramètres | Valeurs Numériques |
|--|----------------------------|--------------------|
| Réseau électrique | Tension du réseau VS | 400v |
| | Fréquence f | 50Hertz |
| | Résistance R s | 0.001mΩ |
| | Inductance Ls | 1,296mH |
| Charge polluante | Charge R en série avec L | 30 mΩ, 10mH |
| | Résistance Rc | 0.001mΩ |
| | Inductance Lc | 2mH |
| Filtre Actif de puissance hybride | Résistance Rf | 0.032mΩ |
| | Inductance Lf | 1,0185mH |
| | Condensateur Cf | 0.39784mF |
| | Inductance | 6.mF |
| | Bande d'Hystérésis | 0.01A |
| Paramètre de la simulation | Temps d'échantillonnage Te | 6 us et 1.2 us |
| | Type de pas | Pas fixe |
| | Méthode de résolution | Ode (Euler) |

A. Chute de tension pour le filtre hybride :

On applique une chute de tension dans l'intervalle 0,5 à 0,8 s, et on obtient les courbes suivantes de tension de source V_s , tension injecté V_{inj} par le filtre de puissance série et en dernier la tension de charge V_c et I_s courent de source, courent injecté I_{inj} , courent I_c

Tension :

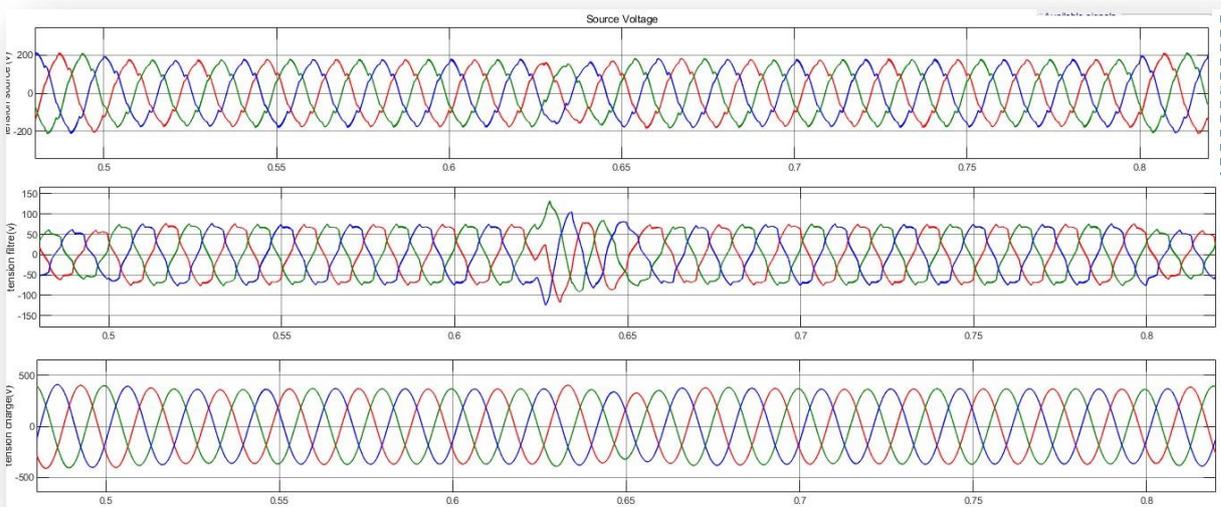


Figure III.22 : Evolution des tensions V_s , V_{inj} et V_c suite à une chute de tension de 10%

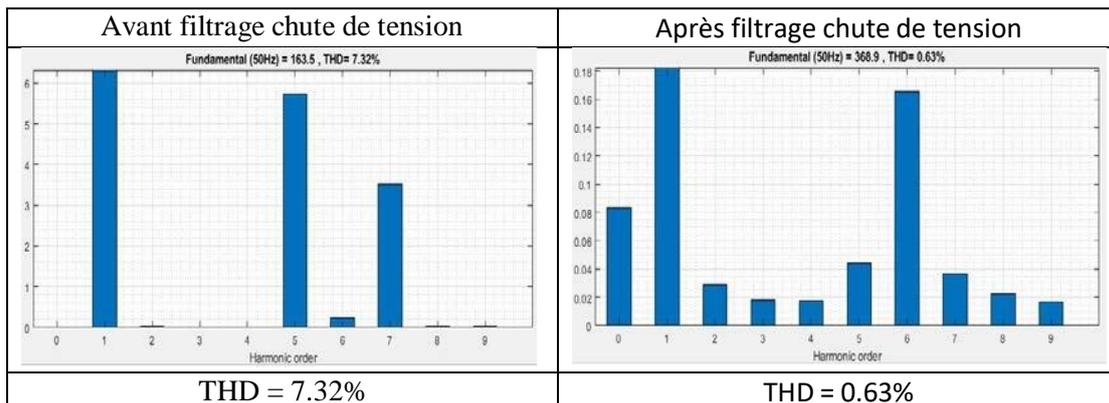


Figure III.23 : THD du tension hybride (chute tension)

Courant :

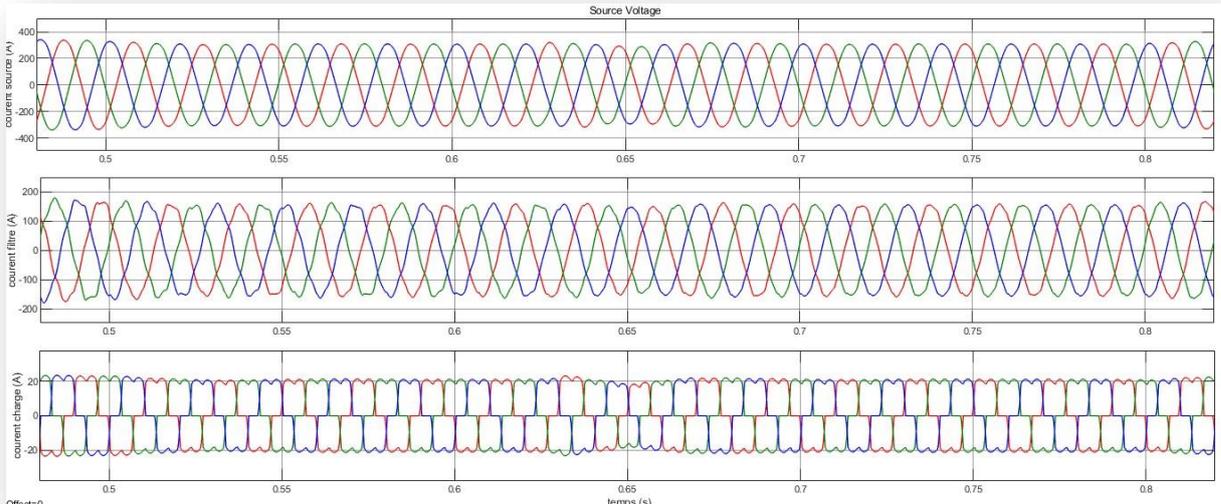


Figure III.24 : Evolution des courant I_s , I_{inj} et I_c suite à une chute de tension de 10%

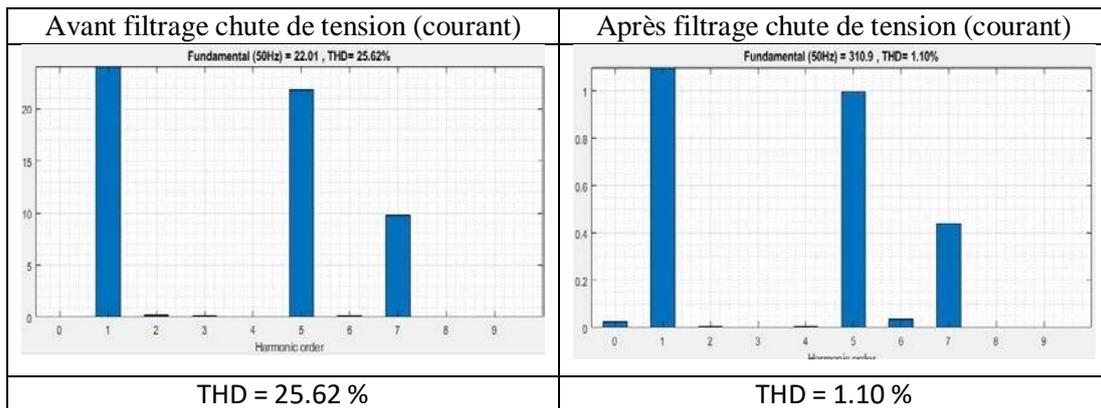


Figure III.25 : THD du courant hybride (chute tension)

Interprétation :

La figure III.24 représente la forme d'onde des courants d'alimentation. On remarque une distorsion des courants ce qui rend la présence des harmoniques dans le réseau.

La figure III.25 représente la forme de la tension d'alimentation. Il y a une grande amélioration pour le courant et la tension ce qui définit le THD après filtrage 1.10 % pour le courant figure III.25 et 0.63% pour la tension Figure III.23

B. Surtension pour le filtre hybride

On applique une chute de tension dans l'intervalle 0,5 à 0,8 s,

Tension

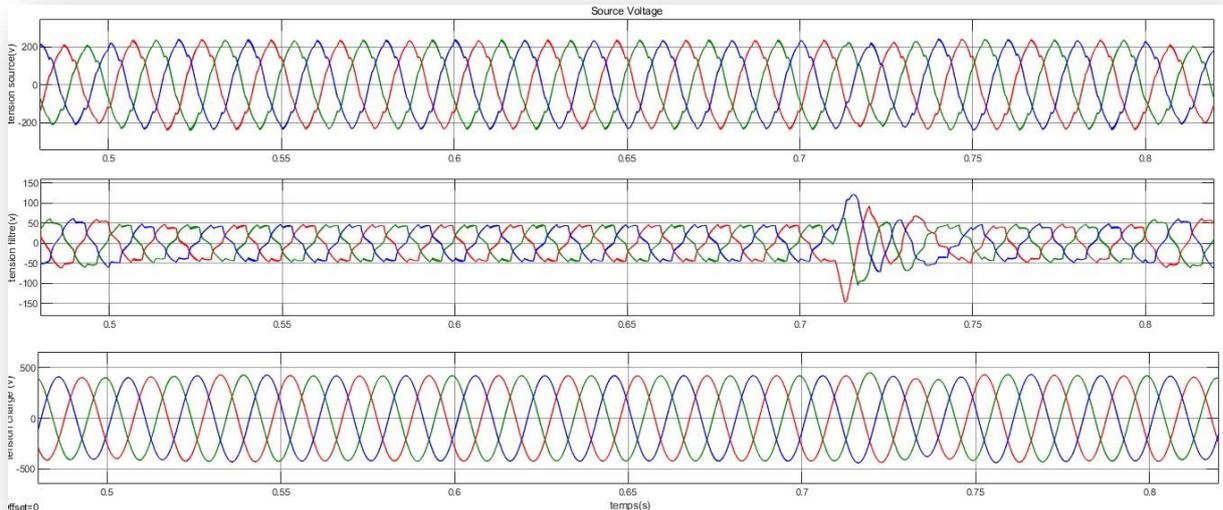


Figure III.26: filtre hybride : Evolution des tensions Vs, Vinj et Vc suite à une sur tension de 10%

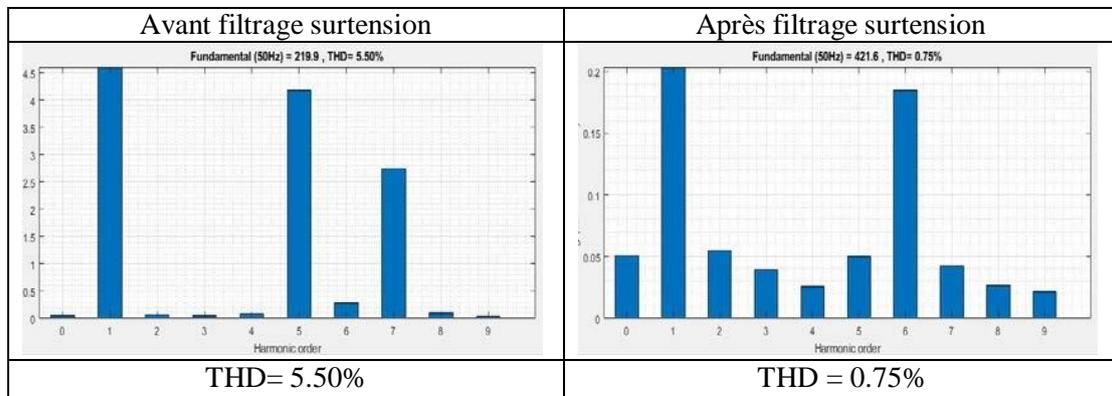


Figure III.27 : THD du tension hybride (sur tension)

Courant :

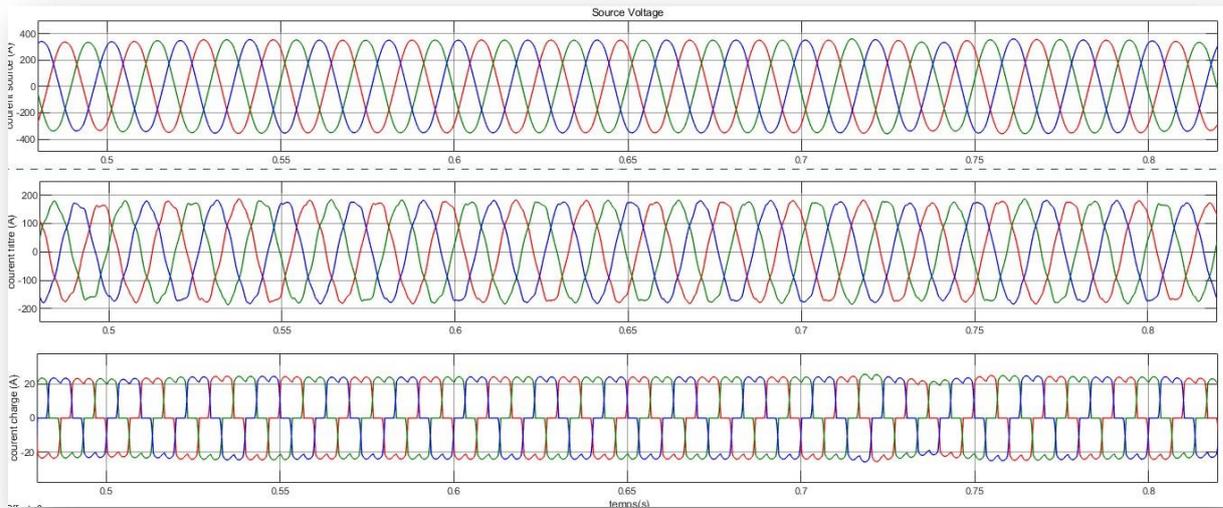


Figure III.28 : Evolution des courants I_s , I_{inj} et I_c suite à une surtension de 10%

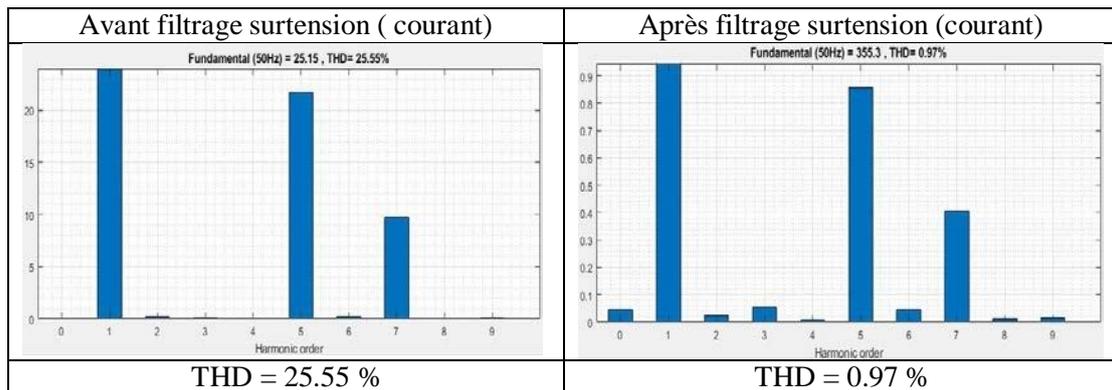


Figure III.29 : THD du courant hybride (sur tension)

Interprétation :

On a créé des perturbations surtension entre [0.5- 0.8s] dans la source programmable, alors les résultats de simulation obtenus montrent que la commande qu'on a utilisée élimine les perturbations de tension, avec une amélioration de 80 % pour les courants et les tensions

Déséquilibre pour le filtre hybride :

Tension :

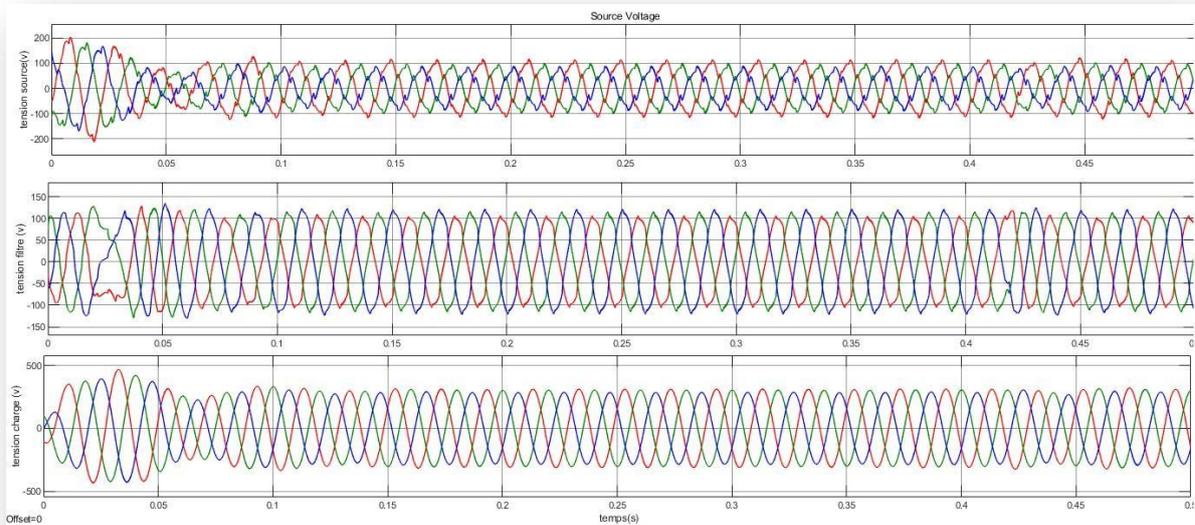


Figure III.30 : filtre hybride : Evolution des tensions Vs, Vinj et Vc déséquilibre

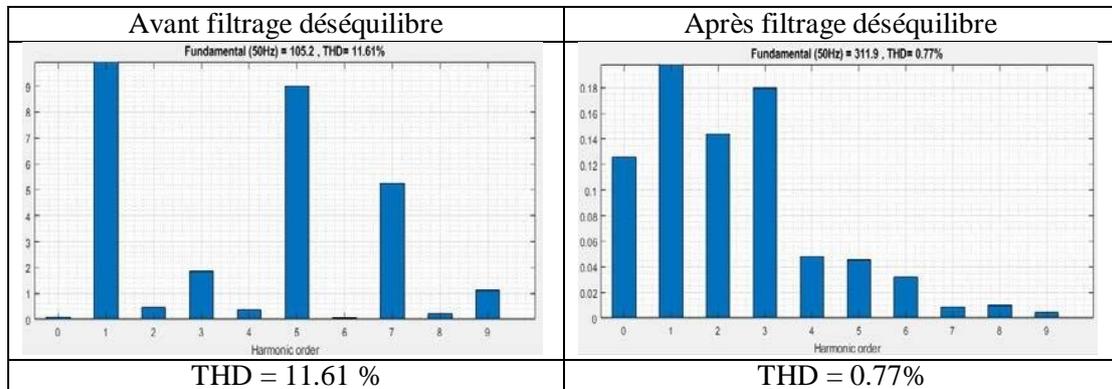


Figure III.31 : THD du tension hybride (déséquilibre)

Courant :

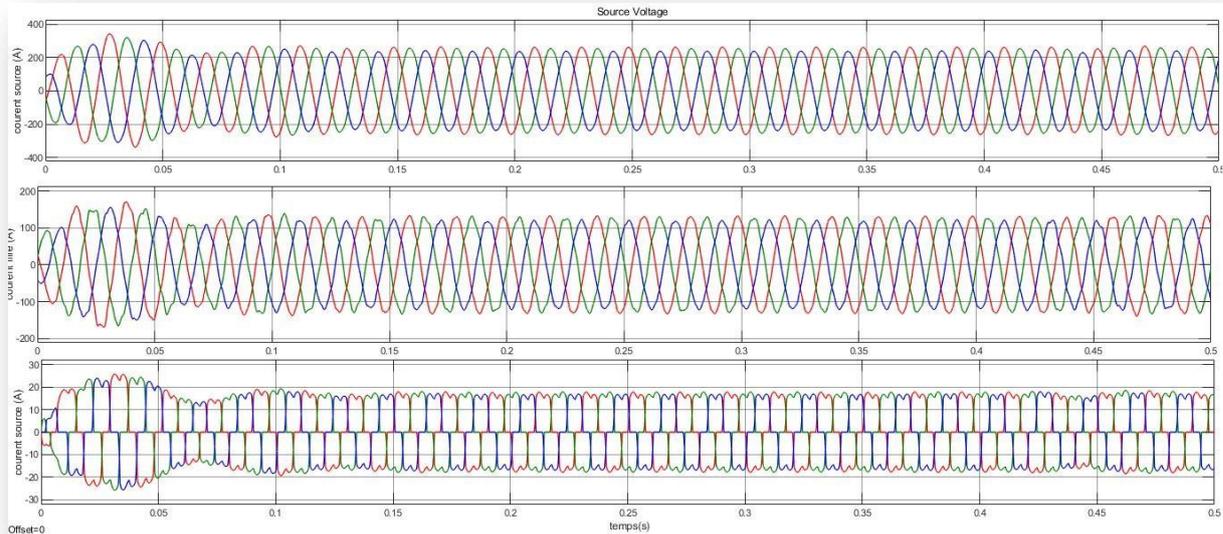


Figure III.32 : filtre hybride : Evolution des courant I_s , I_{inj} et I_c suite à un déséquilibre

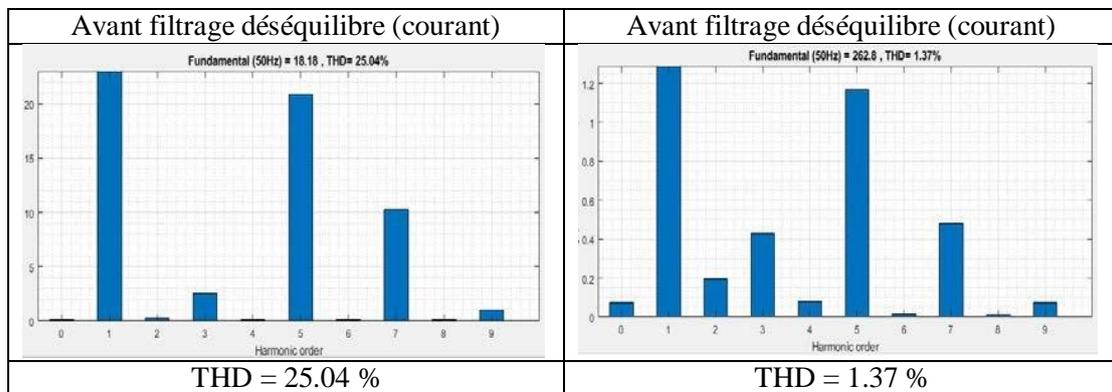


Figure III.33 : THD du courant hybride (déséquilibre)

Interprétation :

Suite à pratique à notre modèle de simulation, le filtre actif hybride a eu pour effet une amélioration de la qualité du signal tension et courant appliqué à la charge de sorte que le THD de courant est passé de la valeur de 25.04 % à 1.37% et pour tension de 11.61% à 0.77%.

On remarque à l'œil nu que la tension appliquée à la charge est très proche d'une sinusoïde.

Harmonique pour le filtre hybride

Tension :

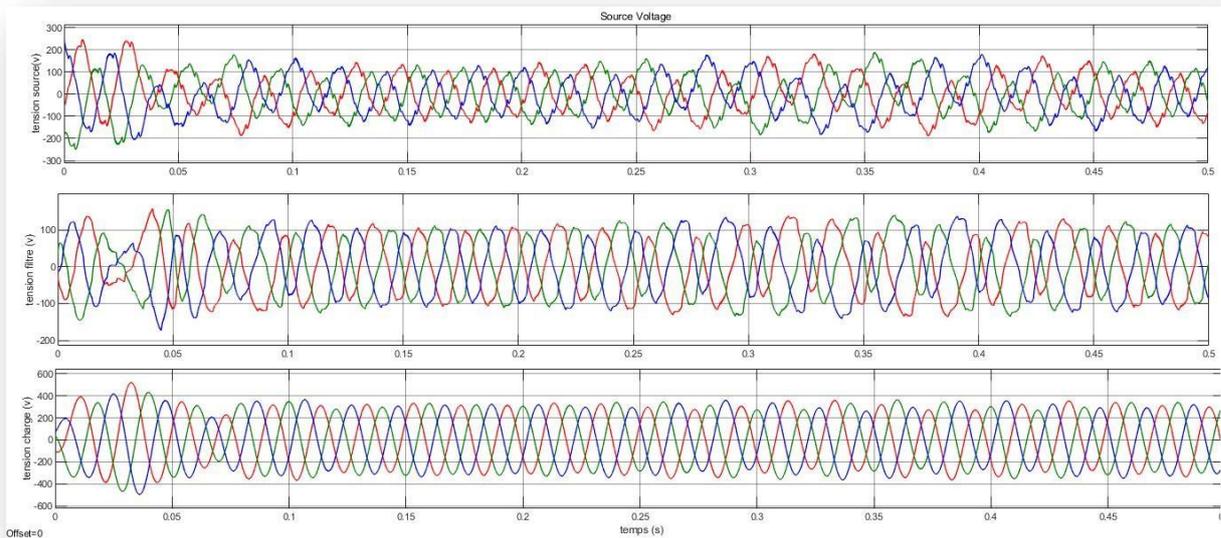


Figure III.34 : filtre hybride : Evolution des tensions Vs, Vinj et Vc Harmonique

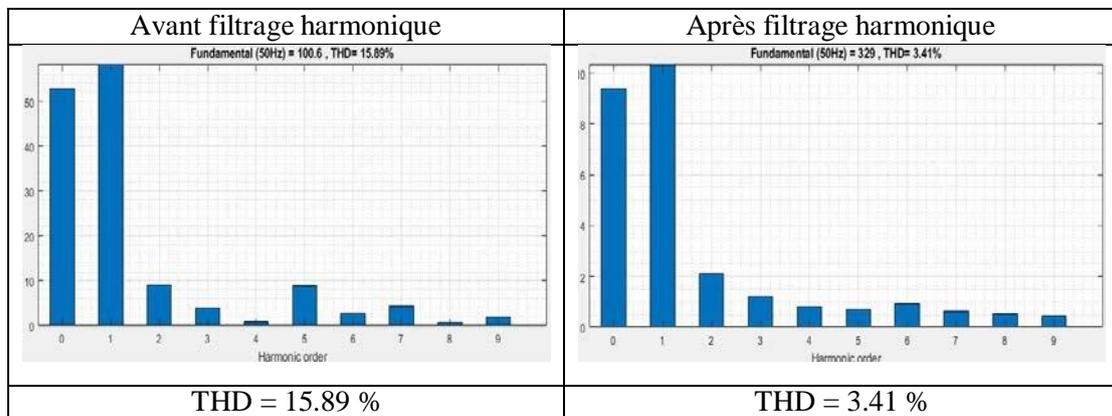


Figure III.35 : THD du tension hybride (harmonique)

Courant :

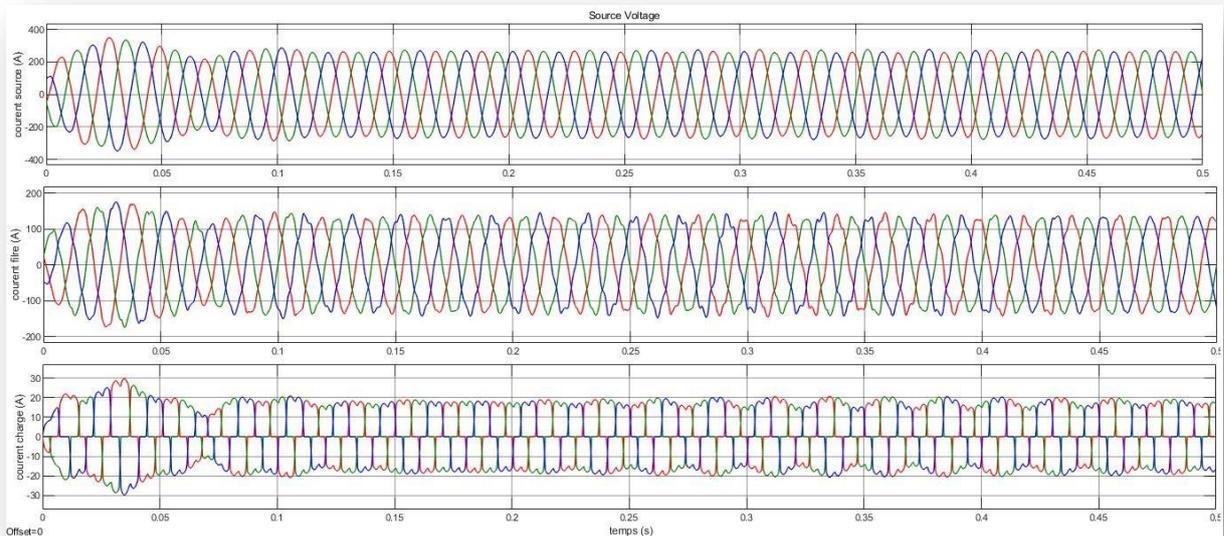


Figure III.36 : filtre hybride : Evolution des courant I_s , I_{inj} et I_c Harmonique

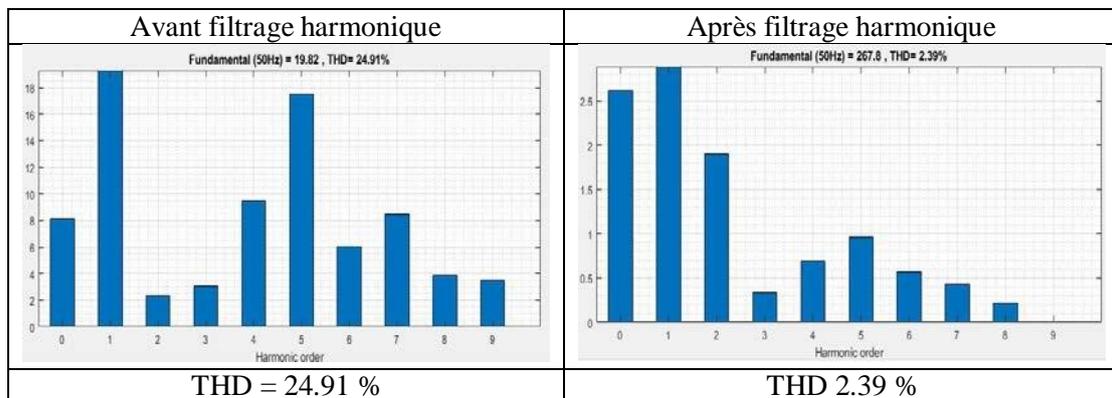


Figure III.37 : THD du courant hybride (harmonique)

Interprétation :

D 'après les figures III.36 III.34 on remarque que le déséquilibre courant et tension sont presque éliminées. Ce filtre actif de puissance hybride nous a permis une réduction des harmoniques de courant et obtenir une valeur THD de 2,39 % et 3.41% après filtrage.

III.10 CALCUL THÉORIQUE de THD

Le calcul concerne l'étude du réseau triphasé sans filtrage et avec filtrage hybride contient un filtre passif pour les harmonique 5,7,11 du tension et du courant pour le taux global de distorsion harmonique THD_v, THD_i

| Frequency (Hz) | Component | Magnitude (%) | Phase (°) |
|----------------|-----------|---------------|-----------|
| 0 | (DC) | 0.03% | 90.0° |
| 50 | (Fnd) | 100.00% | -11.6° |
| 100 | (h2) | 0.12% | 7.8° |
| 150 | (h3) | 0.15% | 197.8° |
| 200 | (h4) | 0.15% | -66.5° |
| 250 | (h5) | 21.91% | 121.6° |
| 300 | (h6) | 0.07% | 202.9° |
| 350 | (h7) | 9.68% | 97.7° |
| 400 | (h8) | 0.11% | 98.7° |
| 450 | (h9) | 0.14% | -65.5° |
| 500 | (h10) | 0.07% | 41.0° |
| 550 | (h11) | 6.82% | 227.3° |
| 600 | (h12) | 0.03% | -44.6° |
| 650 | (h13) | 4.32% | 207.4° |
| 700 | (h14) | 0.04% | 140.0° |
| 750 | (h15) | 0.08% | 42.2° |
| 800 | (h16) | 0.06% | 202.0° |
| 850 | (h17) | 2.78% | -31.4° |

Figure III.38 Les valeurs numériques des différents courants harmoniques avant le filtrage.

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{i_1} \cdot 100\%$$

$$THD_{ii} = \frac{\sqrt{0.15^2 + 21.91^2 + 9.68^2 + 06.82^2 + 4.32^2}}{100} \cdot 100\%$$

$$THD_{ii} \approx 24.33\%$$

```

Sampling time = 1.5361e-05 s
Samples per cycle = 1302
DC component = 0.05329
Fundamental = 310.1 peak (219.2 rms)
THD = 1.07%
    
```

| Frequency (Hz) | Component | Amplitude (%) | Phase (°) |
|----------------|-----------|---------------|-----------|
| 0 | (DC) | 0.02% | 270.0° |
| 50 | (Fnd) | 100.00% | -0.7° |
| 100 | (h2) | 0.06% | -10.7° |
| 150 | (h3) | 0.15% | 252.6° |
| 200 | (h4) | 0.01% | 147.7° |
| 250 | (h5) | 0.39% | 41.3° |
| 300 | (h6) | 0.01% | 200.6° |
| 350 | (h7) | 0.21% | 6.4° |
| 400 | (h8) | 0.02% | -79.4° |
| 450 | (h9) | 0.06% | 174.2° |
| 500 | (h10) | 0.03% | 266.8° |
| 550 | (h11) | 0.23% | 140.0° |
| 600 | (h12) | 0.02% | 98.3° |
| 650 | (h13) | 0.19% | 114.7° |
| 700 | (h14) | 0.04% | 71.5° |
| 750 | (h15) | 0.04% | 15.0° |
| 800 | (h16) | 0.03% | -45.1° |

Figure III.39 Les valeurs numériques des différents tension harmoniques avant le filtrage.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} v_h^2}}{v_1} \cdot 100\%$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{0.06^2 + 0.39^2 + 0.21^2 + 0.23^2 + 0.19^2}}{100} \cdot 100\%$$

$$THD_V \approx 1.04\%$$

```

Sampling time = 3.11648e-05 s
Samples per cycle = 642
DC component = 0.01294
Fundamental = 294.1 peak (208 rms)
THD = 0.83%
    
```

| Frequency (Hz) | Component | Amplitude (%) | Phase (°) |
|----------------|-----------|---------------|-----------|
| 0 | (DC) | 0.00% | 270.0° |
| 50 | (Fnd) | 100.00% | -2.8° |
| 100 | (h2) | 0.06% | 176.4° |
| 150 | (h3) | 0.03% | 210.1° |
| 200 | (h4) | 0.03% | 149.2° |
| 250 | (h5) | 0.59% | 253.4° |
| 300 | (h6) | 0.03% | 181.7° |
| 350 | (h7) | 0.42% | -86.3° |
| 400 | (h8) | 0.03% | 177.9° |
| 450 | (h9) | 0.00% | 174.1° |
| 500 | (h10) | 0.02% | 134.4° |
| 550 | (h11) | 0.18% | -23.5° |
| 600 | (h12) | 0.01% | 148.5° |
| 650 | (h13) | 0.13% | 11.4° |
| 700 | (h14) | 0.01% | 209.9° |
| 750 | (h15) | 0.01% | 200.1° |
| 800 | (h16) | 0.01% | 181.9° |

Figure III.40 Les valeurs numériques des différents tension harmoniques après le filtrage.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} v_h^2}}{V_1} \cdot 100\%$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{0.03^2 + 0.59^2 + 0.42^2 + 0.18^2 + 0.13^2}}{100} \cdot 100\%$$

$$THD_V \approx 0.82\%$$

| Frequency (Hz) | Component | Magnitude (%) | Phase (°) |
|----------------|-----------|---------------|-----------|
| 0 | (DC) | 0.07% | 270.0° |
| 50 | (Fnd) | 100.00% | -49.4° |
| 100 | (h2) | 0.02% | 129.0° |
| 150 | (h3) | 0.02% | 129.5° |
| 200 | (h4) | 0.02% | 135.3° |
| 250 | (h5) | 1.29% | -13.4° |
| 300 | (h6) | 0.02% | 261.1° |
| 350 | (h7) | 0.65% | 15.8° |
| 400 | (h8) | 0.01% | 217.0° |
| 450 | (h9) | 0.00% | 219.4° |
| 500 | (h10) | 0.00% | 222.0° |
| 550 | (h11) | 0.28% | 73.9° |
| 600 | (h12) | 0.00% | 207.0° |
| 650 | (h13) | 0.18% | 104.3° |
| 700 | (h14) | 0.00% | 209.6° |
| 750 | (h15) | 0.00% | 192.8° |
| 800 | (h16) | 0.00% | 199.2° |

Figure III.41 Les valeurs numériques des différents courants harmoniques après le filtrage.

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{i_1} \cdot 100\%$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{0.02^2 + 1.29^2 + 0.65^2 + 0.28^2 + 0.18^2}}{100} \cdot 100\%$$

$$THD_i \approx 1.48\%$$

Les calculs théoriques et les valeurs simulés sont presque identiques. L'ajout des filtres baisse les valeurs des harmoniques perturbantes et réduit les taux de distorsion THD, ainsi que la puissance réactive, elle est diminuée, cela veut dire l'amélioration du facteur de puissance du circuit. Le tableau ci-dessous résume les résultats avant et après filtrage passif.

| Paramètre | Avant filtrage | Après filtrage |
|----------------|----------------|----------------|
| $THD_v(\%)$ | 1.07 | 0.83 |
| $THD_{ii}(\%)$ | 25.59 | 1.49 |

III.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé et dimensionné un filtre passif résonant pour la compensation des harmoniques. Les distorsions dues à la génération des harmoniques sont atténuées par ces filtres résonants. Ensuite on a proposé une solution hybride pour remédier aux perturbations et aux harmoniques néfastes de la tension. Cette topologie hybride consiste à installer un filtre actif série et un filtre passif avec le réseau. Le filtre résultant c'est un filtre hybride capable de prendre en charge à la fois les perturbations et les harmoniques de tension. Le filtre hybride série arrive à améliorer la qualité du signal tension appliqué à la charge, et il offre la possibilité aussi de compenser la variation de la tension d'une façon remarquable. Nos résultats de simulation montrent que le filtre hybride de puissance active proposé réduit le pourcentage de THD environ 79 %, de sorte que le THD du courant de source est réduit de 20,59 % à environ 1,49%.

Conclusion générale

Cette mémoire de fin d'étude présente une étude, une modélisation et une commande d'un système basée sur le filtrage actif hybride. L'objet de notre travail est d'introduire un filtre actif hybride qui se compose essentiellement d'une partie puissance et d'une partie commande pour éliminer les pollutions créées par les différentes charges non linéaires, tels que les courants harmoniques et le réactif du courant même dans le cas des charges linéaire.

Dans le premier chapitre nous avons parlé sur la qualité de l'énergie électrique, et les différents types des perturbations, et les harmoniques de la tension et des courants, qui déséquilibrent les systèmes des réseaux électriques.

Et pour le deuxième chapitre, nous avons analysé et modéliser la commande classique, des modèles mathématiques couplé avec le filtre actif série, avec la programmation sur Matlab pour voir les résultats.

Le troisième chapitre est plus particulièrement dédié à étude des topologies de filtres hybrides associées à différentes stratégies de commandes. Ces topologies ont pour but de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau redeviennent sinusoïdaux.

Les travaux de recherche que nous avons rapportés dans ce mémoire répondant aux exigences que nous nous sommes déjà fixées, en l'occurrence étude par simulation et validation expérimentale des filtres actifs séries et hybride série d'améliorer la qualité de l'énergie en rendant les courants sinusoïdaux et en phase avec les tensions du réseau électrique.

Résumer

Le but de cette thèse est de faire une rédaction sur des recherches théoriques, et une simulation sur la réduction des harmoniques de courant de charge en utilisant le filtrage actif de puissance hybride don la combinaison de filtres actifs et passifs.

Le filtre actif est utilisé pour éliminer les harmoniques de faible ordre et de forte amplitude même s'il ne s'agit pas d'une solution économique. Dans la mesure où les filtres passifs sont acceptés comme une solution rentable.

Dans la première partie, la qualité de l'énergie est présentée, les différentes perturbations pouvant survenir dans les réseaux électriques, les normes, et les différents filtrages du système.

Dans la deuxième partie on a étudié le filtrage actif série, ces performances et sa configuration. Nous approfondissons la théorie PLL et sa pertinence pour compenser les harmoniques de tension et les perturbations de tension afin de compenser les défauts du système.

Pour la troisième partie on a introduit un filtre hybride pour éliminer les pollutions créés par les différentes charges non linéaires.

Et pour la simulation on utilise le logiciel Matlab-Simulink, et Sim Power System qui développe un modèle de simulation, pour chaque étude de système d'évaluation des performances de filtrage.

Ces résultats de simulation obtenus démontrent l'efficacité et la garanti d'avoir les résultats ou les performances attendus.

Abstract

The aim of this thesis is to write about theoretical research, and to simulate the reduction of charge current harmonics using hybrid power active filtering, using a combination of active and passive filters.

The active filter is used to eliminate low order and high amplitude harmonics even if it is not an economical solution. As long as passive filters are accepted as a cost-effective solution.

In the first part, the quality of the energy is presented, the different disturbances that can occur in the electrical networks, the standards, and the different filters of the system.

In the second part we studied the series active filtering, these performances and its configuration. We deepen the p-q theory and its relevance to compensate for voltage harmonics and voltage disturbances to compensate for system faults.

For the third part, a hybrid filter was introduced to eliminate the pollution created by the various non-linear charges.

And for the simulation uses the software Matlab-Simulink, and Sim Power System that develops a simulation model, for each study of system of evaluation of the filtering performances.

These obtained simulation results demonstrate the efficiency and the guarantee of having the expected results or performance.

ملخص

الترشيح باستخدام الشحن تيار توافقيات تقليل ومحاكاة النظري، البحث عن الكتابة هو الأطروحة هذه من الهدف والسلبية النشطة المرشحات من مزيج باستخدام الهجينة، للطاقة النشط

حلاً يكن لم لو حتى العالية والسعة المنخفض الترتيب ذات التوافقيات من للتخلص النشط المرشح يُستخدم التكلفة حيث من فعال كحل السلبية المرشحات قبول يتم طالما. اقتصادياً

الكهربائية، الشبكات في تحدث أن يمكن التي المختلفة والاضطرابات الطاقة، جودة تقديم يتم الأول، الجزء في للنظام المختلفة والمرشحات والمعايير،

وأهميتها p-q نظرية بتعميق نقوم. وتكوينها العروض هذه للسلسلة، النشط الترشيح درسنا الثاني الجزء في النظام أعطال عن للتعويض الجهد واضطرابات الجهد توافقيات عن للتعويض

الخطية غير الشحنات مختلف عن الناتج التلوث على للقضاء هجين مرشح إدخال تم الثالث، للجزء بالنسبة

نموذجاً يطور الذي Sim Power System و Matlab-Simulink برنامج يستخدم للمحاكاة، وبالنسبة الترشيح أداء تقييم لنظام دراسة لكل للمحاكاة،

المتوقع الأداء أو المتوقعة النتائج تحقيق وضمان كفاءة عليها الحصول تم التي المحاكاة نتائج وتبين.

Bibliographie

- [1] Guemmaz Chihab Eddine, « *Calcul du courant de court-circuit dans les réseaux électriques en utilisant le logiciel CYM* » Diplôme d'Ingénieur 2019-2020, *Ecole supérieure en science appliquées*
- [2] Eric Félice & Philippe Révilla, « *Les perturbations : qualité des réseaux électrique et efficacité énergétique* »
- [3] SADI Merzouk, Slamani Mourad, « *Étude et simulation d'un filtre actif série* » 2017/2018 *Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou*
- [4] <https://lumiworld.luminus.be/fr/up-to-date-fr/les-5-principales-causes-des-annes-deelectricite/>
- [5] https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber44_08_10.pdf
- [6] <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/conseils-installation-electrique/tension-surtension-electrique>.
- [7] Notes de cours destinées aux élèves de préparation à l'Agrégation de Génie Electrique. Marie Frénéa
- [8] A.Fekik, H.Denoun, N.Benamrouche, N.Benyahia M.Zaouia, S.Haddad "Comparative study of PI and fuzzy DC-voltage control for Voltage Oriented Control-PWM rectifier" WSEAS14 th International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing(CSECS'15) 2015 ISSN: 1790-5117 pp 103-110.
- [9] Gaouar, Fateh; Choudira, Ibrahim « *commande d'un filtre actif serie* », memoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingenieur d'état en genie electrotechnique. université Msila en 2010
- [10] Mohamed Alaa Edin Alali « *Contribution à l'étude des compensateurs actif des réseaux électrique* »Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Louis Pasteur 12/09/2002.
- [11] Chennai Salim « *Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle* », thèse de doctorat, Université Mohamed khider-Biskra-19 septembre2013
- [12] Shahram Karimi « *Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop ": application au filtre actif parallèle* » Thèse de doctorat En génie électrique l'université Henri Poincaré, Nancy-I 26 Janvier 2009.

- [13] Brahim Berbaoui, Samira Dib, Brahim Ferdi « Amélioration de la qualité d'énergie basée sur la performance d'un filtre actif série commandé à base DE système PLL » Volume 54, 3-4, 2013 pages : 184 – 188.
- [14] Kouzou Abdellah « Compensation Active Des Perturbations Dans Un Réseau Basse Tension » Magister en génie électrique, Université M'hamed Bougara faculté d'Hydrocarbures et de la chimie
- [15] Mohamed Muftah Abdusalam « structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales » Thèse de doctorat en génie électrique l'université Henri Poincaré, Nancy. 29 mai 2008
- [16] Brahim Berbaoui, Samira Dib, Brahim Ferdi « Amélioration de la qualité d'énergie basée sur la performance d'un filtre actif série commandé à base DE système PLL » Volume 54, 3-4, 2013
- [17] Bhattacharya, S.; Divan, D.M.; Banerjee, B., "Synchronous frame harmonic isolator using active series filter "EP'91, pp. 33.030-3.35, 1991.
- [18] A. Morsali, A.Tlemcani, N.Ould Cherchali et M. S. Boucherit « Commande d'un Filtre Actif Série de Puissance à Cinq Niveaux pour Améliorer la Qualité de la Tension Electrique » Laboratoire d'Electrotechnique et Automatique « LEA », UYFM, Médéa, Algérie. Laboratoire des Processus de Control « LPC », Ecole Nationale Polytechnique-ENP, Alger, Algérie.
- [19] H.Akagi, Edson Hirokazu Watanabe mauricio Aredes « Instantaneous power Theory and Applications to Power Conditioning, Second Edition-IEEE Press series on power engineering.
- [20] Lenne Marwa - Zeglaoui Ilham contribution a la commande d'un filtre hybride multiniveaux université d'adrar 2020/2021
- [21] A.KusKo.Marc T .Thompson « Power Quality in Electrical System »Hill, New-York, 2007
- [22] Hattacharya, S.:Divan, D, M. : Banerjee, B., « Synchronous frame harmonic isolator using active series filter » " EPE'91, pp.3.030-3.35, 199
- [23] Mohamed Choukri Benhabib « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande » Thèse à l'université Henri Poincaré, Nancy-I en 17 décembre 2004
- [24] A.Bouafia, Technique de commande prédictive et flou pour les systems d'électronique de puissance: Application aux redresseurs à MLI, Sétif, Algérie, thèse de doctorat en cotutelle, Université Ferhat Abbas , 2010.

- [25] N.Belhaouchet, Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées, application : amélioration de la qualité de l'énergie, Université Ferhat Abbas-Sétif Thèse de Doctorat , Juillet 2011.
- [26] Sanae rechka (2002). Etude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution. (Maîtrise en génie électrique, l' universite du quebec a trois-riviere, troisriviere).
- [27] Shi, Qingxin & Liang, Hao & Hou, Tianyi & Bai, Linqun & Xu, Wilsun & Li, Fangxing. (2017). Passive filter installation for harmonic mitigation in residential distribution systems. 10.1109/PESGM.2017.8273994.
- [28] Ambrish, Chandra. Qualité d'énergie électrique. (Notes de cours, École de Technologie Supérieure de Montréal, Montréal).
- [29] V.V.A.C.A.K.A.-H.B Singh, Hybrid filters for power improvement, vol. 152, IEE, Proc -Gener. Transm. Distrib, 2005.
- [30] M.X.Wang, Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
- [31] P. P Salmeron, A Control Strategy for Hybrid Power Filter to Compensate Four-Wires Three-Phase Systems, vol. 25, IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, pp. 1923-1931.
- [32] S.S.Y.T.H. Akagi, Comparisons in circuit configuration and filtering performance between hybrid and pure shunt active filters, vol. 2, Industry Applications Conference (I.A.S), 2003, pp. 1195-1202
- [33] H. Akagi, Active harmonic filters, vol. 93, IEEE Trans. of Power Electronics, Dec 2005, pp. 2128-2141.
- [34] H. T. Y. e. a. Fujita, A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial
- [35] M.A.E.Alali, Contribution à l'Etude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension, Strasbourg, Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur, 2002.
- [36] H. Akagi, Edson Hirokazu, Watanabe Mauricio Aredes « Instantaneous power theory and application to power conditioning » IEEE Press series on power engineering

- [37] Mr Boukadoum Aziz « contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique » mémoire de magister en électrotechnique université Badji Mokhtar Annaba 2007.
- [38] Boucif Abdelmalek, Mémoire de Fin d'Etudes Filtrage actif d'un réseau Électrique , Juin 2014 Université Mohamed Khider Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Electrique Filière : Electrotechnique Option : Commande électrique