

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 أبي بكر بلقايد - تلمسان -
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : électrotechnique

Filière : Electrotechnique
Spécialité: Commandes Electrique

Par: TCHOUAR Ahmed Soufiane

Thème :

**Etude et simulation
d'un filtre actif de puissance hybride à cinq niveaux**

Soutenu publiquement, le 29 / 06/ 2025, devant le jury composé de :

Mr. BENHABIB Mohamed Choukri	Pr.	Université de Tlemcen	Président
Mme. BOURI Sihem	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr. BRIKCI NIGASSA Mohammed Amine	MAA	Université de Tlemcen	Encadreur

Remerciements

Je remercie Dieu le Tout-Puissant de m'avoir donné la force, la volonté et la persévérance nécessaires pour mener à terme ce modeste travail.

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadrant,

Monsieur BRIKCI NIGASSA Mohammed Amine, Maître-assistant au département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen,

Pour sa disponibilité, sa patience et ses conseils précieux qui m'ont grandement aidé dans la réalisation de ce mémoire.

J'exprime également ma profonde gratitude à Madame BOURI Sihem, Maître de Conférences au département de Génie Électrique, d'avoir accepté d'évaluer mon travail ainsi que

Monsieur BENHABIB Mohamed Choukri, Professeur au département de Génie Électrique de l'université de Tlemcen,

Pour avoir accepté d'évaluer et preside le Jury.

Dédicace

C'est avec une profonde émotion, une immense joie et une grande reconnaissance que je dédie ce modeste travail :

À **ma mère bien-aimée**, source inépuisable d'amour, de patience et de sagesse. Ton soutien indéfectible, ton regard bienveillant et tes prières silencieuses ont été ma lumière dans les moments d'incertitude. Tu es et resteras toujours, la force qui me guide.

À la mémoire de **mon père**, Allah Yarhmou. Bien que tu ne sois plus physiquement à mes côtés, ton amour, tes sacrifices et tes précieux conseils continuent de vivre en moi. Tu as toujours cru en moi, et c'est en pensant à toi que j'ai trouvé la force d'avancer.
Ce travail t'est dédié, avec tout mon amour et mon respect.

À **mes frères et mes sœurs**, Mohamed, Kamel, Meriem et Khadidja pour leur présence, soutien et affections.

À **mes chers amis**, Abderrezak, Anas, Mouaâd et Houssam pour les moments partagés, l'entraide et les encouragements constants.

À **mes amis, collègues**, et toutes les personnes qui ont croisé mon chemin et m'ont soutenu, de près ou de loin.

À **l'ensemble de mes enseignants**, dont les savoirs transmis et l'accompagnement bienveillant ont marqué mon évolution.

Enfin, à tous ceux qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à l'aboutissement de ce travail : merci du fond du cœur

Acronymes et Symboles

AC	: Courant alternatif
DC	: Courant continu
CEI (IEC)	: Commission Électrotechnique Internationale
CEM	: Compatibilité Électromagnétique
THD	: Total Harmonic Distortion (Taux de distorsion harmonique)
FP	: Filtre Passif
FAP	: Filtre Actif de Puissance
FAPP	: Filtre Actif Parallèle de Puissance
FAS	: Filtre Actif Série
FPAP	: Filtre de Puissance Actif Parallèle
SAPF	: Shunt Active Power Filter
UPQC	: Unified Power Quality Conditioner
NPC	: Neutral Point Clamped
FC	: Flying Capacitor
CHB	: Cascaded H-Bridge
MLI (PWM)	: Modulation de Largeur d'Impulsion
PQ (p-q)	: Théorie des puissances instantanées
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
GTO	: Gate Turn-Off Thyristo
Rs, Ls	: Résistance et inductance de la source
Rl, Ll	: Résistance et inductance de la charge
Rf, Lf	: Paramètres du filtre actif
Cdc	: Condensateur du bus continu
Sa1 à Sa8	: Interrupteurs d'un bras d'onduleur NPC
Va0	: Tension simple de sortie du bras
E	: Tension élémentaire du bus continu
P	: Puissance active (W)
Q	: Puissance réactive (VAR)
S	: Puissance apparente (VA)
D	: Puissance déformante
cosφ	: Facteur de puissance
α, β	: Axes du repère de Concordia
p, q	: Puissances instantanées active et réactive
p̄, q̄	: Composantes continues des puissances
p̃, q̃	: Composantes oscillatoires des puissances
Vs	: Tension de la source
Vdc	: Tension du bus continu
Is	: Courant de la source
Ic	: Courant de charge
If	: Courant injecté par le filtre
fi	: Fréquence fondamentale
fh	: Fréquence de l'harmonique d'ordre <i>h</i>
ω	: Pulsation angulaire (rad/s)
h	: Rang harmonique
Ω	: Pulsation ($\omega = 2\pi f$)

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1	Signal avec harmonique d'ordre 3,5 et7.....	4
Figure I.2	Représentation d'interharmoniques et d'infraharmoniques.....	7
Figure I.3	Diagramme de Fresnel des puissances.....	9
Figure I.4	Filtre résonant.....	12
Figure I.5	Filtre à double résonance.....	13
Figure I.6	Filtres amortis passe-haut.....	14
Figure I.7	Filtre actif série.....	15
Figure I.8	Filtre actif parallèle.....	16
Figure I.9	Schéma de l'UPQC	16
Figure I.1	Filtre combiné actif en série avec la source/passif en parallèle avec la charge	17
Figure I.2	Filtre Hybride combinaison du FAP et FP parallèle	18

Chapitre II

Figure II.3	source et charge connecté au réseau triphasé.....	25
Figure II.4	Tension de source des trois phases (Avant filtrage).....	25
Figure II.3	allures des Courant de source (Avant filtrage)....	26
Figure II .5	THD de courant Avant filtrage.....	26
Figure II.5	Simulation de filter passif.....	27
Figure II.6	Allures de courant de source et de charge et de filtre	28
Figure II .7	THD du courant de source	28
Figure II.8	Allures de courant de source et de charge et de filtre	29
Figure II.9	THD du courant de source.....	29
Figure II.10	Allures de courant de source et de charge et de filtre.....	30
Figure II.11	THD du courant de source	30
Figure II.12	Principe de filtrage actif parallèle	32
Figure II.13	Onduleur de tension à 2brasavec condensateurs à point milieu	33
Figure II.14	Onduleur de tension à trios bras pour un réseau électrique à 3 fils	34
Figure II.15	Structure d'unfiltre actif parallèle.....	35
Figure II.16	Méthode de la puissance instantané dite méthodePQ.....	38

Figure II .17	Types classiques de filtre d'extraction de la composante harmonique.....	39
Figure II.18	Commande par hysteresis.....	40
Figure II.19	Modulation de Largeur d'Impulsion	40
Figure II.20	Simulation de filter actif.....	41
Figure II .21	Commande PQ du filtre actif de puissance parallèle (direct)	42
Figure II.22	Commande MLI.....	42
Figure II .23	Allures des trois courant de charge, de filtre et de source.....	43
Figure II.24	THD du courant du courant de source	43
Figure II.25	tension aux borne du condensateur.....	44
Figure II.26	model de simulation du Filtrage hybride	44
Figure II.27	Allures de courant de source et de charge et de filter	45
Figure II.28	THD du courant de source	46
Figure II.29	tension aux borne du condensateur	46
Figure II.30	Allure de courants de source et de charge et du filtre	47
Figure II.31	THD du courant de source	47
Figure II.32	Tension aux borne du condensateur	48
Figure II.33	Allures de courant de source et de charge et de filtre	48
Figure II.34	THD du courant de source	49
Figure II.35	Tension aux borne du condensateur	49
 Chapitre III		
Figure III .19	Modèle de classification pour les convertisseurs à multi niveaux	52
Figure III.20	Structures d'onduleurs de catégorie NPC à trois et à cinq strates (phase A)	54
Figure III. 21	Onduleurs à condensateurs flotteurs à trois et à cinq niveaux(phaseA)	56
Figure III.22	Onduleur en cascade à 5 niveaux(phaseA).....	57
Figure III. 23	Onduleur en cas cade à 7niveaux.....	57
Figure III.24	Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux.....	59
Figure III. 25	Configuration du bras.....	61
Figure III. 8	Configuration du bras.....	60
Figure III. 9	Configuration du bras.....	61
Figure III. 10	Configuration du bras.....	62
Figure III. 11	Configuration du bras.....	62
Figure III.26	Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à cinq niveaux de type NPC.....	63
Figure III. 27	Commande MLI du NPC.....	64

Figure III.28	Signaux de MLI-sinusoidale multi porteuses de l'onduleur NPC	65
Figure III.29	modèle de simulation à étudié.....	65
Figure III.30	Onduleur type npc 5 niveaux	66
Figure III.31	Allures de courant de source et de charge et de filtre.....	67
Figure III. 32	THD du courant de charge	67
Figure III. 33	THD du courant de source	69
Figure III. 20	Modèle de simulation à étudié.....	69
Figure III. 21	Allures de courant de source et de charge et de filtre	70
Figure III. 22	THD de la source.....	70
Figure III. 23	tension aux bornes du condensateur	71
Figure III. 24	Allures de courant de source et de charge et de filtre.....	72
Figure III. 25	THD du courant de source	72
Figure III. 26	tension aux bornes du condensateur.....	72
Figure III.27	Allures de courant de source et de charge et de filtre.....	73
Figure III.28	THD du courant de source	73
Figure III.29	tension aux bornes du condensateur	74

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1	Récapitulatif des principaux effets néfastes des harmoniques	6
Tableau I.2	Valeurs des niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques	10
Tableau I.3	Limites des émissions de courants harmoniques (CEI-1000-3-2)	11

Chapitre II

Tableau II.1	Paramètres de simulation pour ce système	25
Tableau II.2	Paramètres du filtre passif à simple résonance	27
Tableau II.2	Tensions générées par l'onduleur de tension 2 bras à point milieu capacitif	33
Tableau II.3	Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras.....	35
Tableau II.5	Paramètres du filtre actif de puissance parallèle.....	43
Tableau II.6	Tableau II .6 Paramètres du filtre hybride	46
Tableau II.7	Paramètres du filtre passif simple résonance	46

Chapitre III

Tableau III.4	Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux.....	63
Tableau II. 5	Paramètres de simulation pour ce système.....	67
Tableau III.3	Paramètres de simulation pour ce système.....	70
Tableau III.4	l'étude comparative entre filter actif type NPC et filter actif type NPC hybride	76

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Qualité de l'énergie électrique

I.1	Introduction	4
I.2	Perturbations harmoniques	4
I.2.1	Définitions.....	4
I.2.2	Sources d'harmoniques	5
I.2.3	Conséquences des perturbations harmoniques	5
I.2.4	Effets des perturbations harmoniques	5
I.2.4.1	Effets instantanés ou à court terme	5
I.2.4.2	Effets à long terme	6
I.2.5	Spectre harmonique	7
I.2.6	Rang d'harmonique	8
I.2.7	Caractéristiques des harmoniques	8
I.2.7.1	Taux de distorsion harmonique « THD »	8
I.2.7.2	Facteur de puissance	9
I.2.8	Normes	9
I.2.8.1	Normes et réglementations sur les harmoniques	9
I.2.8.2	Normes d'appareillage	10
I.3	Solutions de dépollutions des réseaux électriques	11
I.3.1	Solution de dépollution traditionnelle « filtrage passif »	11
I.3.1.1	Types de filtres passifs	12
I.3.1.2	Avantages et inconvénients des filtres passifs	14
I.3.2	Solution la depollution moderne « filter actif »	15
I.3.2.1	Filtre actif série (F.A.S.)	15
I.3.2.2	Filtre actif parallèle (F.A.P.)	16
I.3.2.3	Filtre actif série/parallèle	16
I.3.3	Les filtres hybrides	17
I.3.3.1	Filtre actif en série avec la source et filtre passif en parallèle avec la charge	17
I.3.3.2	Filtre actif de puissance avec filtre passif montées en parallèle avec la charge ..	18
I.3.4	Avantages et inconvénients du filter actif	18
I.4	Conclusion	19

Chapitre II : Etude et simulation d'un filtre Hybride

II.1	Introduction.....	21
II.2	Filtre passifs.....	21
II.2.1	Paramètres électriques clés du dimensionnement du filtre passif	22
II.2.2	Calcul des paramètres d'un filtre passif simple Résonance	23
II.2.2.1	Exemple de Calcul de la 5 ^{ème} harmonique	23
II.2.2.2	Exemple de calcul de la 7 ^{ème} harmonique	24
II.2.3	Simulations.....	25
II.2.3.1	Simulation du réseau à étudier sans filtre.....	25
II.2.3.2	Simulation du système après filtrage pour 3 possibilités.....	27
II.2.3.3	Model de simulation (FP pour 5 ^{ème} harmonique, FP pour 7 ^{ème} harmonique, FP pour 5 ^{ème} et 7 ^{ème} harmonique)	28
II.2.3.4	Interpretation	31
II.2.3.5	Interprétation	31
II.3	Filtre actif de puissance.....	31
II.3.1	Principe de fonctionnement de FPAP.....	31
II.3.2	Topologies des filtres actifs de puissance	32
II.3.2.1	Filtre actif de puissance à 2 bras à point milieu	32
II.3.2.2	Filtre actif de puissance à 3 bras	34
II.3.3	Constitution du filtre de puissance actif parallèle	35
II.3.3.1	Présentation des stratégies de commande	36
II.3.4	filtre actif de puissance hybride	41
II.3.4.1	Simulation du système après filtrage hybride (Filtre passif simple resonance + Filtre actif de puissance parallèle) avec variation des paramètres du FPAP ...	41
II.3.4.2	Résultats de simulation	43
II.4	Filtre actif de puissance hybride	44
II.4.1	Simulation du système après filtrage hybride (Filtre passif simple resonance + Filtre actif de puissance parallèle) avec variation des paramètres du FPAP ...	44
II.4.2	Model de simulation	45
II.4.3	Résultats de simulation	45
II.4.3.1	Cas 5 ^{ème} Harmonique	45
II.4.3.2	Cas 7 ^{ème} Harmonique	47
II.4.3.3	Cas 5 ^{ème} & 7 ^{ème} Harmonique	48
II.4.4	Interpretation	49
II.5	Conclusion	50

Chapitre III : Etude et simulation d'un filtre actif multiniveau hybride

III.1	Introduction	52
III.2	Les onduleurs multi-niveaux	52
III.2.1	Structure d'un FAPP utilisant un onduleur cinq niveaux	52
III.2.2	Intérêt tdes onduleurs multi niveaux.....	53
III.3	Quelques types d'onduleurs multi-niveaux	54
III.3.1	Onduleur de tension à diode de bouclage	54
III.3.2	Onduleur de tension à condensateur flotteur.....	55
III.3.3	Onduleur de tension en cascade.....	56
III.3.4	Autres topologies.....	58
III.4	Filtre actif de puissance à cinq niveaux.....	59
III.4.1	Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux	59
III.4.1.1	Première configuration {11110000}	59
III.4.1.2	Deuxième configuration {01111000}	60
III.4.1.3	Troisième configuration {00111100}	61
III.4.1.4	Quatrième configuration {00011110}	61
III.4.1.5	Cinquième configuration {00001111}.....	62
III.5	Commande MLI de l'onduleur NPC.....	64
III.6	Simulation de notre système avec unFAP parallèle et interpretations des resultants	65
III.6.1	Simulation de filtre actif de type NPC 5 niveaux	65
III.6.1.1	Résultats.....	67
III.6.1.2	Interprétation des résultats	68
III.6.2	Simulationdu filter Hybride	69
III.6.2.1	Résultats simulations	70
III.6.2.2	Interprétation des résultats.....	74
III.7	Conclusion.....	76
Conclusion Général		78

Bibliographie

Introduction Générale

Introduction Générale :

L'énergie électrique joue un rôle fondamental dans le développement, tant pour l'amélioration du confort des conditions de vie que pour répondre aux besoins en énergie du secteur industriel croissant. L'utilisation massive d'équipements intégrant des composants à base d'électronique de puissance, tel que les convertisseurs électriques. Cette évolution a entraîné des perturbations importantes sur les signaux des réseaux électriques, en effet les utilisateurs raccordés au réseau subissent de plus en plus de distorsions harmoniques [1].

La tension fournie par le réseau de distribution électrique est généralement sinusoïdale, triphasée et équilibrée. Toutefois, divers types de perturbations peuvent altérer la qualité des signaux électriques. Parmi celles-ci, les distorsions harmoniques de courant occupent une place importante.

La charge non linéaire à l'origine de ces perturbations provoque l'apparition d'harmoniques, pouvant nuire au bon fonctionnement des équipements électriques. L'emploi de filtre passif comme solution présente certains inconvénients avec un risque de résonance avec le réseau électrique, tandis que le second réside dans la dépendance de leur performance avec les caractéristiques du réseau auquel ils sont raccordés et toute modification du réseau pourra affecter les performances de ces filtres passifs.

Les avancées dans le domaine des semi-conducteurs de puissance, capables de commuter à haute fréquence et de manière contrôlée à l'ouverture comme à la fermeture, ont permis le développement de solutions de filtrage plus performantes et adaptatives, tel que les filtres actifs de puissance. Ces dispositifs modernes ont pour objectif de produire des courants ou tensions harmoniques de compensation, afin de neutraliser les perturbations susceptibles d'altérer le bon fonctionnement des équipements et des installations électriques [1].

Dans ce travail, nous nous intéressons à la modélisation et simulation d'un filtre actif parallèle à structure tension multiniveau en présence d'un filtre passif, destiné à la compensation des courants harmoniques générés par des charges non linéaires ainsi qu'à la correction de l'énergie réactive. Ce type de filtre remplit deux fonctions essentielles : la première consiste à détecter les composantes harmoniques indésirables du courant, tandis que la seconde concerne le contrôle de l'onduleur multiniveau de tension pour injecter les courants correctifs nécessaires et dans un souci de réduire le dimensionnement de notre onduleur nous avons ajouté un filtre passif de puissance.

Dans le premier chapitre nous allons mettre avant l'importance de la prise en charge de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électrique en présentant différentes solutions ainsi que les normes à respecter en la matière.

Le deuxième chapitre portera sur l'étude et la simulation d'un filtre actif de puissance hybride en présence d'une charge non linéaire constituée d'un redresseur PD6 alimentant une charge R-L. Dans un premier temps, on présentera les résultats de simulations du filtre passif seul suivis par ceux du filtre actif de puissance seul pour qu'en dernier, on présentera le modèle complet : « filtre actif de puissance & filtre passif ». Une attention particulière sera donnée à l'optimisation des paramètres du filtre actif de puissance avec et sans présence du filtre passif pour avoir THD constant. Il s'en suivra une étude comparative des performances.

Le troisième et dernier chapitre sera dédié à l'étude d'un filtre actif de puissance hybride multiniveau. Une série de simulation sera établie utilisant un système « FAP & FP » dotée d'un onduleur à cinq niveaux de type NPC (Neutral Point Clamped). On présentera les résultats de simulations de ce modèle, en valorisant ses performances de compensation, et de régulation en établissant des variations de tension « surtension et chute de tension au niveau de la source », en plus de l'optimisation des paramètres du filtre actif de puissance avec et sans présence du filtre passif. Il s'en suivra une étude comparative des performances.

Chapitre I

Qualité de l'énergie électrique

I.1 Introduction

Les réseaux électriques délivrent des tensions sinusoidaux triphasé avec les paramétriques suivantes :

- La fréquence
- L'étendue des trois tensions.
- L'onde qui doit être aussi proche que possible d'une sinusoïde.
- La symétrie du système triphasé.

La qualité de l'énergie peut être affecter, que ce soit à cause de certains événements liés aux caractéristiques physiques et aux contraintes liées à la gestion du réseau, ou encore en raison de certains appareils récepteurs. Ces perturbations peuvent affecter un ou plusieurs des quatre paramètres mentionnés précédemment. Nous allons maintenant décrire les perturbations les plus courantes qui influencent les courants et les tensions dans un réseau électrique.

I.2 Perturbations harmoniques

I.2.1 Définitions

Le signal harmonique se compose d'une superposition de l'onde fondamentale à 50Hz ainsi que d'ondes sinusoidales de fréquences multiples entières de la fréquence fondamentale. La Figure I.1 illustre l'ajout d'harmoniques de rang 3,5 et 7 à une fondamentale ayant une fréquence de 50Hz. L'augmentation de l'utilisation d'équipements à base d'électronique de puissance est la principale cause de l'apparition de courants harmoniques dans les réseaux électriques.

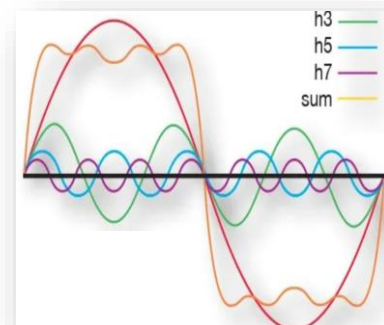
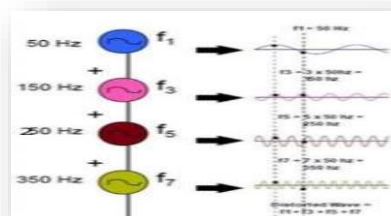


Figure I.1 : Signal avec harmonique d'ordre 3,5 et 7

I.2.2 Sources d'harmoniques [4]

Les courants non sinusoïdaux produits par des charges non linéaires est la source principale des courants harmoniques. Les onduleurs, les ponts redresseurs, les variateurs de vitesse pour machines électriques, ainsi que les équipements domestiques tels que les téléviseurs, les lampes fluorescentes, et les alimentations à découpage constituent les principales sources d'émission d'harmoniques.

I.2.3 Conséquences des perturbations harmoniques [5]

Ces conséquences peuvent se manifester instantanément ou à long terme, telque:

- Une amplification des pertes par effet Joule et effet de peau,
- Une augmentation de la facturation de l'électricité,
- Une dégradation du facteur de puissance de l'équipement,
- Un vieillissement anticipé des appareils électriques,
- Une dégradation de certains équipements.

I.2.4 Effets des perturbations harmoniques [2]

On peut identifier plusieurs effets sur les installations et matériels électriques, tels que la distorsion des formes d'ondes conduisant à des problèmes de fonctionnement, l'élévation des valeurs de crête provoquant des ruptures diélectriques ou encore les valeurs efficaces qui conduisent à une surchauffe. On peut classer les effets de ces perturbations en deux catégories :

I.2.4.1 Effets instantanés ou à court terme [3]

- Anomalies dans les systèmes de contrôle ou de régulation,
- Dégradations de la précision des instruments,
- Vibrations dans les moteurs électriques alternatifs en raison des couples mécaniques pulsés générés par les champs tournants harmoniques,
- Vibrations et bruits sonores dans les transformateurs ou les inductances,
- Perturbations des systèmes de contrôle à distance utilisés par les fournisseurs d'énergie.

I.2.4.2 Effets à long terme [6]

L'usure anticipée des moteurs électriques alternatifs est due aux pertes additionnelles de cuivre et de fer causées par la grande disparité de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Cela engendre une surchauffe et des pertes joules supplémentaires dans les câbles et équipements, conduisant à une dégradation du matériel.

Tableau I.1: Récapitulatif des principaux effets néfastes des harmoniques [13]

Nature du matériel électrique	Effet de la pollution harmonique
Machines tournantes. Moteurs triphasés. Alternateurs.	Echauffement supplémentaire (effet Joule) dans les enroulements statoriques, couples oscillatoires. augmentation du bruit
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (parcourants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques paires.
Câbles	Augmentation des pertes sur tout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiple de 6 Pertes diélectriques supplémentaires
Electronique de puissance (Ponts redresseurs à thyristors, transistor,...etc.)	Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde (commutation synchronisation)
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs
Ordinateurs.	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques.
Dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs magnétothermiques.)	Fonctionnement intempestif.
Compteur d'énergie.	Erreur de mesure.
Téléviseurs.	Déformation d'image.
Lampes à décharge.	Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2.

I.2.5 Spectre harmonique:

L'expression mathématique par développement en série de Fourier prend la forme suivante :

$$y(t) = y_0 + \sqrt{2}[y_1 \cdot \sin(\omega t - \varphi_1) + y_2 \cdot \sin(2\omega t - \varphi_2) + \dots + y_h \cdot \sin(h \cdot \omega t - \varphi_h)]$$

$$y(t) = y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} y_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h \cdot \omega t - \varphi_h)$$

- y_0 : La moyenne ou la composante continue du signal $y(t)$, H : Le numéro d'ordre de l'harmonique,
- y_h : L'amplitude efficace de l'harmonique à l'ordre h ,
- ω : La pulsation fondamentale, calculée en multipliant 2π par la fréquence fondamentale,
- φ_h : La phase de l'harmonique à l'ordre h .

Pour voir mieux visualisé ces composantes (l'amplitude de chaque harmonique), voir figure I-2. [26]

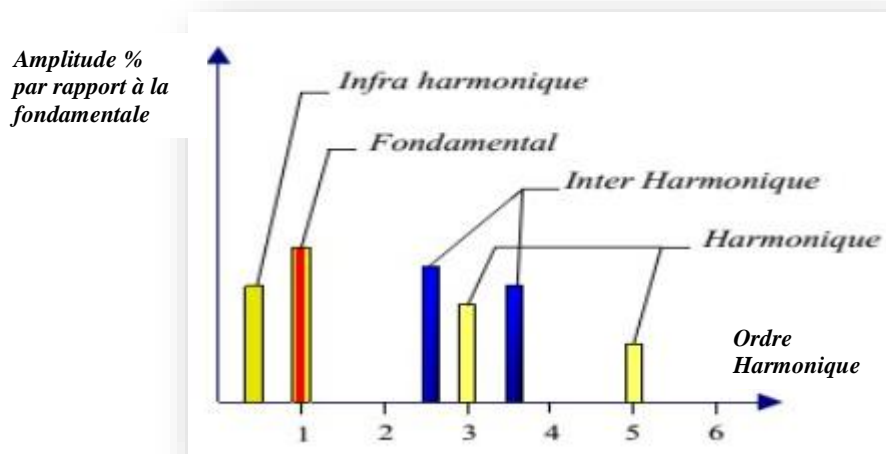


Figure I.2 : Représentation d'interharmoniques et d'infraharmoniques

- **Interharmoniques** : Ce sont des sinusoïdes qui ne sont pas des multiples entiers de la fréquence fondamentale.
- **Infraharmoniques** : Ce sont des composantes dont les fréquences sont en dessous de celle du fondamental.

I.2.6 Rang d'harmonique

Le rang harmonique est le rapport de la fréquence f_h sur la fréquence fondamentale f_1 .

où h : rang harmonique

$$h = \frac{x_h}{x_1} \quad \text{I.1}$$

Les harmoniques peuvent être paires ou impaires. Dans l'industrie, les harmoniques de rang pair (2, 4, 6, 8...) sont souvent négligeables (dû à la symétrie du signal). Mais les harmoniques de rang impair (3, 5, 7, ...), existent et peuvent impactées directement la qualité des signaux électrique. [5]

I.2.7 Caractéristiques des harmoniques

Les perturbations harmoniques s'évaluent par diverses caractéristiques, notamment le taux de distorsion harmonique « THD » et le facteur de puissance.

I.2.7.1 Taux de distorsion harmonique « THD » Le taux de distorsion harmonique est un indicateur de degré de pollution harmonique dans les réseaux électriques, exprimé en fonction de la fréquence. Cette expression permet de calculer l'influence des harmoniques sur l'onde de courant/tension.

$$THD(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n x_i^2}{x_1}} \quad \text{I.2}$$

x_i : les valeurs efficaces des différents harmoniques du courant et de la tension.

x_{i1} : la valeur du courant et de la tension.

I.2.7.2. Facteur de puissance La puissance apparente S est composée de la puissance active P , de la puissance réactive Q et de la puissance déformante D , tel que :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad \text{I.3}$$

La représentation dans le diagramme de Fresnel est comme suite :

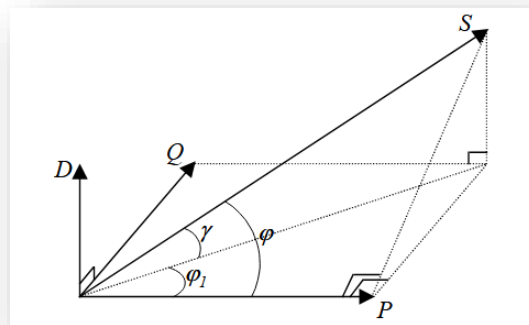


Fig. I.3 : Diagramme de Fresnel des puissances

Par conséquent, le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente :

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

Sachant que le facteur de puissance est toujours inférieur à 1.

I.2.8. Normes

I.2.8.1 Normes et réglementations sur les harmoniques :

Afin de garantir une qualité d'énergie adéquate tout en réduisant les impacts des perturbations harmoniques, il est nécessaire que les fournisseurs d'énergie et les consommateurs adhèrent aux normes et recommandations qui établissent les directives concernant la compatibilité électromagnétique «CEM». Ces normes peuvent provenir de différentes sources, comme la Commission Electrotechnique Internationale « CEI », Commission de standardisation Européenne « CEI », « CEN-CENELEC ».

I.2.8.2 Normes d'appareillage :

La norme CEI 61000-3-2, également connue sous le nom d'EN 61000-3-2, s'applique aux dispositifs à basse tension pour un courant ne dépassant pas 16 A. Le tableau ci-dessous présente les normes actuelles de limitation du courant.

Tableau I.2 : Valeurs des niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques (CEI-1 000-2-4)

Harmoniques impairs Non multiple de 3		Harmoniques impairs Multiple de 3		Harmoniquepairs	
Rang harmoniquen	Tension harmonique %	Rang harmoniquen	Tension harmonique %	Rang harmoniquen	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5	–	–	12	0.2
23	1.5	–	–	>12	0.2
25	1.5	–	–	–	–
>25	$0.2+(0.5*25)/n$	–	–	–	–

La norme CEI-1000-3-2 fixe des limites pour les émissions de courants harmoniques dans un réseau public à basse tension pour des appareils dont le courant par phase ne dépasse pas 16A (appareils ménagers). [7]

**Tableau I.3 : Limites des émissions de courants harmoniques
(CEI-1000-3-2)**

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé
Harmoniques impaires	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$(0.15 \cdot 15)/n$
Harmonique paire	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq n \leq 40$	$(0.23 \cdot 8)/n$

I.3 Solutions de dépollutions des réseaux électriques :

Pour améliorer la qualité de l'énergie électrique, il existe deux procédés de dépollution: traditionnelle ou moderne. Le premier utilise des filtres passifs et le second fait appelle au filtrage actif de puissance.

I.3.1 Solution de dépollution traditionnelle « filtrage passif » Les filtres passifs sont efficaces pour éliminer les signaux harmoniques dans une bande de fréquence étroite et avec une impédance harmonique élevée. Mais si la fréquence d'accord change légèrement, dû au changements dans les caractéristiques de leur élément, leur utilité est remise en cause. Par voie de conséquence, leur efficacité dépend de l'impédance du réseau, qui peut variée.

I.3.1.1 Types de filtres passifs

A. Filtre Résonant : Il consiste à présenter une impédance extrêmement basse lors de la circulation d'un courant harmonique d'ordre spécifique. Un filtre passif résonant est un circuit monté en série « R, L et C », ajusté à la fréquence harmonique à éliminer. Il est possible de monter plusieurs filtres résonnants en parallèle, pour couvrir plusieurs rangs harmoniques.

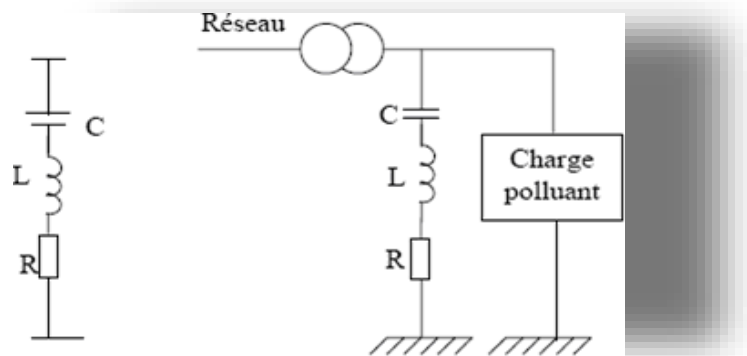


Figure I.4 : Filtre résonant

L'impédance du filter passif resonant est exprimée par :

$$Z = R + \frac{LC\omega^2 - 1}{C\omega} \quad \text{I.5}$$

La fréquence de resonance du filter est donnée par :

$$F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{I.6}$$

A la fréquence de résonance, l'impédance du filtre est réduite à R. Les filtres résonnants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance ou de la capacité. [9]

B. Filtre à double résonance : Ce type de filtre est accordé à deux fréquences différentes. Cela permet d'éliminer deux harmoniques à la fois.

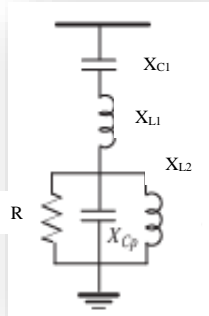
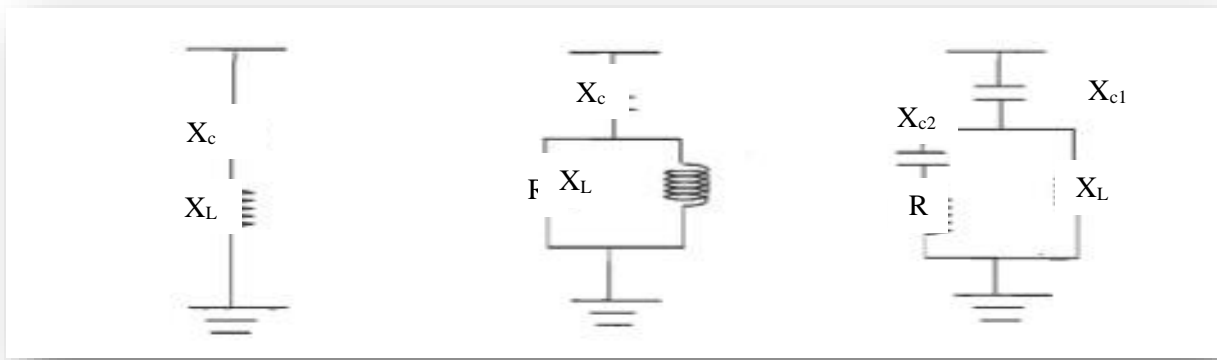


Figure I.5 : Filtre à double résonance

C. Filtre amorti Ce type de filtre est destiné à supprimer ou à atténuer les harmoniques d'un signal électrique. Il est aussi nommé filtre résonnant. On distingue trois sortes de filtres d'amortissement résonnant : [9]

- **Filtre d'amortissement du premier ordre :** Il exige une capacité importante et engendre une perte de puissance considérable à la fréquence fondamentale.
- **Filtre d'amortissement du second ordre :** Ce type de filtre se compose d'un condensateur en série associé à un dispositif comprenant une inductance parallèle et une résistance nommée résistance d'amortissement. On l'utilise lorsque les performances demandées ne sont pas élevées pour filtrer en même temps les fréquences élevées du spectre.
- **Filtre d'atténuation de troisième ordre :** Il est moins fréquent que les filtres de premier et de deuxième ordre et sont mis en œuvre pour des applications particulières.



a : filtre de 1^{er} ordre

b: filtre de 2^{ème} ordre

c: filtre de 3^{ème} ordre

Figure I.6 : Filtres amortis passe-haut

I.3.1.2 Avantages et inconvénients des filtres passifs [10]

Le filtrage passif a déjà démontré son efficacité dans le secteur industriel en raison de son coût raisonnable de sa performance. Cependant, il présente certains inconvénients, tel que:

- En présence de plusieurs harmoniques à filtrer, il faut installer un nombre équivalent de filtres. Il est possible de résoudre ce problème en utilisant un filtre à large bande qui réduit plusieurs niveaux harmoniques, mais avec un degré d'atténuation médiocre.
- L'installation de filtres passifs sur un réseau exige une analyse approfondie et rigoureuse. Cependant, lorsque le réseau est important, il n'est pas systématiquement possible d'avoir accès à l'ensemble de ses paramètres nécessaires pour l'analyse.

L'absorption de la résonance dans les systèmes d'énergie grâce aux filtres passifs peut provoquer des résonances supplémentaires non souhaitées pouvant entraîner la dégradation de ces filtres. L'utilisation de la commande à base d'électronique de puissance pour l'amortissement représente une solution alternative pour améliorer le fonctionnement opérationnel du réseau. [10]

I.3.2 Solution la depollution moderne « filter actif »

L'intégration de plus en plus grandissante de l'électronique de puissance avec ses nouveaux semi-conducteurs de plus en plus performant tel que : « MOSCT, MOSFET et l'IGBT » ont donné naissance à des techniques innovantes pour la dépollution harmonique, se substituant ainsi aux méthodes conventionnelles.

Deux types de structures sont couramment employés, à savoir :

- Le filter actif (série, parallèle ou la combinaison des deux),
- Le filter actif hybride (association filter série et parallèle).

I.3.2.1 Filtre actif série «F.A.S.» [8] [11]

La fonction d'un F.A.S. est d'ajuster localement l'impédance du réseau. Il agit en tant que générateur de distorsion harmonique qui contrarie les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) provenant de la source et celles produites par le passage de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau.

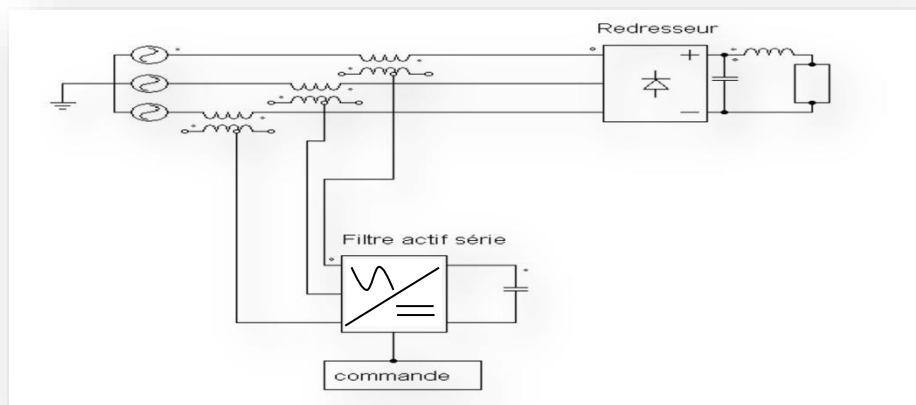


Figure I.7 : Filtre actif série

La tension au bornes de la charge peut redevenir sinusoïdale. Cependant, le F.A.S. n'a pas la capacité de compenser les harmoniques absorbées par la charge. [11]

I.3.2.2 Filtre actif parallèle (F.A.P.)

Le F.A.P. se connecte en parallèle avec le réseau et exploite les caractéristiques tension et courant en temps réel. La présence de charges non linéaires est principalement la cause de l'apparition des courants harmonique dans les réseaux électriques. Après intégration en parallèle du F.A.P. au réseau, le courant coté source redeviendra sans harmoniques

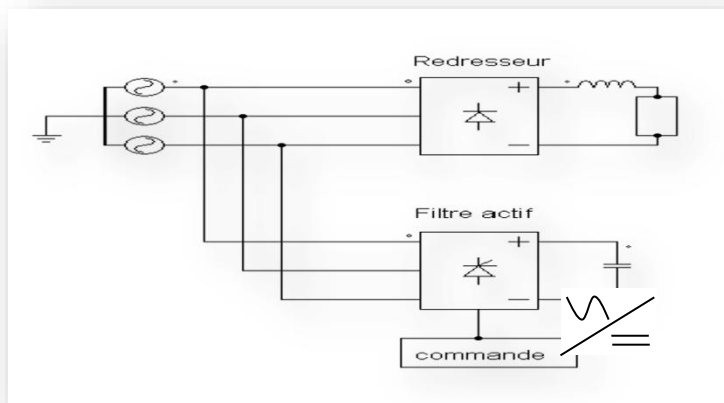


Figure I.8 Filtre actif parallèle

I.3.2.3 Filtre actif série/parallèle Le conditionneur de puissance universel « U.P.Q.C. - Unified Power Quality Conditioner » est un filtre actif résultant de la combinaison des filtres actifs série et parallèle. Le système de la figure I.9 illustre ce type de filtre. L'un est connecté en série sur le réseau pour garantir un signal sinusoïdal coté réseau et le second parallèle pour maintenir le courant du réseau sinusoïdal.

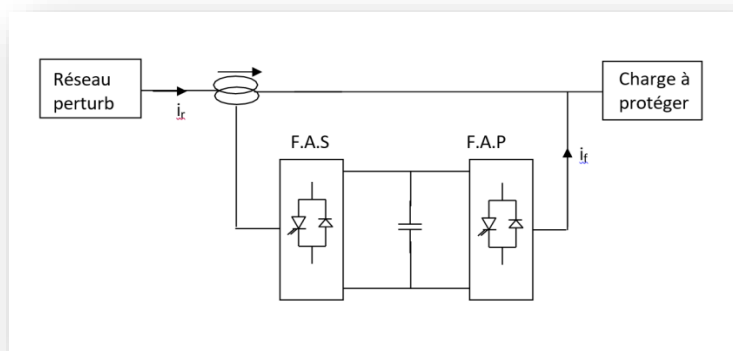


Figure I.9 Schéma de l'UPQC

Ce type de filtre rassemble les avantages des deux filtres actifs série et parallèle, toutefois sa commande revêt un niveau de complexité élevé.

I.3.3 Les filtres hybrides [12]

Le filtrage mixte ou hybride résultant de la combinaison des filtres actifs et des filtres passifs présente certains avantages, s'elles du filtre passif pour fixer une ou plusieurs harmoniques spécifiques, tandis que le filtre actif assure une performance de filtration adaptative qui évolue selon la charge et le réseau.

Du point de vue économique, le filtre hybride offre une réduction du coût du filtre actif, qui représente actuellement le principal obstacle à l'utilisation de tels filtres.

Il est possible d'avoir plusieurs combinaisons possibles de filtres actifs et passifs, à titre exemple :

- Filtre actif en série associé à la source/filtre passif en parallèle avec la charge,
- Filtre actif et filtre passif fonctionnant avec la charge.

I.3.3.1 Filtre actif en série avec la source / Filtre passif en parallèle avec la charge

Les filtres passifs sont réglés pour correspondre aux fréquences des harmoniques présentes sur le réseau. Ils réduisent fortement les courants harmoniques créés par les charges non linéaires. Le filtre actif s'oppose à la tension harmonique et à la chute de tension due à la charge non linéaire. Il contrôle ainsi la tension harmonique aux bornes de la charge.

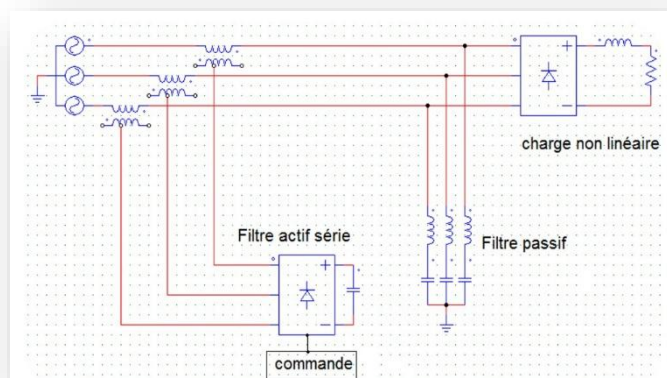


Figure I.1 : Filtre combiné actif en série avec la source/passif en parallèle avec la charge

I.3.3.2 Filtre actif de puissance avec filtre passif montés en parallèle avec la charge

Dans ce contexte, les composants du filtre passif sont réglés sur une fréquence élevée pour contrer les courants harmoniques de haut rang, tandis que le filtre actif de puissance prend en charge le reste des harmoniques.

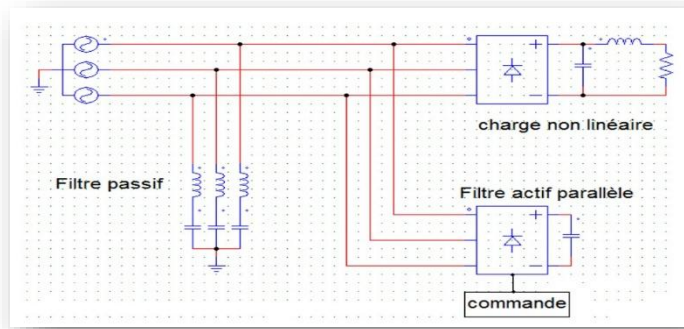


Figure I. 2 : Filtre Hybride combinaison du FAP et FP parallèle

I.3.4 Avantages et inconvénients du filter actif

- Règle autonome en fonction des variations de charges et du réseau,
- Possibilité de compenser plusieurs harmoniques (dans les limites de sa bande passante)
- Ne surchauffe pas lorsque le courant harmonique à compenser dépasse la capacité du filtre actif, il limite simplement son émission de compensation harmonique au maximum, sans risque de destruction.

Malgré le fait que les filtres actifs soient capables de produire des courants ou des tensions harmoniques afin d'assurer une forme sinusoïdale du courant et de la tension du réseau, et parfois obtenir un facteur de puissance unitaire, ils présentent certain défaut, tel que le prix élevé réduisant leur déploiement dans le secteur industriel.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'importance de la prise en charge de la qualité de l'énergie électrique, en mettant en évidence l'impact des perturbations harmoniques sur les réseaux et les équipements. Nous avons présenté les sources principales de ces harmoniques, leurs effets à court et à long terme sur les réseaux électriques. Cette analyse a permis de mieux comprendre l'importance de maîtriser ces phénomènes pour garantir un fonctionnement optimal et durable des installations.

Nous avons également présenté les indicateurs de mesure relatifs aux caractéristiques des harmoniques, telles que le taux de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance, tout en précisant les exigences normatives à respecter selon les standards internationaux. En dernier lieu, nous avons revu les différentes solutions de dépollution harmonique disponibles, en distinguant les approches classiques par filtrage passif ainsi que les méthodes modernes basées sur les filtres actifs de puissance en plus des structures hybrides de puissance combinant les deux technologies.

Cette étude introductive constitue une base essentielle pour aborder les chapitres suivants, dans lesquels nous évaluerons, à travers des simulations, les performances de ces différents systèmes de compensation, dans le but de confirmer que ses solutions sont les plus adaptées aux exigences actuelles de la qualité de l'énergie des réseaux électrique.

Chapitre II

Etude et simulation d'un filtre Hybride

II.1 Introduction

Nous consacrons ce chapitre à l'étude et simulation d'un système hybride de compensation harmonique comprenant un filtre actif parallèle et un filtre passif. L'objectif est d'évaluer l'efficacité de diverses configurations de filtrage pour minimiser le taux de distorsion conformément aux normes en vigueur.

La partie simulation s'effectue sous environnement MATLAB/Simulink, en se basant sur une alimentation triphasée de 690 V à 50 Hz, débitant sur une charge non linéaire.

On examine plusieurs scénarios :

- Le système utilisant un filtre actif de puissance parallèle, utilisé comme modèle de référence,
- Le dispositif utilise un filtre passif à simple résonance, accordé sur la cinquième et septième harmonique,
- Le système utilise un filtre hybride (composé d'un filtre passif à simple résonance et d'un filtre de puissance actif en parallèle).

Chaque configuration est évaluée en fonction des performances de son taux de distorsion harmonique « THD ». Les résultats ainsi obtenus nous permettront de faire une comparaison objective entre les performances des deux solutions, il est à noter qu'on dans un autre lieu nous effectuerons des variations des paramètres du filtre actif de puissance parallèle dans le cas du modèle hybride pour mettre en évidence la possibilité d'avoir des THDs identiques avec le modèle contenant uniquement le filtre actif de puissance parallèle.

II.2 Filtre passifs [15]

Le filtre passif à simple résonance est une solution couramment utilisée pour la réduction sélective d'un harmonique spécifique dans les réseaux électriques. Il est constitué d'un circuit R, L et C, dimensionné pour résonner à la fréquence de l'harmonique ciblé, typiquement la 5^{ème} harmonique dans un système à 50 Hz. Grâce à cette résonance, le filtre présente une impédance minimale à cette fréquence, permettant de détourner efficacement le courant harmonique du réseau vers le filtre.

Ce type de filtre est particulièrement apprécié pour sa simplicité de conception, son coût réduit et son efficacité ciblée. Toutefois, sa sélectivité ne lui permet de traiter qu'un seul ordre harmonique à la fois. [16]

Dans les systèmes hybrides, combinant filtre passif et filtre actif de puissance parallèle, le filtre à simple résonance joue un rôle complémentaire essentiel. Il prend en charge les harmoniques dominantes et fixes, permettant ainsi au filtre actif de puissance de se concentrer sur les harmoniques résiduels ou variables. Cette répartition des tâches améliore l'efficacité globale du filtrage, tout en optimisant les performances dynamiques et les coûts d'investissement et réduisant le dimensionnement du filtre actif de puissance.

II.2.1 Paramètres électriques pour le dimensionnement du filtre passif

Le dimensionnement d'un filtre passif à simple résonance repose sur plusieurs paramètres essentiels [14], qui conditionnent son efficacité :

- **Fréquence de l'harmonique ciblée (f_h)** : le filtre est accordé pour atténuer un seul ordre harmonique, généralement le plus dominant comme la cinquième harmonique (250 Hz dans un réseau à 50 Hz),

- **Tension nominale (V_n)** : est utilisée pour calculer la puissance réactive fournie par le filtre,

- **Courant harmonique à filtrer (I_h)** : permet de déterminer la capacité du filtre à absorber l'énergie de l'harmonique visée,

- **Impédance du réseau (Z_s)** : Influence sur les interactions entre le filtre et le réseau, notamment sur les risques de résonances indésirables,

- **Facteur de qualité (Q)** : il mesure la sélectivité du filtre autour de la fréquence de résonance. Il dépend des valeurs de résistance (R), inductance (L) et capacité (C).

- **Puissance réactive du filtre (Q_p)** : Doit être suffisante pour absorber le courant harmonique ciblé, tout en évitant une surcompensation qui pourrait engendrer des perturbations de tension.

II.2.2 Calcul des paramètres d'un filtre passif simple Résonance [10]

Le filtre passif à simple résonance est conçu pour atténuer une seule fréquence harmonique spécifique, généralement l'une des plus dominantes du spectre, comme la 5^{ème} harmonique. Il est constitué d'une unique branche R.L.C., accordée à cette fréquence.

Selon la configuration choisie, le circuit peut être monté en série ou en parallèle avec la charge ou le réseau. À sa fréquence de résonance, le filtre présente une impédance très faible, permettant de dériver efficacement le courant harmonique ciblé.

II.2.2.1 Exemple de Calcul de la 5^{ème} harmonique

Reactance capacitive (X_c) :

$$X_c = \frac{U^2}{Q_f} \quad \text{II.1}$$

$$X_c = \frac{(240)^2}{3 \cdot 10^5} = 0.192 \Omega$$

Capacité (C)

$$C = \frac{1}{2 \pi f_0 X_c} \quad \text{II.2}$$

$$C = \frac{1}{2 \pi \cdot 50 \cdot 0.192} = 0.0165 \text{ F}$$

$$Q_c = V^2 2 \pi f_h C \quad \text{II.3}$$

$$Q_c = 240^2 2 \pi 250 16.58 \cdot 10^{-3} = 1.5 \text{ KVAR}$$

Inductance (L)

$$L = \frac{X_c}{h_n^2 * 2 \pi f} \quad \text{II.4}$$

$$L = \frac{0.192}{5^2 2 \pi 250} = 4,889 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

Réactance inductive (X_L)

$$X_L = 2 \pi f L$$

$$X_L = 2 \pi 250 24.45 10^{-6} = 0.0384 \Omega$$
II.5

Réactance caractéristique de filtre (X_n)

$$X_n = \sqrt{X_L X_c}$$

$$X_n = 0.0384 \Omega$$
II.6

Résistance (R)

$$R = \frac{X_n}{Q}$$

$$R = \frac{0.0384}{70} = 0.548 * 10^{-3} \Omega$$
II.7

II.2.2.2 Exemple de calcul de la 7^{ème} harmonique

$$Q_c = V^2 2 \pi f_h C$$

$$Q_c = 240^2 2 \pi 350 16.58 10^{-3} = 2.1 \text{ KVAR}$$
II.8

Inductance (L)

$$L = \frac{X_c}{h_n^2 * 2 \pi f}$$

$$L = \frac{0.192}{7^2 2 \pi 350} = 12.4710^{-6} \text{ H}$$
II.9

Réactance inductive (X_L)

$$X_L = 2 \pi f L$$

$$X_L = 2 \pi 350 12.47 10^{-6} = 0.0274 \Omega$$
II.10

Réactance caractéristique de filtre X_n

$$X_n = \sqrt{X_L X_c}$$

$$X_n = 0.0274 \Omega$$
II.11

Résistance R

$$R = \frac{X_n}{Q}$$

$$R = \frac{0.0384}{70} = 0.548 * 10^{-3} \Omega$$
II.12

II.2.3 Simulations :

II.2.3.1 Simulation du reseau à étudier sans filtre :

Nous débuterons par une présentation de notre cas d'étude (model de réseau électrique), comme le montre la figure ci-dessous :

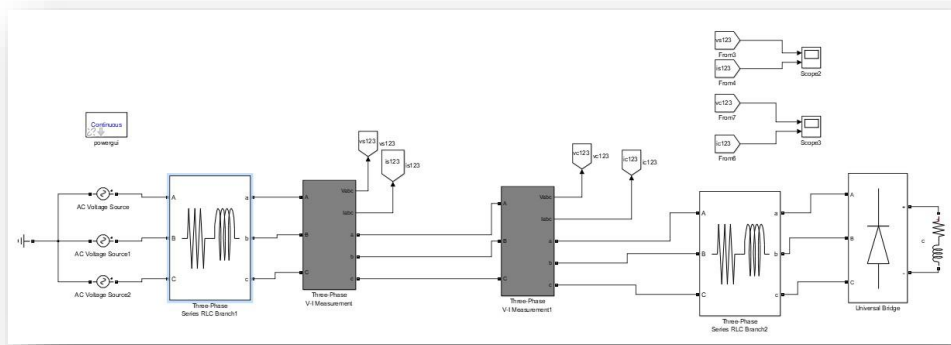


Figure II .1 : source et charge connecté au réseau triphasé.

Le tableau suivant présente les paramètres de notre système :

Tableau II .1 : Paramètres de simulation pour notre système

Tension (V)	F (Hz)	Rs (Ω)	Ls (μH)	Rcharge (Ω)	Lcharge (μH)
690	50	2.7310^{-3}	0.01	0.001	0.01

II.2.3.1.1 Résultats

Lorsque nous procédons à la simulation de notre model, nous obtenons :

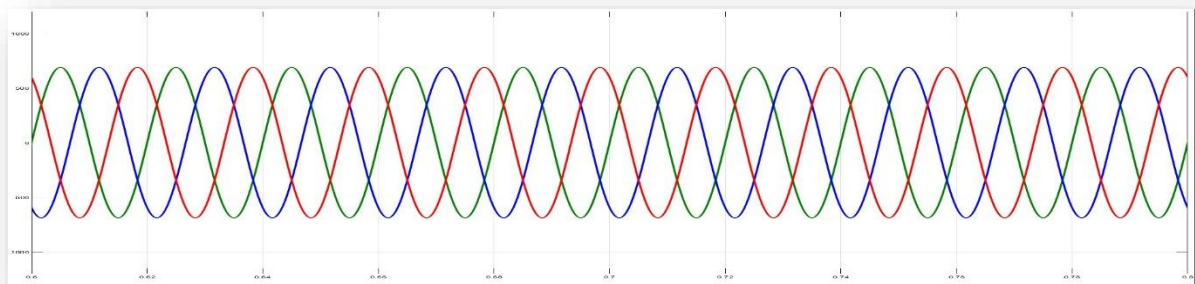


Figure II .2 : Tension de source des trois phases (Avant filtrage)

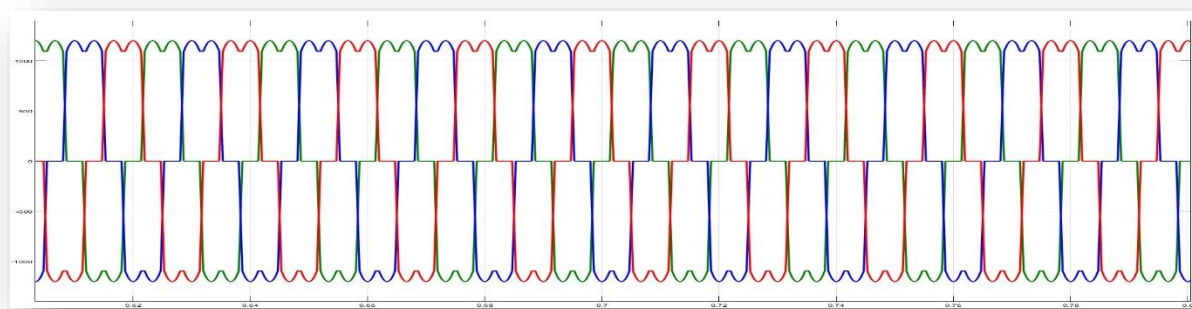


Figure II.3 : Allures des courants de source (Avant filtrage)

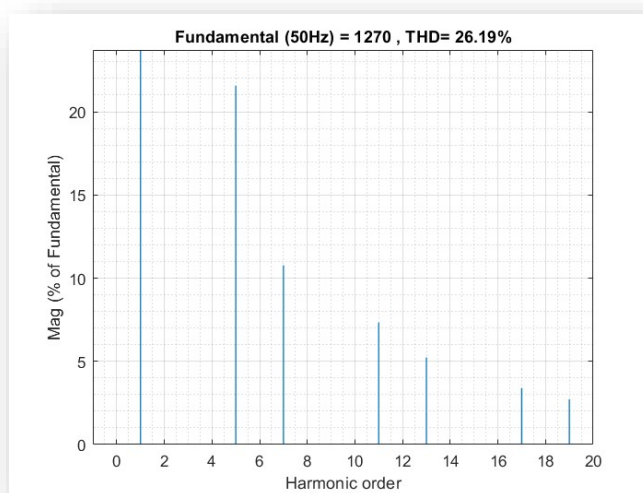


Figure II.4 :THD de courant Avant filtrage

II.2.3.1.2 : Interprétation

- La tension demeure à son niveau nominal,
- Le courant de source est identique à celui de la charge avant compensation,
- Le taux de distorsion harmonique (THD) est de 26,19 %, un chiffre qui dépasse de beaucoup le seuil fixé par la norme.

II.2.3.2 Model de simulation pour les trois cas d'étude :

- a. FP pour 5^{ème} harmonique,
- b. FP pour 7^{ème} harmonique,
- c. FP pour 5^{ème} et 7^{ème} harmonique.

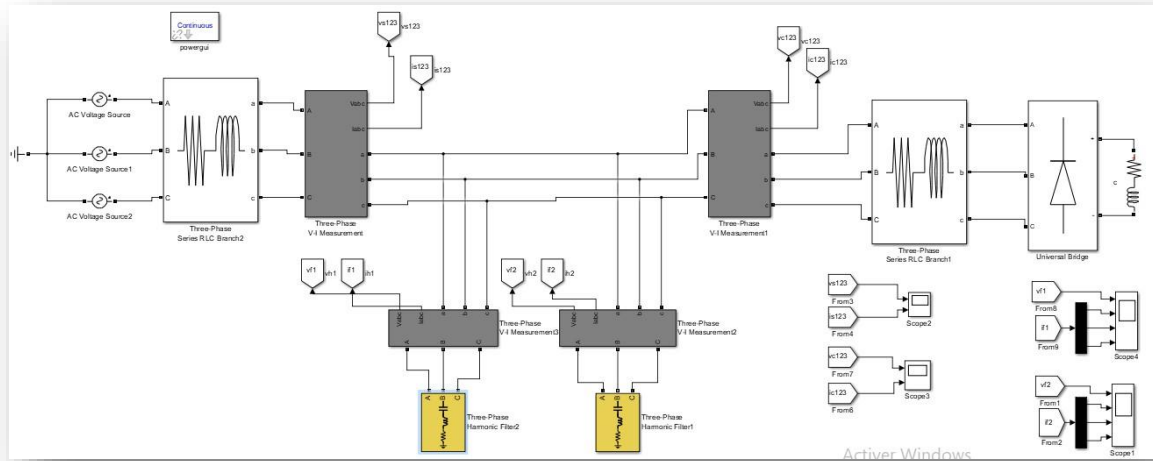


Figure II.5: Simulation de filtre passif

Les paramètres de simulation sont résumés au tableau suivant

Tableau II.2 : Paramètres du filtre passif à simple résonance

Tension de réseau	690V	
Fréquence de réseau	50 Hz	
Puissance réactif nominal	300 000 W	
Fréquences harmonique	5	7
Facteur de qualité Q	70	70

II.2.3.3 Résultats :

a. Cas de la 5^{ème} Harmonique

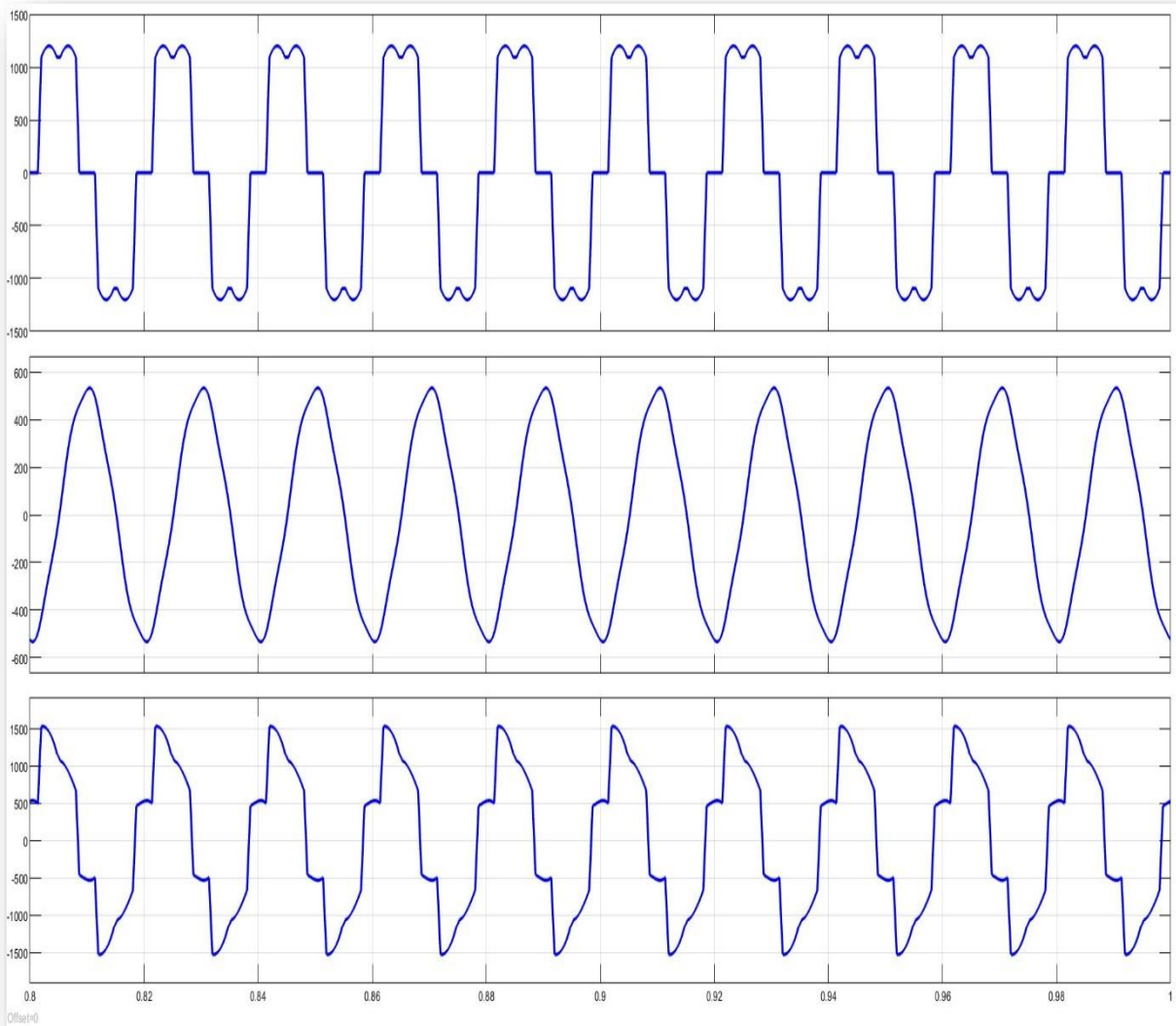


Figure II.6 : Allures de courant de source et de charge et de filtre

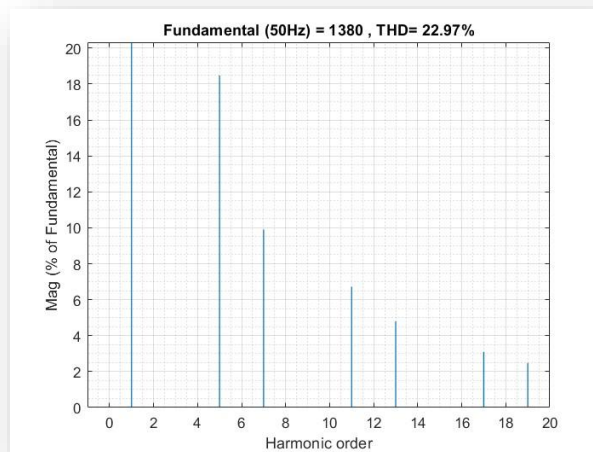


Figure II.7 : THD de la source

b. Cas de la 7^{ème} Harmonique

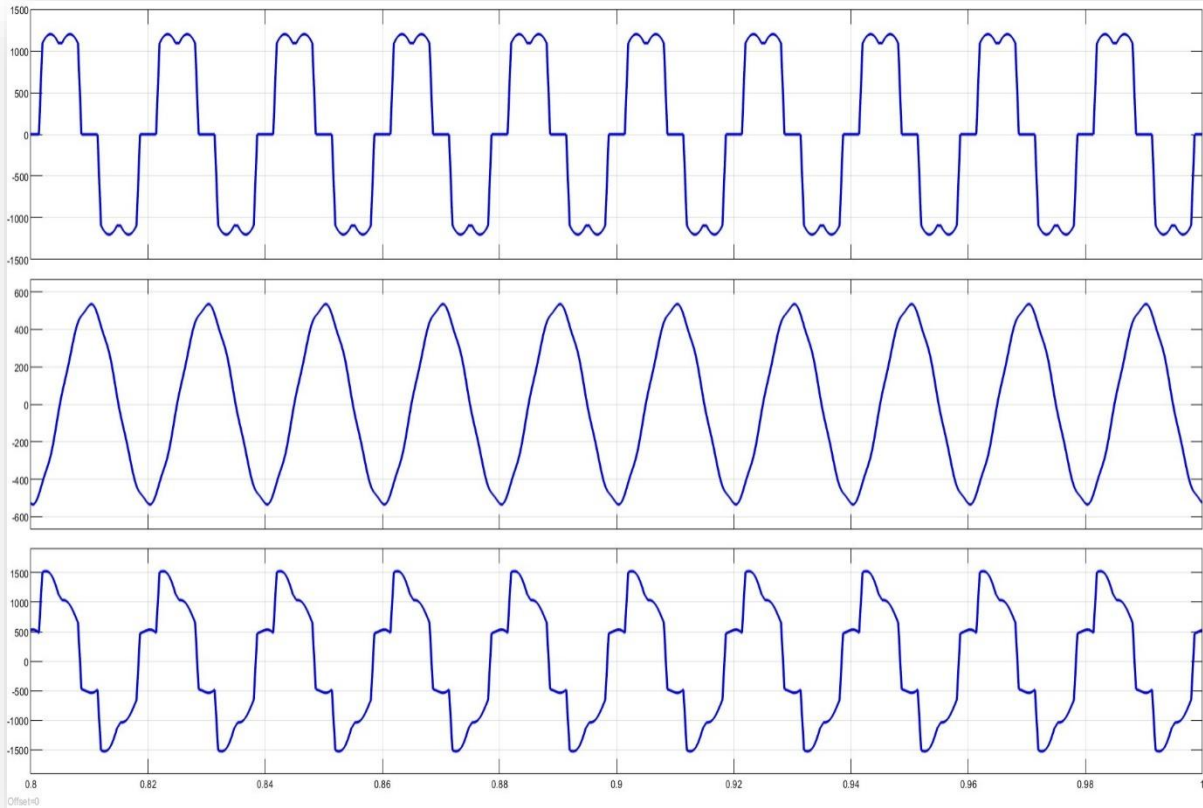


Figure II.8 : Allures de courant de source et de charge et de filtre

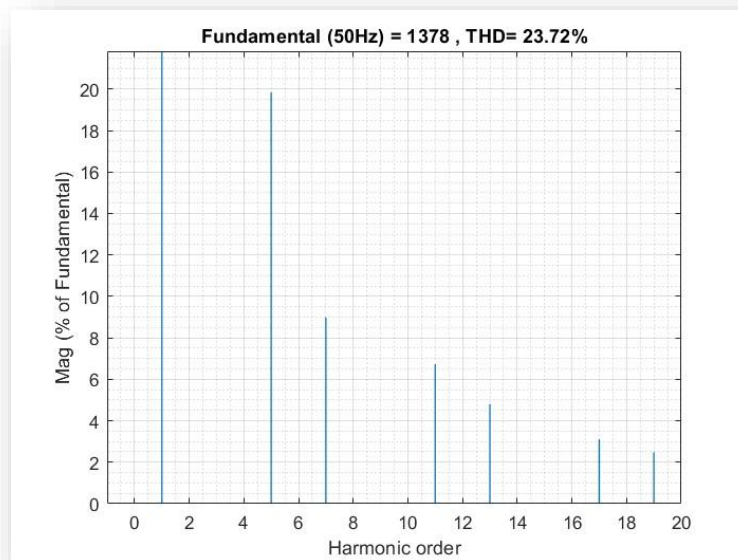


Figure II.9 : THD du courant de source

c. Cas de la Cas 5^{ème} et 7^{ème} Harmonique

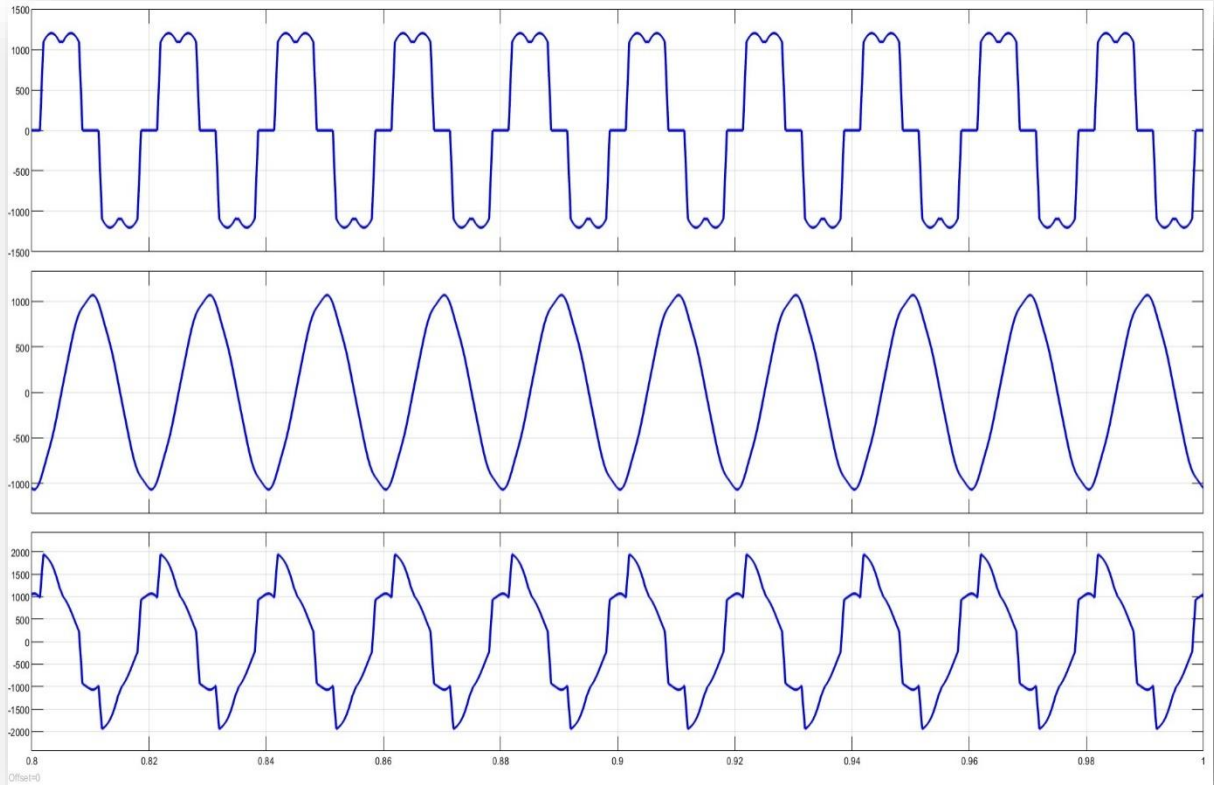


Figure II.10 : Allures de courant de source et de charge et de filtre

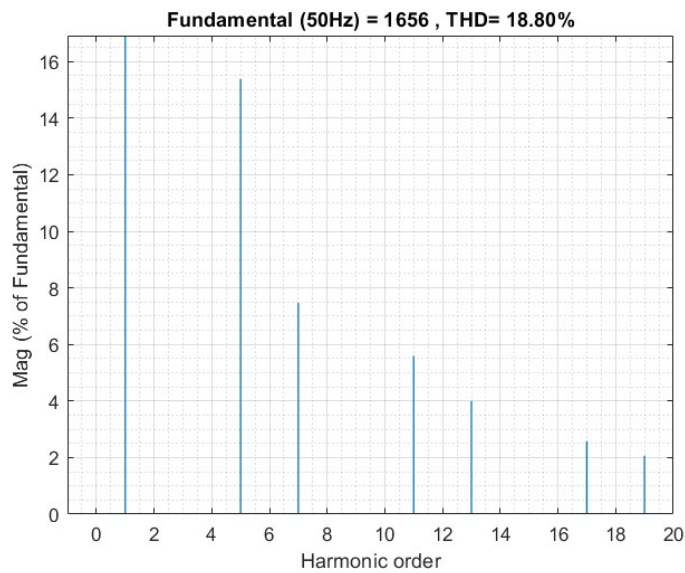


Figure II.11 : THD du courant de source

II.2.3.4 Interprétation

Les simulations réalisées avec le filtre passif simple résonance, accordé successivement sur les 5^{ème} et 7^{ème} puis sur les deux harmoniques simultanément, montrent une amélioration notable de la qualité du signal courant de source. Le filtre dérive efficacement les composantes harmoniques ciblées, ce qui se traduit par une baisse significative du THD. La configuration accordée sur la 5^{ème} et la 7^{ème} harmonique offre les meilleurs résultats, avec un THD de 7,06 %.

Bien que cette valeur soit nettement inférieure à celle obtenue sans filtrage, elle reste légèrement supérieure aux limites imposées par certaines normes en la matière. Cela montre que, malgré son efficacité sélective, le filtre passif ne peut traiter que les harmoniques auxquels il est accordé et ne supprime pas les composantes plus élevées ou variables

II.3 Filtre actif de puissance [15]

Pour améliorer la qualité de l'énergie électrique, le filtre actif de puissance offre une solution avancée et adaptable. À la différence des filtres passifs, celui-ci offre la possibilité de corriger de manière dynamique les courants harmoniques produits par les charges non linéaires, sans tenir compte de la fréquence ou de l'intensité des perturbations. Ce genre de filtre, qui s'appuie sur un onduleur contrôlé, injecte dans le réseau un courant compensatoire en phase et opposé aux courants harmoniques identifiées.

II.3.1 Principe de fonctionnement de FPAP [17]

Ce genre de filtre fonctionne en tant que générateur de courant, produisant des courants harmoniques en phase inverse par rapport aux courants harmoniques émis par la charge polluante. Cela permet d'obtenir des courants alternatifs et équilibrés provenant du réseau, comme montré dans la Figure II.12

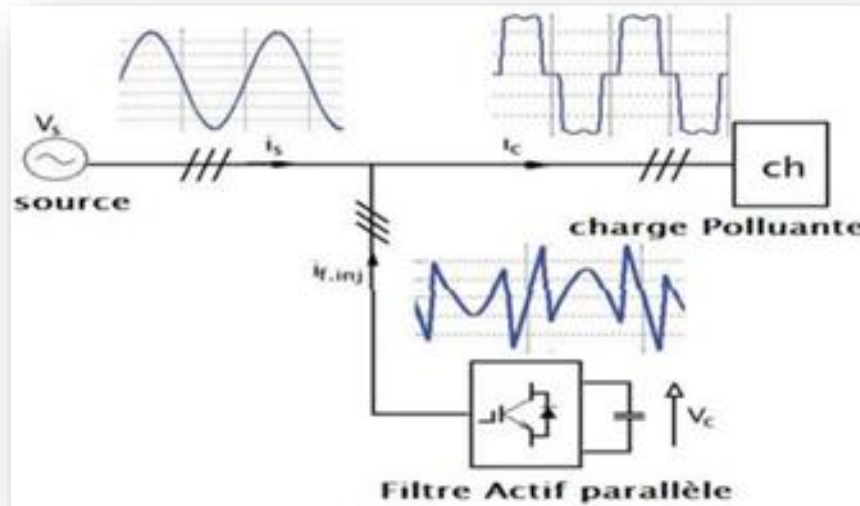


Figure II.12 : Principe de filtrage actif parallèle

II.3.2 Topologies des Filtres Actifs de Puissance [2]

II.3.2.1 Filtre actif de puissance à 2 bras à point-milieu

Dans le contexte d'un réseau à trois fils, deux topologies de filtre actif de puissance sont disponibles : les filtres de puissance à deux bras utilisant des condensateurs à point milieu. La mise en place du filtre bidirectionnel avec un point central capacitif du côté DC est représenté dans la Figure II.13. Cette configuration comprend quatre interrupteurs contrôlés, qui peuvent être fermés et ouverts (transistor, IGBT, thyristor ou GTO), assemblés en antiparallèle avec une diode. Ainsi, ils constituent les deux côtés d'un onduleur triphasé. Le troisième bras est formé de deux condensateurs dont le point central lié à la troisième phase du réseau électrique, détermine le potentiel au milieu du bus continu. Il faut assurer un contrôle et éviter tout déséquilibre entre les deux extensions $\frac{V_{dc}}{2}$.

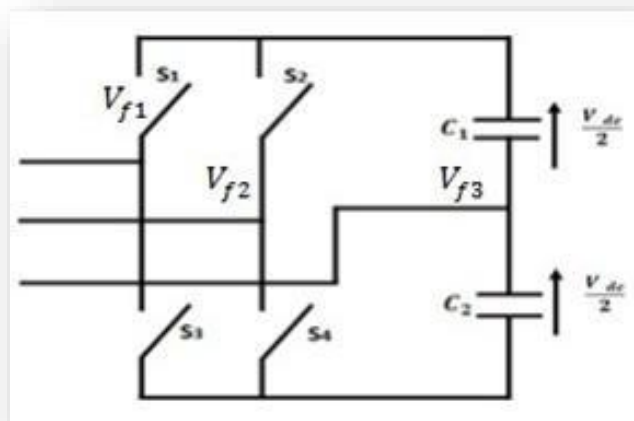


Figure II.13 : Onduleur de tension à 2 bras avec condensateurs à point milieu

Le Tableau II.3 contient les états de commutation pour ce genre d'onduleur : $\frac{-V_{dc}}{6}$

Tableau II.3 : Tensions générées par l'onduleur de tension à 2 bras à point milieu :

K	S ₂	S ₁	v_{f1}	v_{f2}	v_{f3}
0	0	0	$\frac{-V_{dc}}{6}$	$\frac{-V_{dc}}{6}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
1	0	1	$\frac{+V_{dc}}{2}$	$\frac{-V_{dc}}{2}$	0
2	1	0	$\frac{-V_{dc}}{2}$	$\frac{-V_{dc}}{2}$	0
3	1	1	$\frac{+V_{dc}}{6}$	$\frac{+V_{dc}}{6}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$

Il y a quatre combinaisons de commande possibles. Pour obtenir ces états de commutation, on utilise les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +4 s_1 & -2 s_2 & -1 \\ -2 s_1 & +4 s_2 & -1 \\ -2 s_1 & -2 s_2 & +2 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{II.13}$$

II.3.2.2 Filtre actif de puissance à 3 bras [2]

Nous employons un onduleur de tension à trois bras, chacun formé de 6 interrupteurs réversibles commandé lors de la fermeture et de l'ouverture. Cet onduleur est connecté au réseau électrique par l'intermédiaire d'un filtre d'entrée du premier ordre, présenté dans la figure II.14. Notre onduleur dispose d'un condensateur qui assure que la tension à ses bornes est maintenue à une valeur positive pratiquement constante.

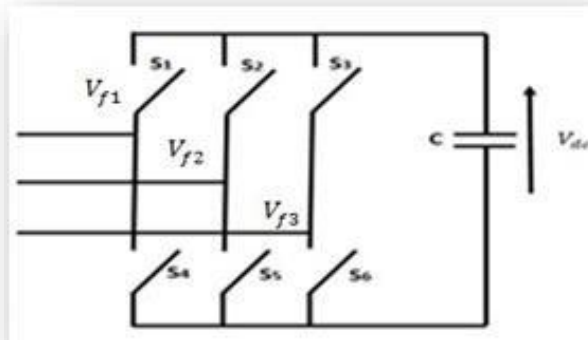


Figure II.14 : Onduleur de tension à trois bras pour un réseau électrique à 3 fils.

Le Tableau II.4 présente les états de commutation pour ce type d'onduleur.

Tableau II.4 : Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras [16]

K	S ₃	S ₂	S ₁	v_{f3}	v_{f2}	v_{f1}
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{+2V_{dc}}{3}$
2	0	0	1	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{+2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
3	0	0	1	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{+V_{dc}}{3}$	$\frac{+V_{dc}}{3}$
4	0	1	0	$\frac{+2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
5	0	1	0	$\frac{+V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{+V_{dc}}{3}$
6	0	1	1	$\frac{+V_{dc}}{3}$	$\frac{+V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$
7	0	1	1	0	0	0

Ces derniers sont obtenus grâce aux expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +2 s_1 & - s_2 & - s_3 \\ - s_1 & + 2 s_2 & - s_3 \\ - s_1 & - s_2 & + 2 s_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad \text{II.14}$$

II.3.3 Constitution du Filtre de puissance Actif Parallèle [18]

Les filtres actifs comprennent deux éléments distincts : une partie puissance et une partie commande (voir figure II.15). La première comprend un onduleur de tension, un filtre de raccordement au réseau et une source d'énergie continu. Ces deux derniers éléments concernent le type de filtre actif. Il peut être conçu en structure tension ou courant, selon qu'il soit fabriqué en tant qu'un onduleur de tension ou decourant.

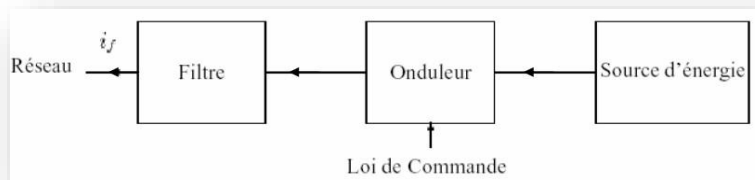


Figure II.15 : Structure d'un filtre actif parallèle

a. La partie puissance est constituée par :

- Un onduleur de tension utilisant des interrupteurs de puissance, qui peuvent être ouverts et fermés (GTO, IGBT, MOSFET, etc.), couplé à des diodes montées en antiparallèle. [11],
- Un circuit de stockage d'énergie,
- Un filter de sortie.

b. La partie commande est constituée par :

- Une méthode d'identification des courant sperturbés,
- Une regulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie
- Une regulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- Une commande de l'onduleur de tension.

II.3.3.1 Présentation des stratégies de commande

Dans cette section, nous montrerons les paramètres clés de la commande de composante du filtre actif de puissance parallèle pour détecter les courants ou tensions harmoniques. Par conséquent, nous avons. [19]

a. Identification des courants harmoniques par méthodes des puissances active et réactive instantanées (PQ) :

En 1983, H. Akagi a présenté « La théorie généralisée de la puissance réactive en circuits triphasés », aussi appelée la théorie pq. Elle repose sur le calcul des valeurs instantanées des puissances pour les systèmes triphasés, qu'ils comportent ou non un neutre. De plus, elle est applicable pour les opérations en régime permanent ou transitoire. La théorie pq repose sur la transformation $\alpha\beta$, qui est une matrice réelle permettant de convertir les tensions et courants triphasés équilibrés (abc) en un système à deux phases ($\alpha\beta$).

En appliquant la transformation de Concordia, ce qui permet d'écrire la relation des tensions et des courants suivants. [20]

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{II.15}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad \text{II.16}$$

En se basant sur les vecteurs $[V_\alpha, V_\beta]$ et $[i_\alpha, i_\beta]$ qui illustrent le système de tensions et de courants dans le cadre du repère (α, β). On définit donc les puissances instantanées

réelles et imaginaires par la relation suivante:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{II.17}$$

La puissance réelle et imaginaire peut être décrite comme la combinaison d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} & + & \check{p} \\ \bar{q} & + & \check{q} \end{bmatrix} \quad \text{II.18}$$

Comme la somme d'un élément continu et d'un élément alternatif :

Avec : $\bar{p}; \bar{q}$ les composantes continues de p et q.
 $\check{p}; \check{q}$ Composantes oscillatoires de p et q.

En utilisant \bar{p} et \bar{q} pour symboliser les éléments continus de p et q associés au fondamental, et \check{p} et \check{q} pour désigner les parties oscillatoires de p et q associées aux harmoniques. On peut déduire les composantes des courants à partir de l'équation :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad \text{II.19}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{p} \\ \check{q} \end{bmatrix} \quad \text{II.20}$$

En éliminant la partie continue de la puissance active pour contrebalancer les harmoniques de courant et l'énergie réactive, lorsque nous appliquons le contrôle direct, nous dérivons les courants de référence par la transformation inverse de

Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widetilde{p} \\ \widetilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{II.21}$$

Ce qui nous donne comme courant de référence dans les trois phases :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad \text{II.22}$$

L'illustration ci-dessous démontre le concept de la commande directe en utilisant la technique des puissances instantanées :

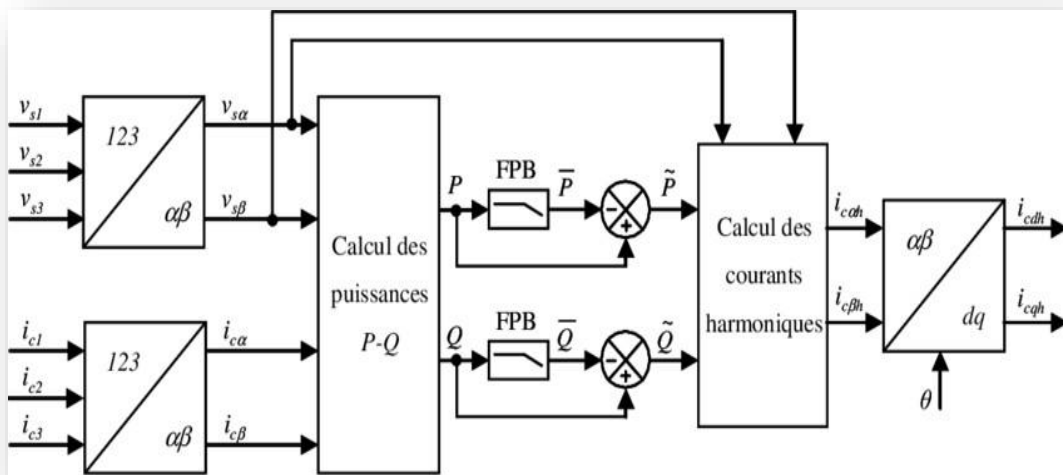


Figure II.16 : Méthode de la puissance instantané dite méthode PQ.

Dans cette technique, nous employons deux types de filtres d'extraction, illustrés par la figure ci-après :

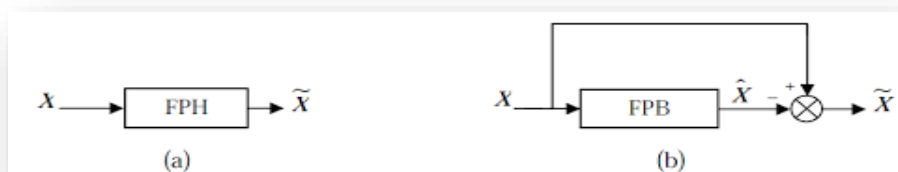


Figure II. 17 : Types classiques de filtre d'extraction de la composante harmonique

La méthode des puissances instantanées fait souvent appel à un filtre passe-haut ou passe-bas pour isoler la composante harmonique du signal. Ce choix est le plus répandu car il évite une amplification aux fréquences proches de la fréquence de résonance et son résidu harmonique est moins significatif, permettant ainsi de préserver uniquement la composante harmonique du signal.

Pour le filtre passe-bas, la fonction de transfert est :

$$F_B(p) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\varepsilon\omega_0 s + \omega_0^2} \quad \text{II.23}$$

Dans notre travail, nous avons opter pour un filtre passe-bas du second ordre qui a été déterminé par le besoin d'améliorer simultanément la dynamique et l'efficacité de la technique d'identification. La fréquence de coupure $\omega_0=2\pi f_0$ est choisie avec pour éliminer efficacement toutes les composantes perturbatrices des puissances instantanées. [15]

b. Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, est une méthode non linéaire qui exploite la différence entre le courant de référence ($i_{f_{ref}}$) et le courant généré par l'onduleur (i_f). On compare l'erreur à un modèle appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint les limites inférieures ou supérieures, un ordre de contrôle est émis afin de rester dans la bande.

Comme illustré dans la Figure II.18, ce qui fait la force principale de cette méthode est sa facilité d'application. Par contre, les commutations se déplacent librement au sein de la bande d'hystérésis. [21]

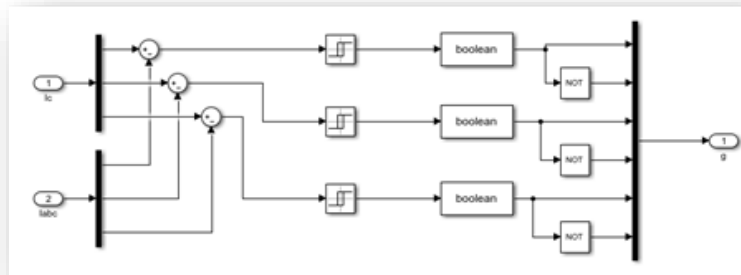


Figure II.18 : Commande par hystérésis

c. Commande par MLI

La modulation de largeur d'impulsion a pour objectif de déterminer les instants de commutation des interrupteurs afin d'obtenir une séquence qui préserve le même spectre de basse fréquence que le signal original, et son action est montrée à la Figure II.19. La méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) repose sur l'emploi d'une fréquence de commutation nettement supérieure à celle du signal de sortie souhaitée afin de reproduire la valeur moyenne de ce dernier à chaque cycle de commutation. Ceci est réalisé en modulant la durée des tensions positives et négatives par rapport au point médian du bus continu. [21]

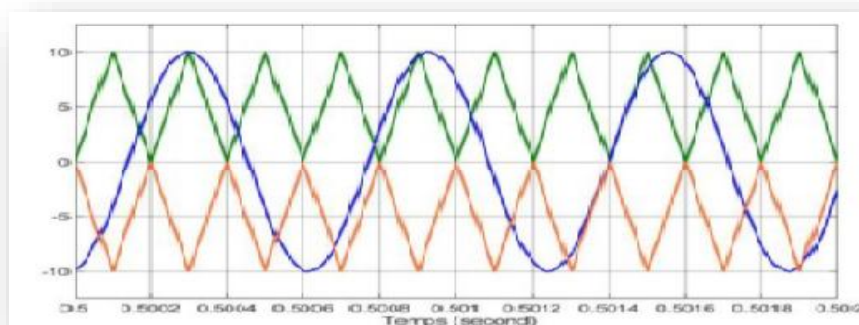


Figure II.19 : Modulation de Largeur d'Impulsion

II.3.4 Simulations du système avec Filtre actif de puissance parallele

II.3.4.1 model de simulation

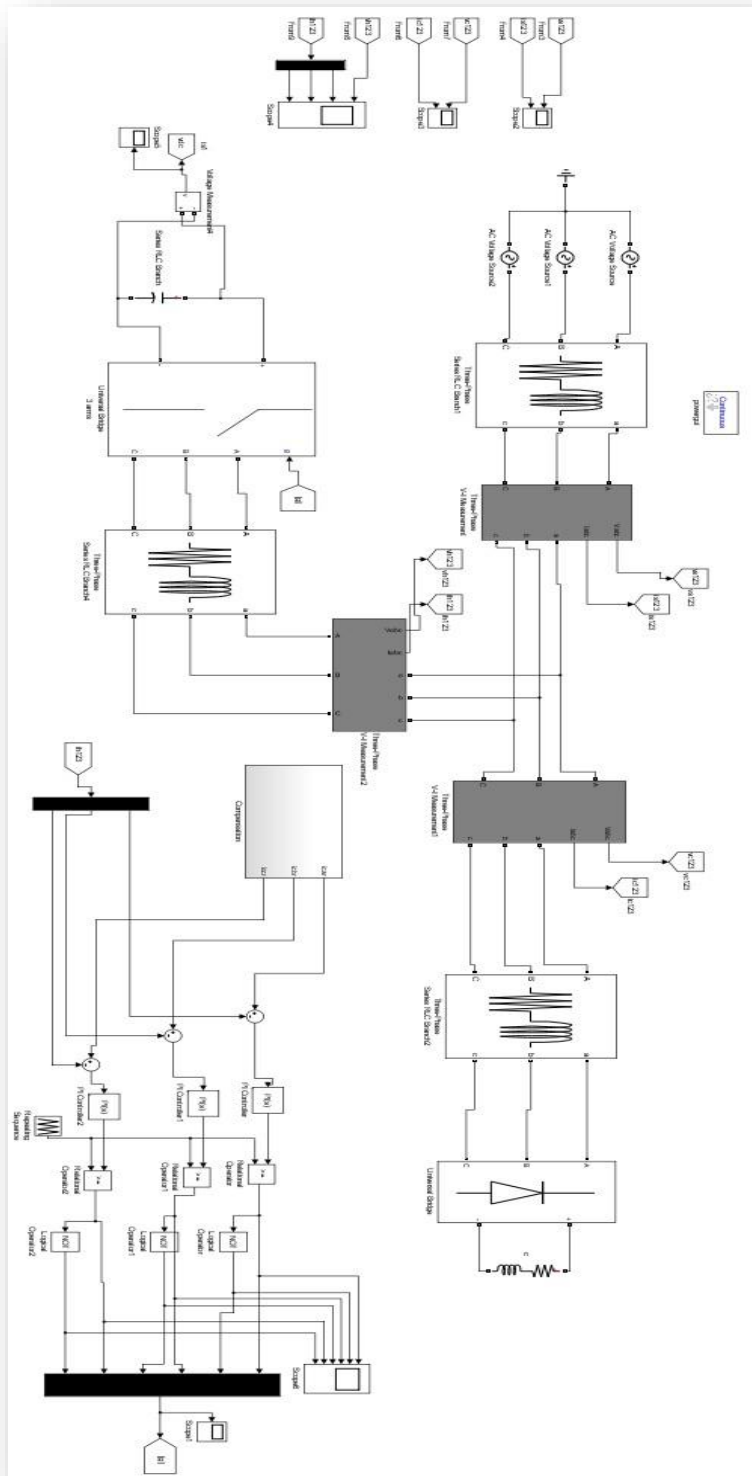


Figure II.20 : Simulation de filtre actif

Les paramètres de simulation sont résumés dans tableau suivant :

Tableau II.5 : Paramètres du filtre actif de puissance parallèle

$V_{dc}(V)$	$C_{dc}(\mu F)$	$R_f(m\Omega)$	$L_f(mH)$
700	810 ⁴	4	0.1

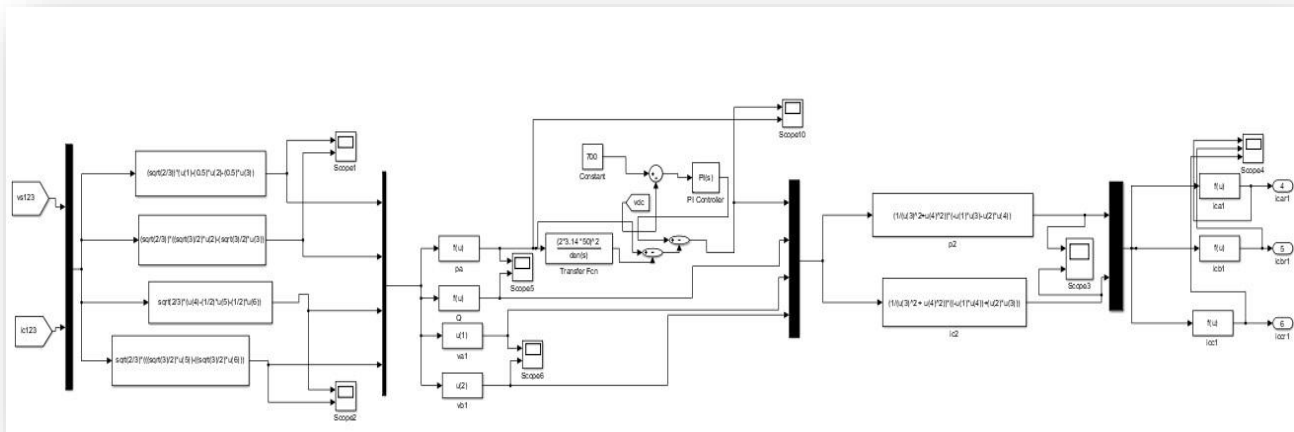


Figure II.21 : Commande PQ du filtre actif de puissance parallèle (direct)

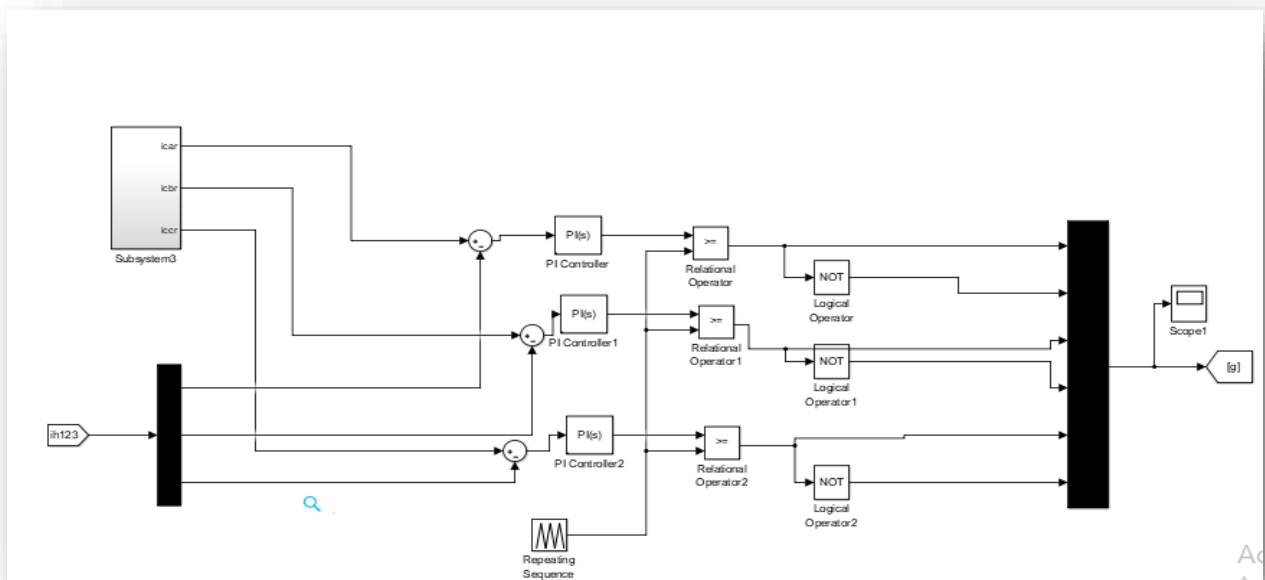


Figure II.22 : Commande MLI

II.3.4.2 Résultats de simulation

Après simulations du système, nous obtenons les résultats suivantes :

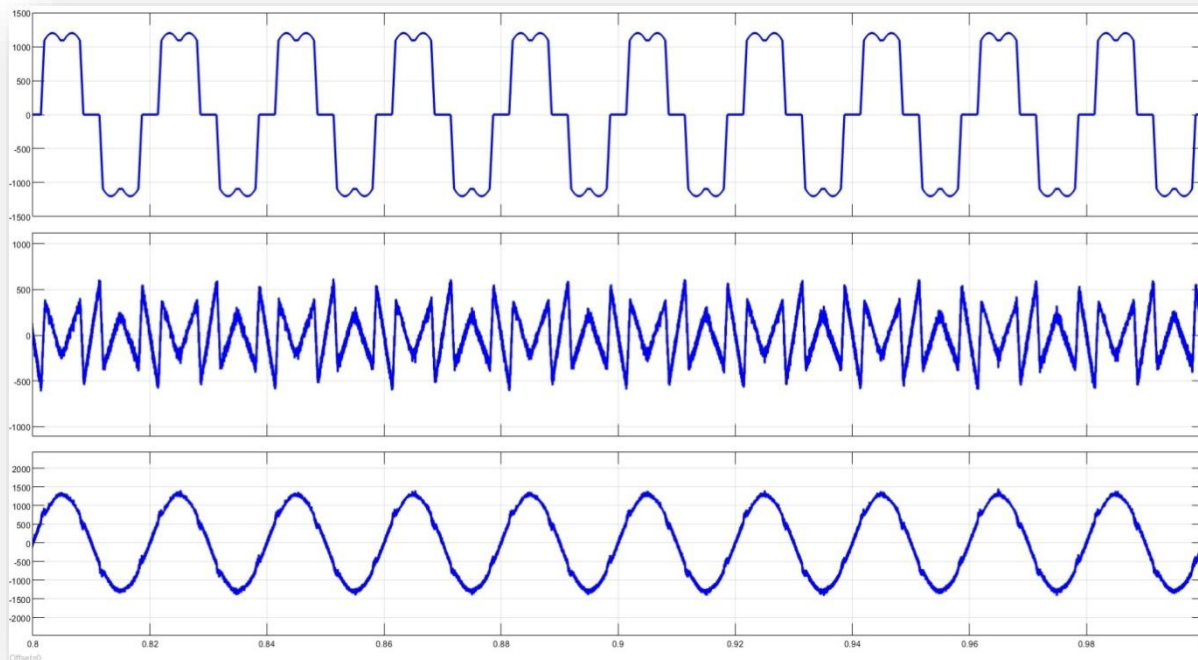


Figure II.23 : Allures des trois courant de charge, de filtre et de source.

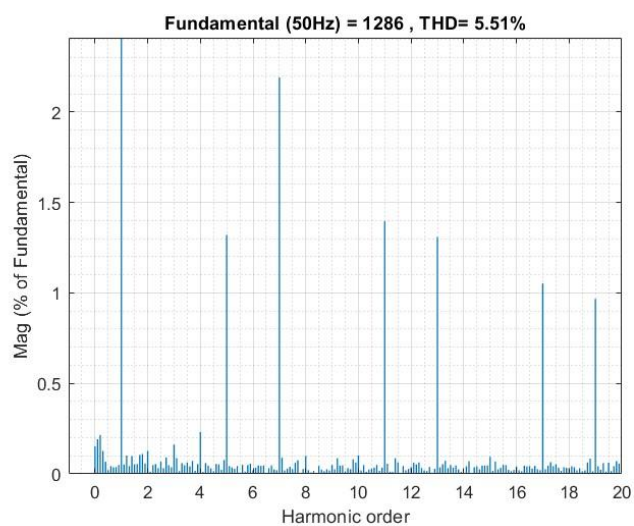


Figure II.24 : THD du courant de source

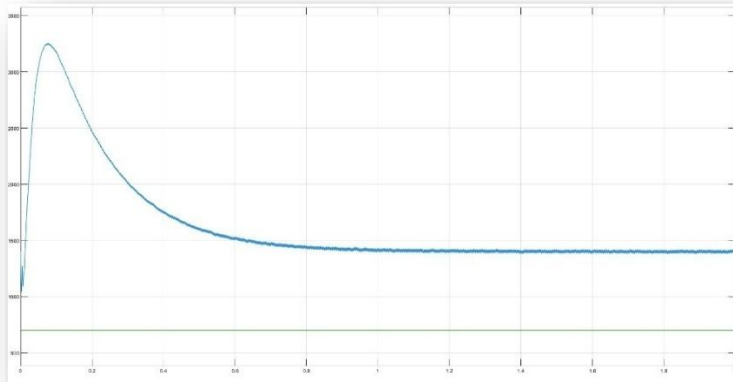


Figure II.25 : Tension aux borne du condensateur

Les résultats de cette simulation démontrent l'efficacité du filtre actif parallèle pour dépolluer le réseau électrique des courants harmoniques générées par la charge non-linéaire, en utilisant la méthode de puissance instantanée pq avec contrôle par MLI. Le Taux de Distorsion Harmonique obtenu après filtration est de 5,51%.

II.4 Filtre actif de puissance hybride

II.4.1 Simulation du système après filtrage hybride (Filtre passif simple résonance + Filtre actif de puissance parallèle) avec variation des paramètres du FPAP.

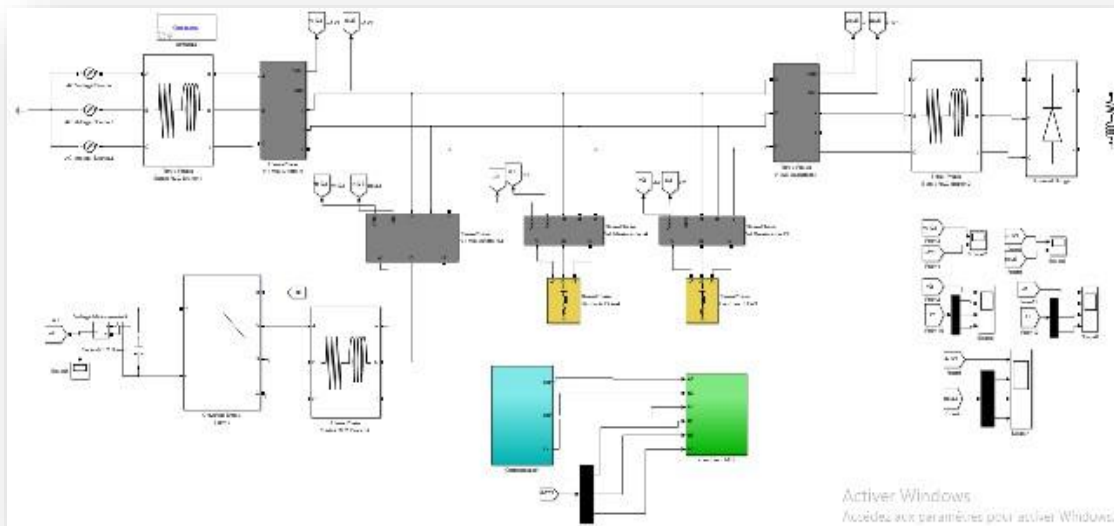


Figure II.26 : model de simulation du filtrage hybride

II.4.2 Model de simulation

Les paramètres de simulations sont résumés au tableau suivant :

Tableau II .6: Paramètres du filtre hybride

$V_{dc}(V)$	$C_{dc}(\mu F)$	$R_f(m\Omega)$	$L_f(mH)$
700	410 ⁴	3.5	0.07

Tableau II.7 : Paramètres du filtre passif simple résonance

Tension deréseau	240V	
Lafréquence deréseau	50hz	
Puissance réactif nominal	30000	
Fréquences harmonique	5	7
Facteur qualité	70	70

II.4.3 Résultats de simulation

II.4.3.1 Cas 5^{ème} Harmonique

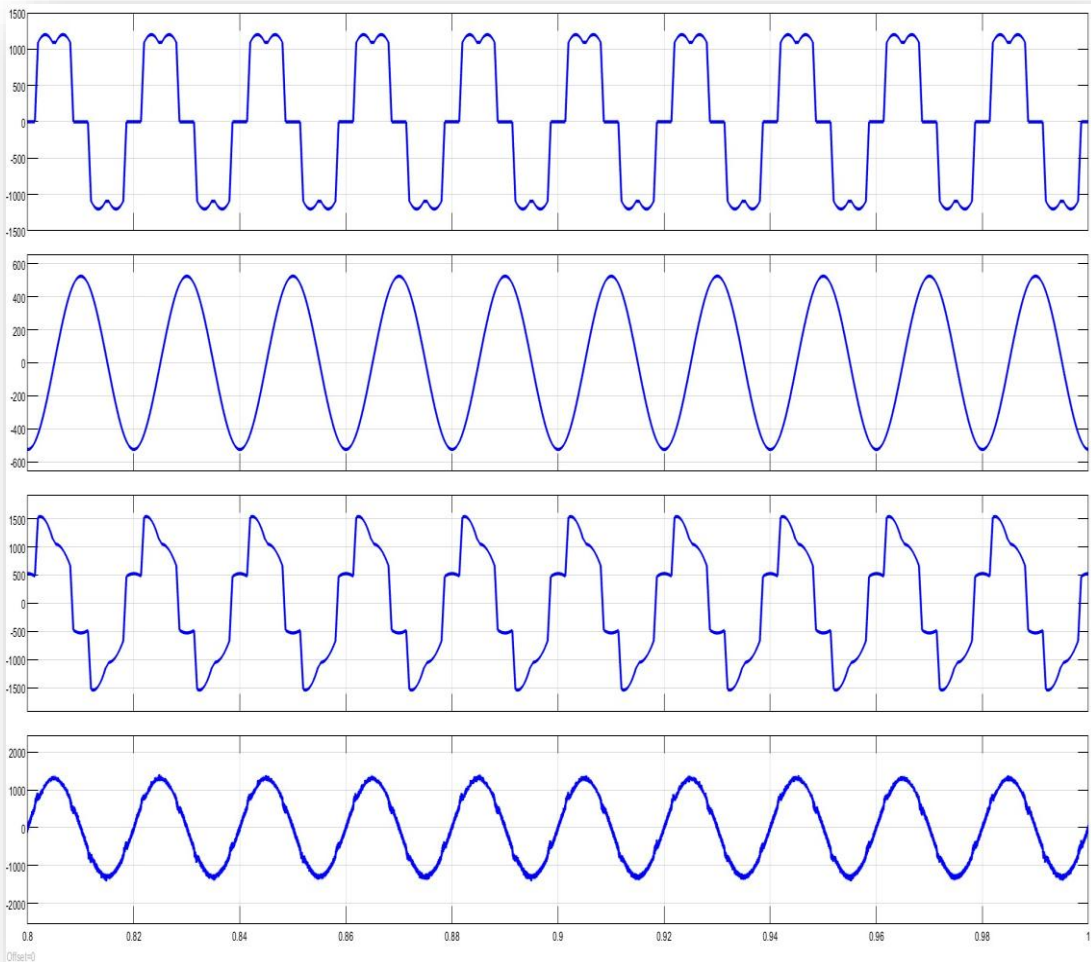


Figure II.27 : Allures de courant de source et de charge et de filtre

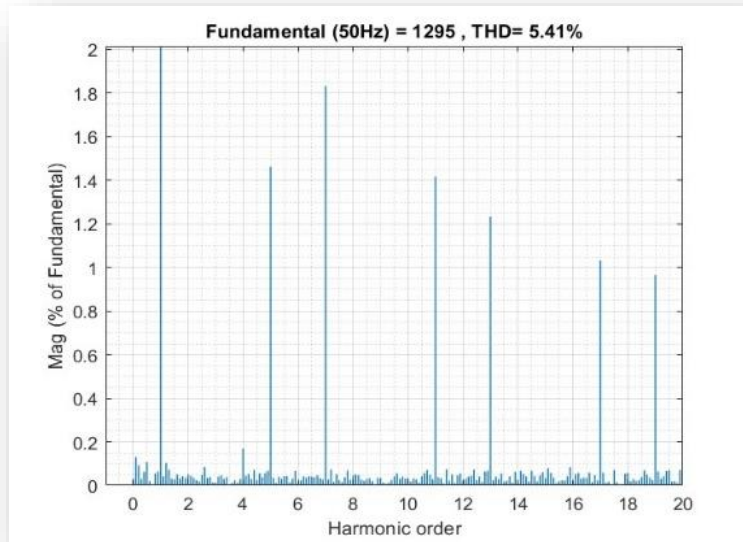


Figure II.28 : THD du courant de source

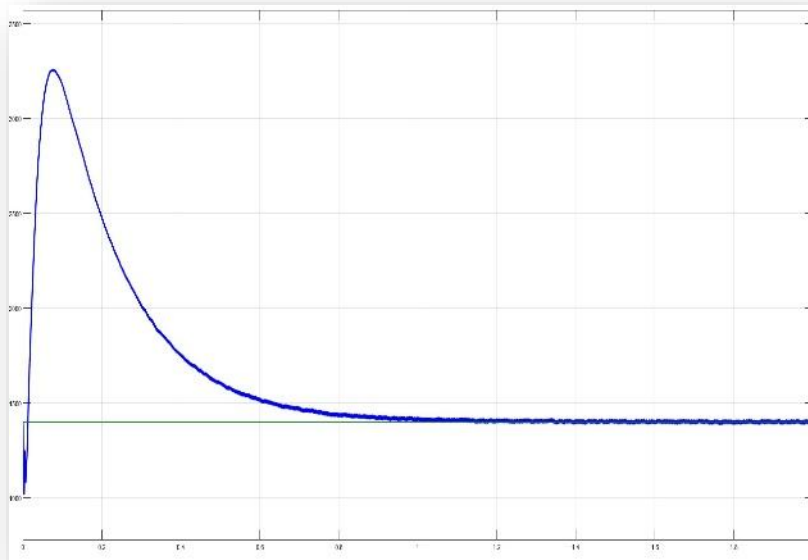


Figure II.29 : Tension aux borne du condensateur

II.4.3.2 Cas 7^{ème} Harmonique

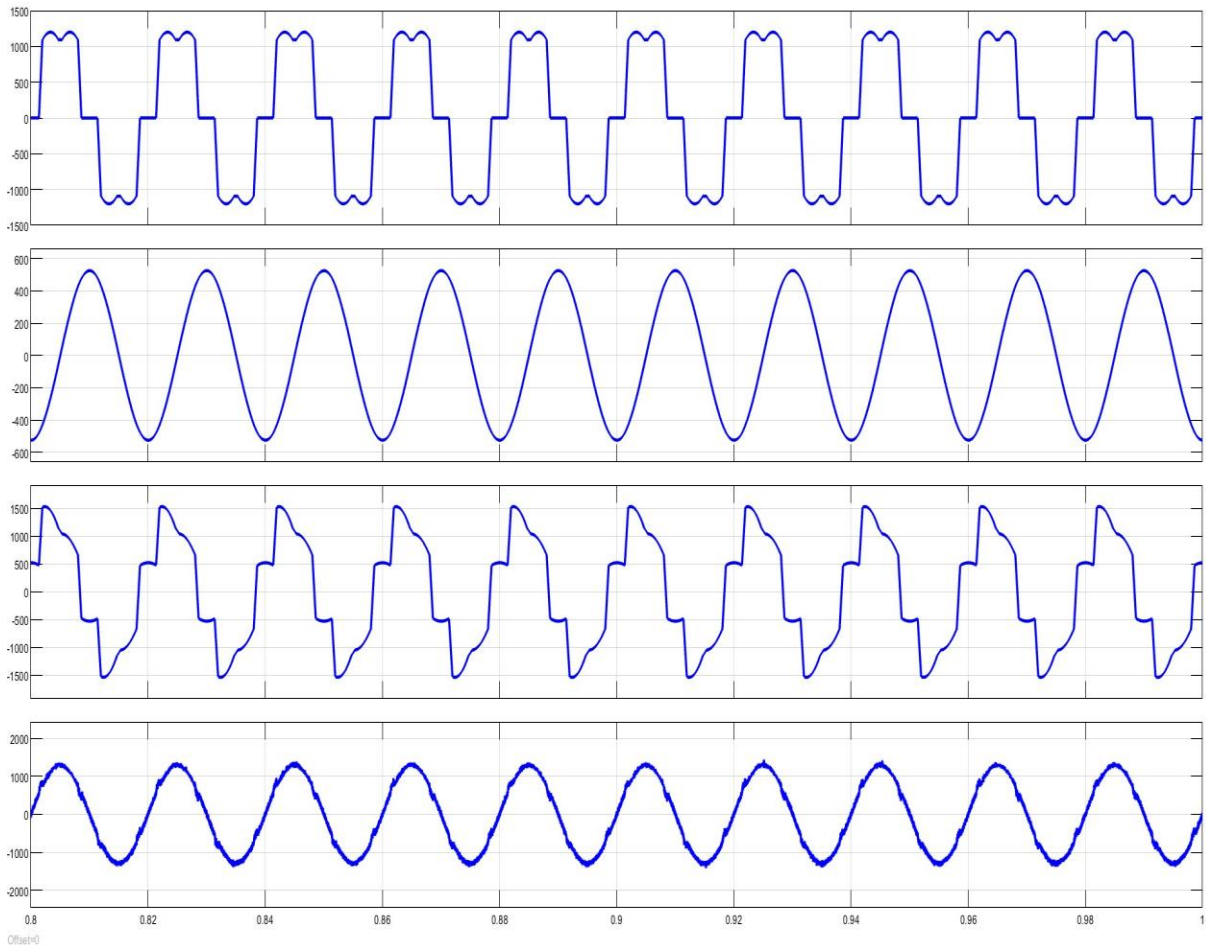


Figure II.30 : Allures de courant de source et de charge et de filtre

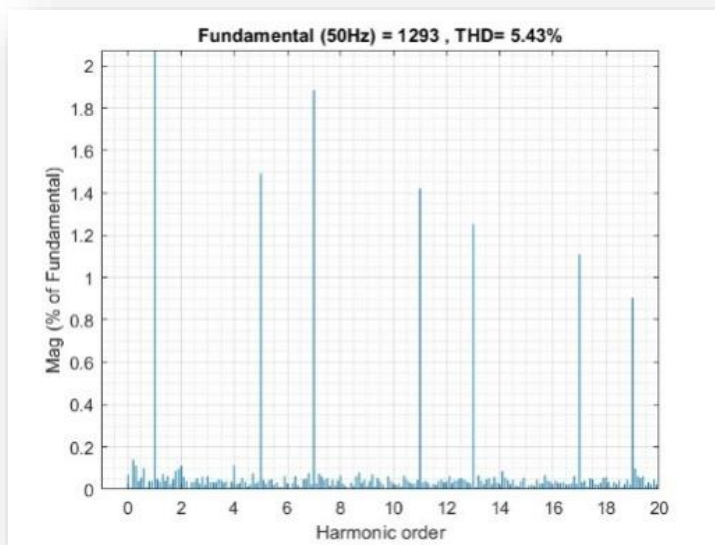


Figure II.31 : THD du courant de source

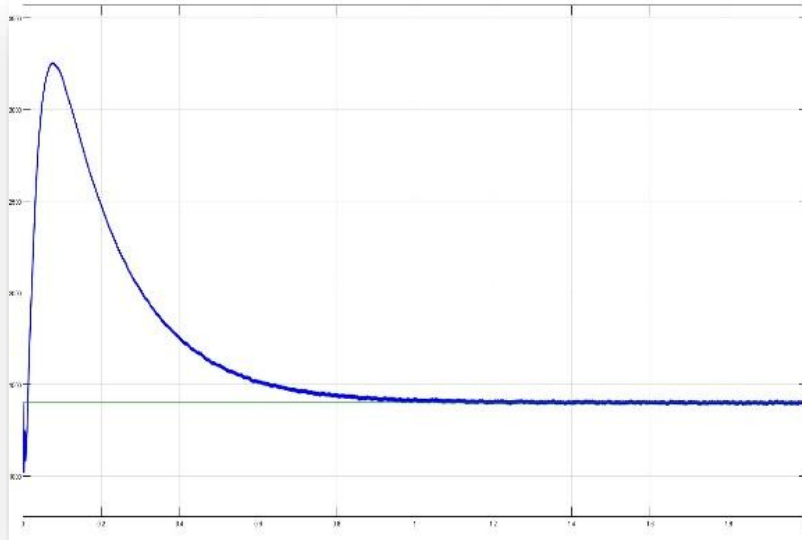


Figure II.32 : Tension aux borne du condensateur

II.4.3.3 Cas 5^{ème} & 7^{ème} Harmonique :

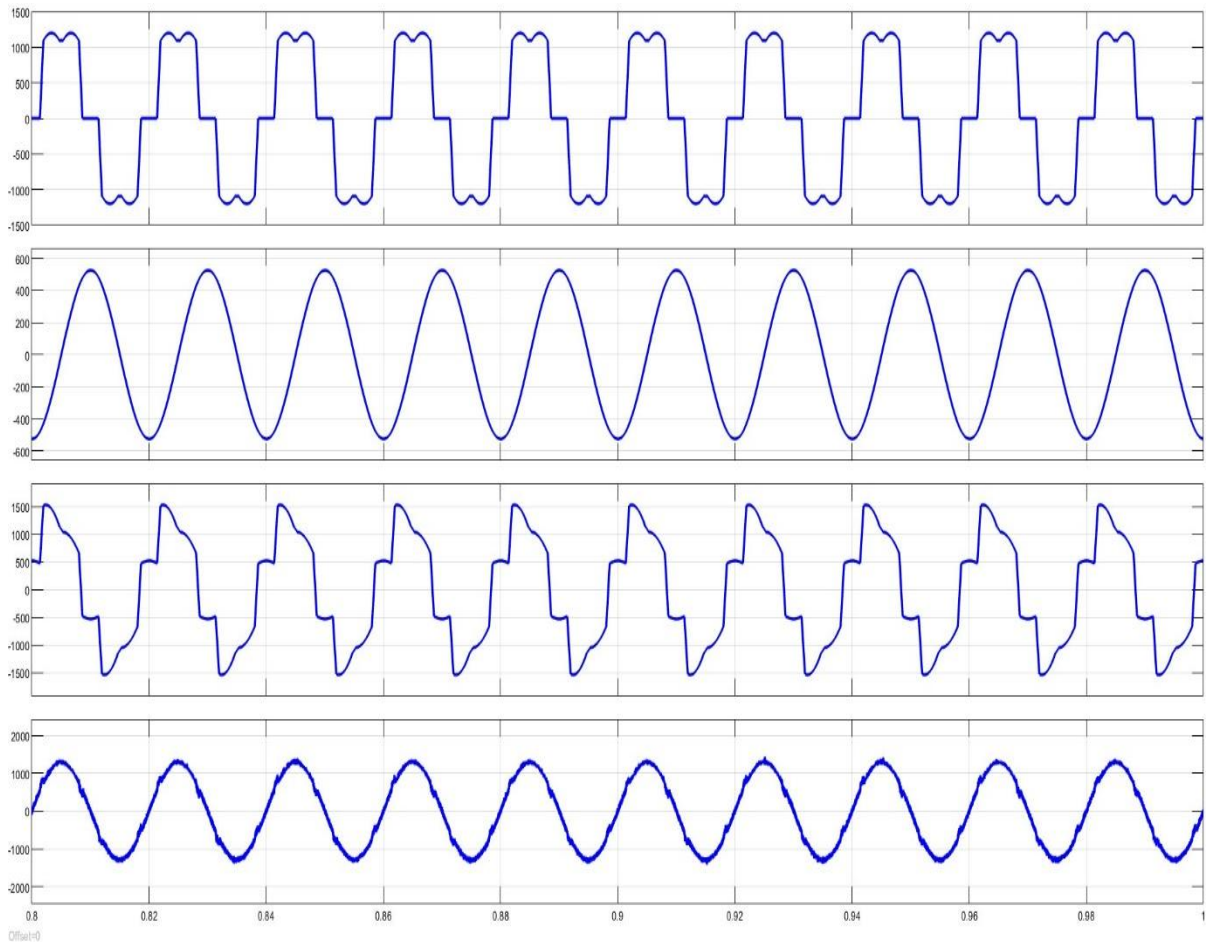


Figure II.33 : Allures de courant de source et de charge et de filtre

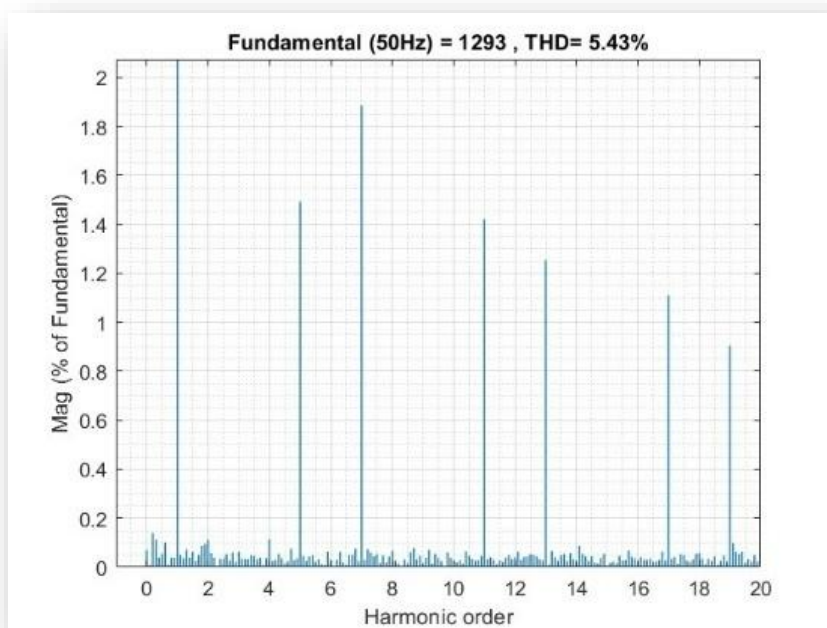


Figure II.34 : THD du courant de source

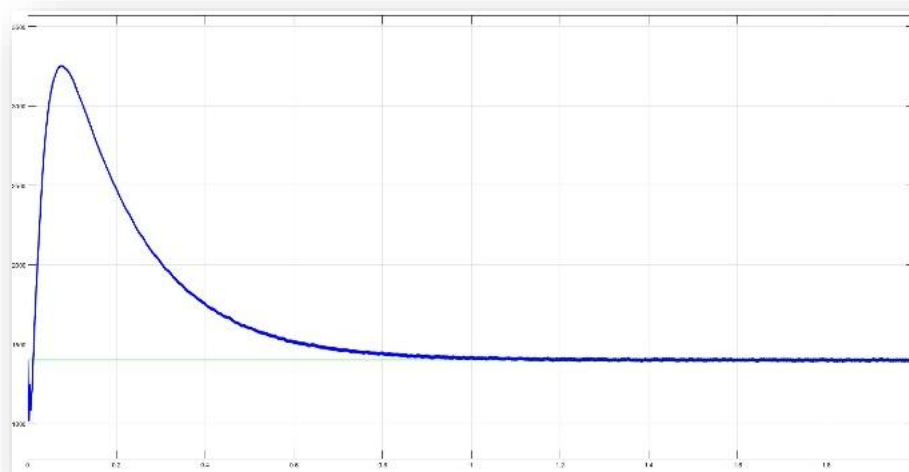


Figure II.35 : Tension aux borne du condensateur

II.4.4 Interpretation

Les résultats de simulation pour le système hybride, nous a permis d'atteindre un THD de 5,43 %, identique à celui obtenu avec le filtre actif seul. Toutefois, grâce au filtrage passif des 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques, réduisant ses efforts de compensation. Cette solution optimise les performances tout en diminuant la consommation énergétique et le dimensionnement du filtre actif.

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons examiné différentes stratégies de compensation des courants harmonique appliquées à un réseau électrique triphasé alimenté par une charge non linéaire. Trois approches principales ont été analysées à travers des simulations sous MATLAB/Simulink : le filtre passif simple résonance, le filtre actif parallèle, et enfin la configuration hybride combinant les deux topologies.

Les résultats ainsi obtenus montrent que le filtre passif offre une atténuation sélective efficace des harmoniques ciblées, notamment pour les 5^{ème} et 7^{ème}. Cependant, sa sélectivité limitée ne permet pas traiter l'ensemble du spectre harmonique, ce qui se traduit par un THD résiduel encore supérieur aux seuils recommandés.

Le filtre actif parallèle a démontré une capacité supérieure à compenser les harmoniques de manière globale et dynamique. Grâce à la commande PQ et à la modulation MLI, il a permis de ramener le THD à **5,51 %**

La solution hybride s'est révélée particulièrement avantageuse : en combinant les atouts des filtres passifs et actifs, elle permet de maintenir les performances du filtre actif tout en réduisant la puissance de compensation nécessaire. Cette approche répartit intelligemment les tâches de filtrage : les harmoniques dominantes sont traitées par le filtre passif, tandis que les harmoniques résiduelles et variables sont corrigées par le filtre actif. Le résultat final est un système plus efficace, plus stable, et économiquement mieux dimensionné.

Ainsi, l'étude confirme que la configuration hybride constitue une solution performante permettant d'améliorer la qualité de l'énergie dans les réseaux modernes soumis à des perturbations harmoniques importantes.

Chapitre III

**Etude et simulation
d'un filtre actif
multiniveau hybride**

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons faire l'étude d'un filtre actif de type NPC (Neutral Point Clamped) à cinq niveaux. Nous allons examiner les composants clés de ce filtre, à savoir la partie commande et puissance en utilisant la configuration du convertisseur DC/AC comme référence.

III.2 Les onduleurs multiniveaux :

L'origine de la conversion multiniveau peut être retracée jusqu'aux années 1960. La première configuration expliquée était le montage en série du pont H. C'est à la fin des années 1970 qu'est née la disposition du convertisseur à point neutre (NPC) [25], qui a ainsi introduit le premier convertisseur multiniveau destiné aux applications de puissance moyenne. Depuis, plusieurs recherches ont été réalisées pour analyser ses caractéristiques et les possibles mutations de cette structure. Au cours des années 1990, de nouvelles études ont abouti à l'élaboration des convertisseurs multicellulaires. [21]

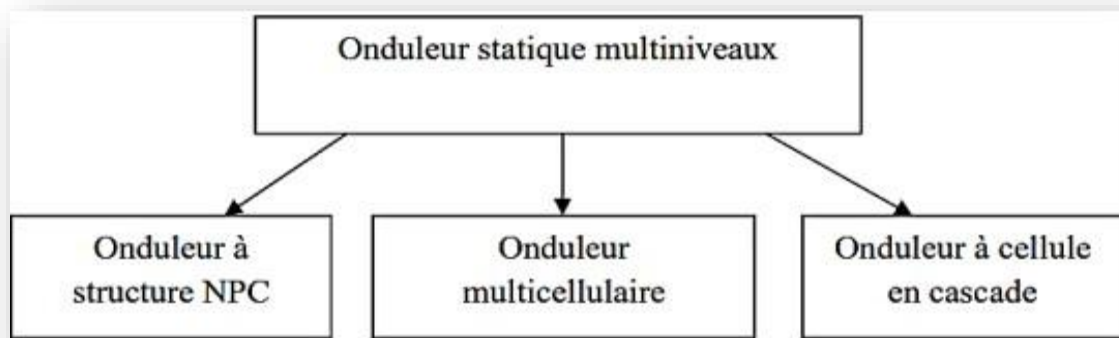


Figure III.1: Modèle de classification pour les convertisseurs à multi niveaux

III.2.1 Structure d'un FAPP utilisant un onduleur à cinq niveaux : [20]

L'onduleur à cinq niveaux se caractérise par sa capacité à générer une forme d'onde de tension comportant cinq niveaux distincts, à savoir : $(+V_{dc}, +V_{dc}/2, 0, -V_{dc}/2 \text{ et } -V_{dc})$. Cette richesse de niveaux permet une meilleure approximation de la sinusoïde, réduisant significativement les harmoniques et les contraintes électromagnétiques.

Les onduleurs à cinq niveaux sont constitués de plusieurs bras, chacun assurant une phase de la tension de sortie. Selon la topologie choisie, Parmi les topologies utilisées: le NPC à cinq niveaux, les condensateurs flottants (FC), ou les ponts en cascade (CHB).

Dans un filtre actif parallèle de puissance FAPP, cette structure permet :

- D'améliorer la qualité du courant injecté,
- La réduction du THD,
- D'avoir moins de contrainte en tension aboutissant à une meilleure fiabilité des composants,
- Une meilleure compatibilité avec les fortes puissances.

III.2.2 Intérêt de l'emploi des onduleurs multiniveaux:

Ils présentent des avantages énergétiques lors de la conversion multiniveau, parmi lesquels on peut citer :

- La génération de tensions proches de la forme sinusoïdale est nécessaire,
- La qualité du courant est améliorée par la diminution des harmoniques, ce qui permet d'avoir un courant de meilleure qualité,
- La partie contrôle/commande se distingue par sa grande souplesse, caractérisée par de nombreuses fonctionnalités,
- La stratégie de modulations permettant d'optimiser l'utilisation de ces convertisseurs,
- Pour certaines applications nécessitant un contrôle rapide du courant, la fréquence de commutation peut être élevée à faible puissance et pouvant atteindre plusieurs dizaines de kHz.

III.3 Quelques types d'onduleurs multiniveaux :

III.3.1 Onduleur de tension à diode de bouclage : [23] [22]

La topologie d'onduleur de tension multiniveaux la plus utilisée est la configuration NPC. Cette structure a été proposée en 1981 par A. Nabae et H. Akagi. Elle possède des interrupteurs en série et des diodes connectées au point milieu de la source de tension, ce qui protège les interrupteurs externes contre une tension excessive. Si les diodes conduisent, les interrupteurs du centre sont aussi protégés. Cependant, ces diodes augmentent le coût de ce type de topologie et créent un problème d'encombrement. La figure III.2 illustre la configuration d'un convertisseur triphasé à potentiel distribué. Dans cette configuration, les diodes servent à établir la connexion avec le point de référence 0. Néanmoins, l'utilisation de ces diodes entraîne une augmentation du coût de ce type de topologie et pose un problème d'encombrement.

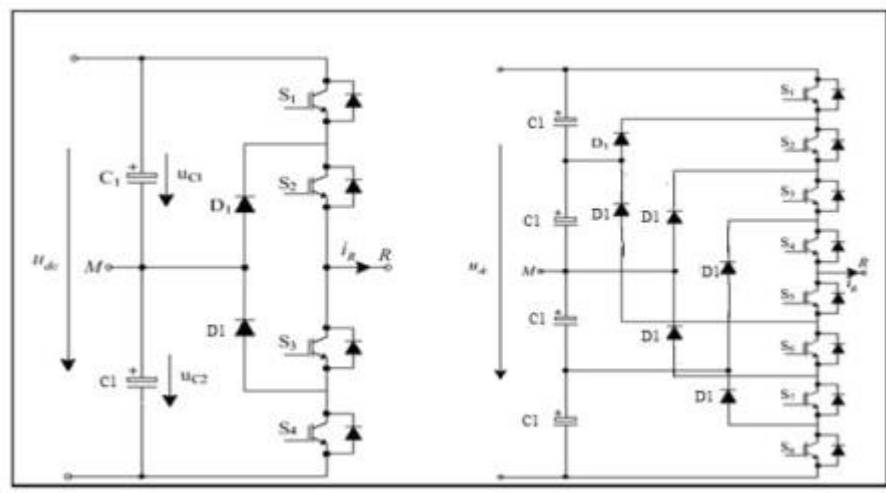


Figure III.2 : Structures d'onduleurs de catégorie NPC à trois et à cinq strates (phase A).

Cette configuration offre de nombreux avantages, dont quelques-uns sont listés ci-dessous :

- Les dispositifs de puissance semi-conducteurs ne bloquent une tension inverse que jusqu'à la moitié de la tension de la source DC,
- Toutes les phases utilisent le même bus continu,

- La fréquence fondamentale garantit une efficacité élevée,
- La technique de régulation est assez simple,
- Optimisation du profil de la tension de sortie avec un THD réduit.

III.3.2 Onduleur de tension à condensateur flotteur :

La topologie de l'onduleur multiniveaux à condensateur flotteur (Flying Capacitor Multilevel Inverter), représentée par la figure III.3 a été proposée en 1992. Cette topologie a l'avantage de résoudre le problème des diodes de bouclage qui est présent dans les topologies des onduleurs NPC multiniveaux. Cette topologie limite naturellement les contraintes en tension imposées aux composants de puissance. Cela se traduit par une faible valeur de dv/dt aux bornes des composants. Elle introduit aussi des états de commutation additionnels. Ces derniers peuvent être utilisés pour aider à maintenir l'équilibre des charges dans les condensateurs. La topologie de l'onduleur à condensateur flotteur possède assez d'états de commutation pour contrôler l'équilibre des charges dans chaque bras d'onduleur, quel que soit leur nombre de niveaux, ce qui n'est pas le cas dans l'onduleur NPC. Actuellement cette topologie semble présenter quelques inconvénients :

- Le contrôleur de la charge du condensateur ajoute de la complexité au contrôle du circuit entier,
- Le contrôleur de la charge du condensateur ajoute de la complexité au contrôle du circuit entier,
- La topologie de l'onduleur à condensateur flotteur à multi-niveaux peut nécessiter davantage de condensateurs que la topologie de l'onduleur NPC,
- De grands courants efficaces circuleront à travers ces condensateurs,
- Il existe un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés.

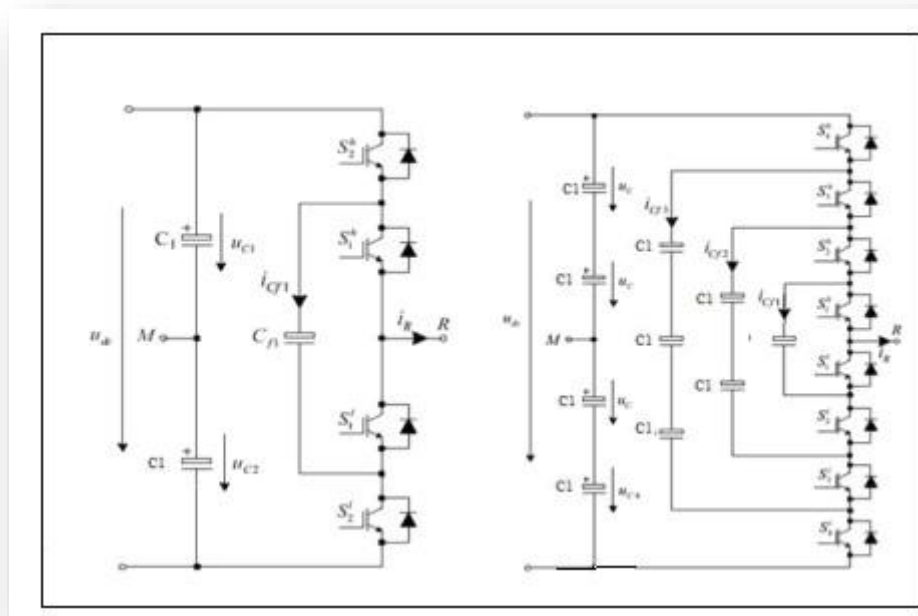


Figure III. 3 : Onduleurs à condensateurs flottants à trois et à cinq niveaux(phaseA)

III.3.3 Onduleur de tension en cascade :

L'une des premières utilisations des configurations en série des convertisseurs monophasés en pont pour les stabilisations de plasma remonte à 1988. Cette méthode modulaire a été élargie pour intégrer également les systèmes triphasés. Il est indéniable que les complications et le coût des sources indépendantes pour chaque pont ne sont pas un désavantage majeur, car ils sont compensés par les bénéfices de la construction modulaire. Le principal atout de cette méthode est que la configuration de ce genre d'onduleur simplifie l'entretien. De plus, elle offre une solution très pratique pour augmenter le nombre de niveaux dans le système. L'illustration de la figure III.4 présente un onduleur monophasé en cascade à cinqniveaux

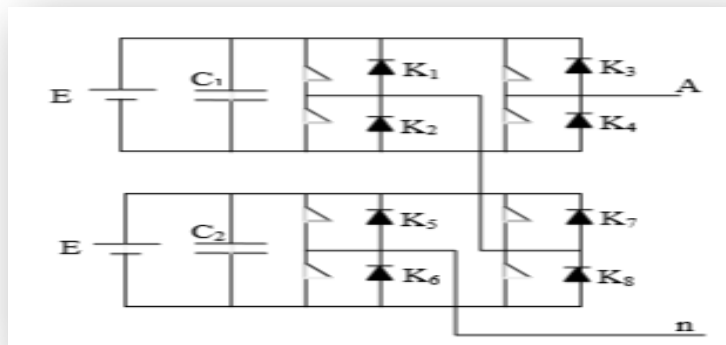


Figure III.4 : Onduleur en cas cade à 5niveaux (phaseA)

Les sorties des onduleurs en configuration de pont sont reliées en série de manière à ce que l'onde de tension synthétisée corresponde à la somme des tensions de sortie. La formule $m = 2s + 1$ détermine le nombre de niveaux de tension de sortie dans un onduleur en cascade, où « s » représente le nombre de sources de tension continue.

L'atout principal de cette méthode hybride est qu'il est possible d'augmenter le nombre de sorties sans avoir à intégrer de nouveaux éléments. Il suffit d'avoir des sources de courant continu à divers niveaux de tension. Il est à noter que la méthode des sources de tension avec deux niveaux distincts (E et $2E$), comme illustré dans la Figure III.5. Cette configuration peut produire une tension sur sept niveaux différents ($(0, +/-E, +/-2E, +/-3E)$).

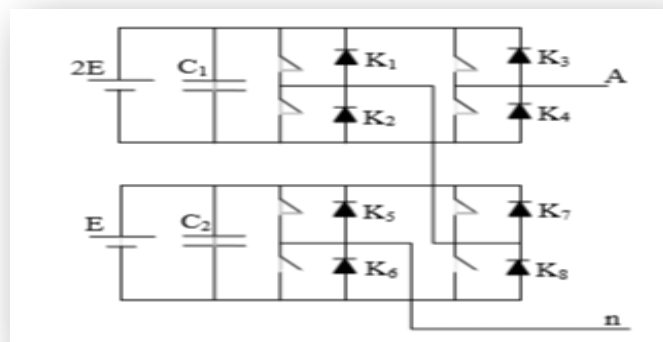


Figure III.5 : Onduleur en cascade à 7 niveaux

III.3.4 Autres topologies :

En plus des trois topologies fondamentales abordées précédemment, il existe également d'autres topologies à plusieurs niveaux. Cependant, la majorité de celles-ci sont basées sur des circuits « hybrides », qui sont des combinaisons de deux topologies de base ou des variations mineures de celles-ci:

- Hybridessymétriques,
- Avec des passerelles en cascade et sources CC/CC isolées,
- Multi-niveaux en cascade,
- Avec commutation douce,
- Reliés par transformateur,
- Convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : une variation de l'onduleur NPC,
- Convertisseur New Diode-Clamped : une autre version de l'onduleur NPC,
- Convertisseur généralisé à plusieurs niveaux.

III.4 Filtre actif de puissance à cinq niveaux : [24]

Nous avons employé un filtre actif de puissance de type NPC à cinq niveaux. Il s'agit d'un onduleur triphasé doté de trois bras et de quatre sources de tension en courant continu. Chaque bras est doté de huit interrupteurs et de deux diodes. Chaque interrupteur est constitué d'un transistor et d'une diode installée en tête-bêche.

L'illustration de la figure III.6 présente une représentation schématique d'un bras de cet onduleur.

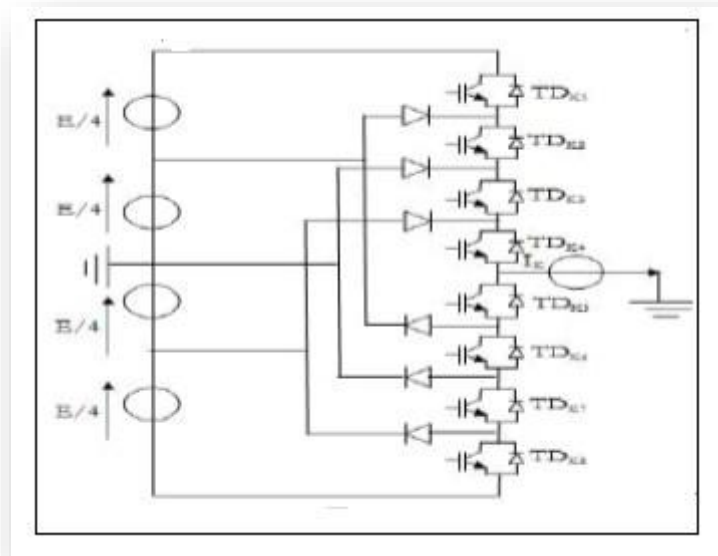


Figure III.6 : Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux

III.4.1 Différentes configurations d'un bras de l'onduleur NPC à cinq niveaux :

L'analyse topologique d'un bras nous permet de déterminer les cinq configurations possibles. Celles-ci servent à définir les séquences de fonctionnement de l'onduleur. En résumé, ces configurations définissent les différents états que peut prendre la tension simple (c'est-à-dire la tension entre le bras de l'onduleur et le point milieu fictif). Nous obtenons ainsi :

III.4.1.1 Première configuration {11110000} :

Les interrupteurs Sa1, Sa2, Sa3, Sa4 sont passants et Sa5, Sa6, Sa7, Sa8 sont bloqués, la valeur de tension simple Va0 est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = +E/2$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{sa5} = V_{sa6} = V_{sa7} = V_{sa8} = +E/4$$

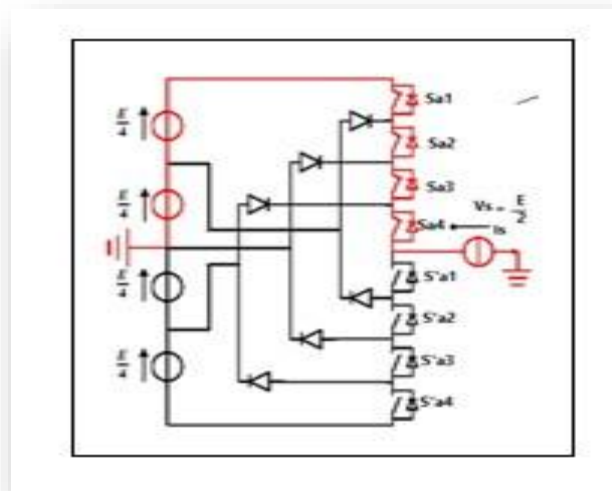


Figure III.7 : Configuration du bras

III.4.1.2 Deuxième configuration {01111000} :

Les interrupteurs Sa2, Sa3, Sa4, Sa5 sont passants et Sa6, Sa7, Sa8, Sa1 sont bloqués figure III.8, la valeur de tension simple Va0 est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = +E/4$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Sa1} = V_{ka6} = V_{Sa7} = V_{Sa8} = +E/4$$

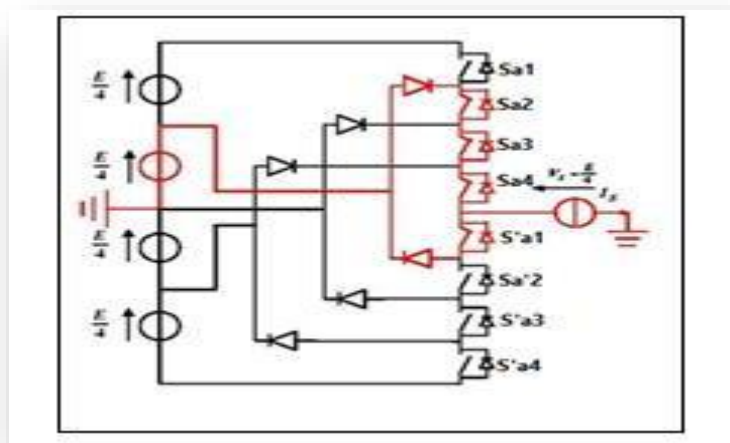


Figure III.8 : Configuration du bras

III.4.1.3 Troisième configuration {00111100} :

Les interrupteurs Sa3, Sa4, Sa5, Sa6 sont passants et Sa7, Sa8, Sa1, Sa2 sont bloqués figure III.9. la valeur de la tension simple Va0 est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = 0$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est:

$$V_{Sa1} = V_{Sa2} = V_{Sa7} = V_{Sa8} = +E/4$$

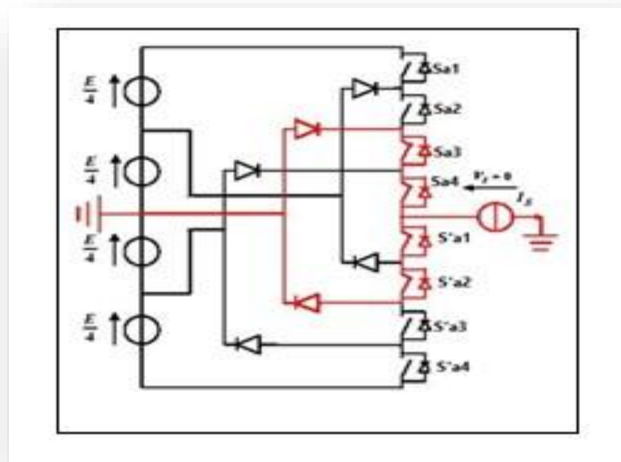


Figure III.9: Configuration du bras

III.4.1.4 Quatrième configuration {00011110} :

Les interrupteurs Sa4, Sa5, Sa6, Sa7 sont passants et Sa8, Sa1, Sa2, Sa3 sont bloqués.

La valeur de tension simple Va0 est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = -E/4$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Sa1} = V_{Sa2} = V_{Sa3} = V_{Sa8} = +E/4$$

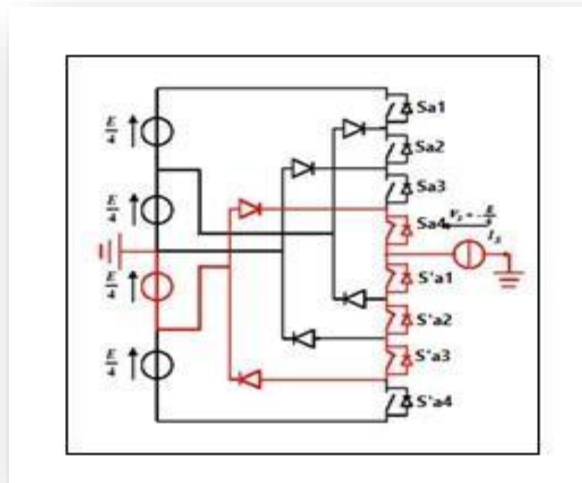


Figure III.10 : Configuration du bras

III.4.1.5 Cinquième configuration {00001111} :

Les interrupteurs Sa5, Sa6, Sa7, Sa8 sont passants et Sa1, Sa2, Sa3, Sa4 sont bloqués.

La valeur de tension simple V_{a0} est donnée par l'équation suivante :

$$V_{a0} = -E/2$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Sa1} = V_{Sa2} = V_{Sa3} = V_{Sa4} = +E/4$$

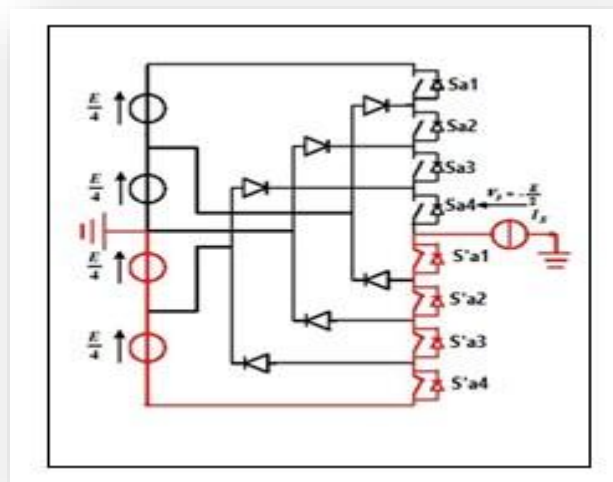


Figure III.11: Configuration du bras

D'après ce que nous venons de voir, nous pouvons ainsi obtenir les états des interrupteurs pour un bras d'onduleur à structure NPC à cinq niveaux, regrouper dans le tableau suivant:

Tableau III.1: Table de commutation de l'onduleur NPC à 5 niveaux.

Etatdesinterrupteurs								Tensionde sortie V_{a0}
Sa ₁	Sa ₂	Sa ₃	Sa ₄	Sa ₅	Sa ₆	Sa ₇	Sa ₈	
1	1	1	1	0	0	0	0	E/2
0	1	1	1	1	0	0	0	E/4
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	-E/2
0	0	0	0	1	1	1	1	-E/4

De ce tableau nous pouvons obtenir la figure suivante :

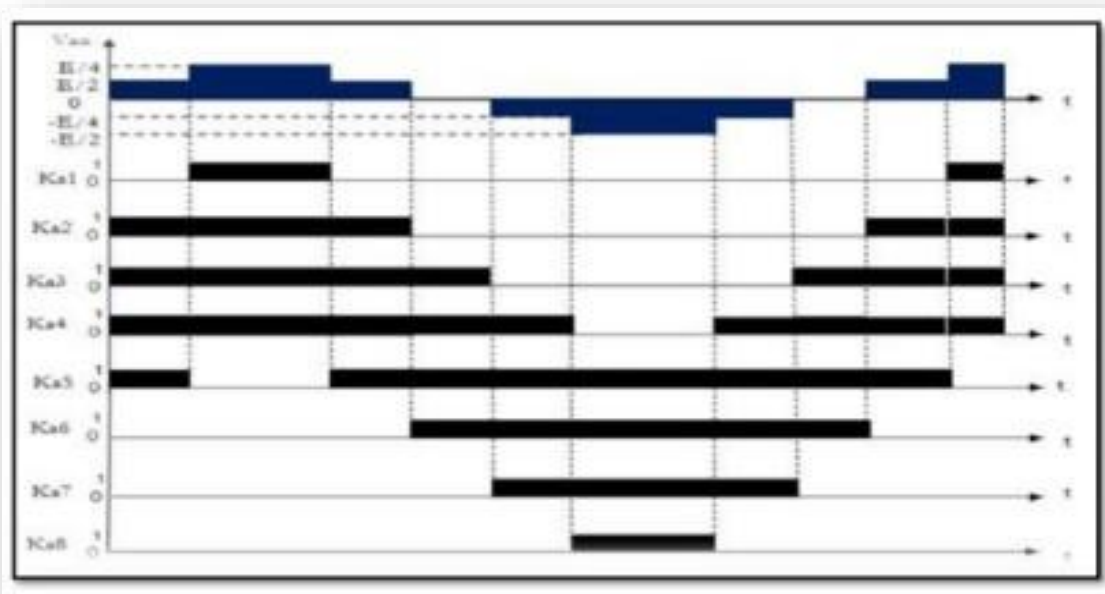


Figure III.12 : Forme d'onde de la tension de sortie d'un bras d'onduleur à cinq niveaux de type NPC

III.5 Commande MLI de l'onduleur NPC :

La technique de modulation par largeur d'impulsions (MLI) utilisée pour l'onduleur NPC est identique à celle employée pour l'onduleur FC. Cette méthode repose sur la mise en parallèle du signal de référence de courant avec une double onde porteuse à haute fréquence, connue sous le nom de modulation sinusoïdale à double triangle. Lorsque le signal de référence dépasse l'onde porteuse du signal triangulaire, les deux commutateurs S1a et S1b se mettent en marche, alors que les autres commutateurs S1e et S1f s'éteignent.

Les figures suivantes montrent la commande MLI de l'onduleur NPC et les signaux correspondant.

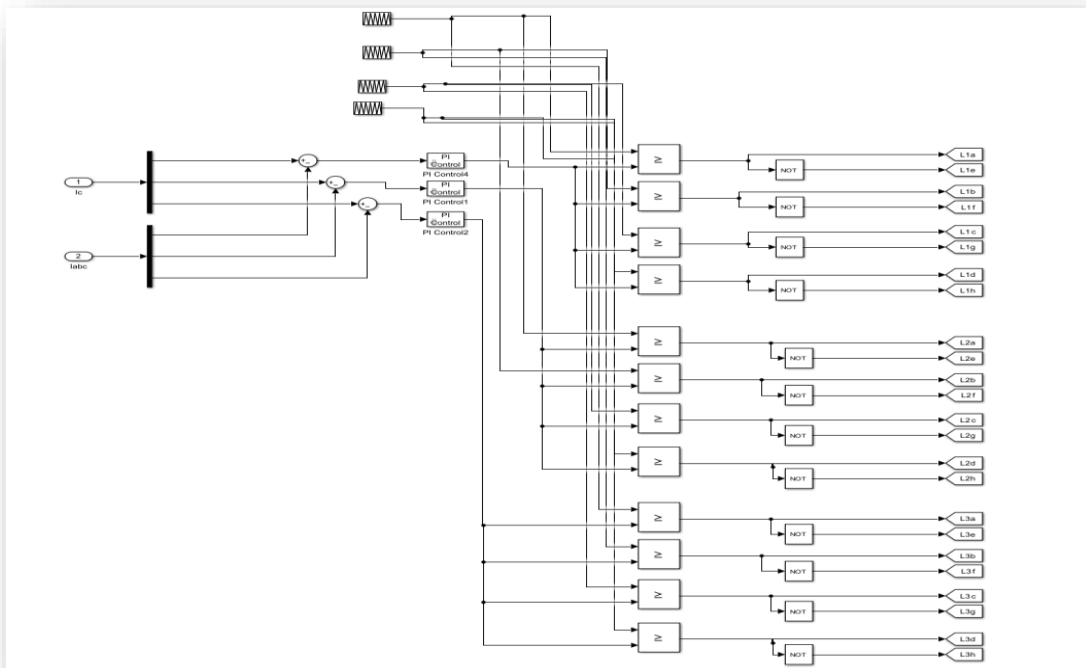


Figure II.13 : Commande MLI du NPC

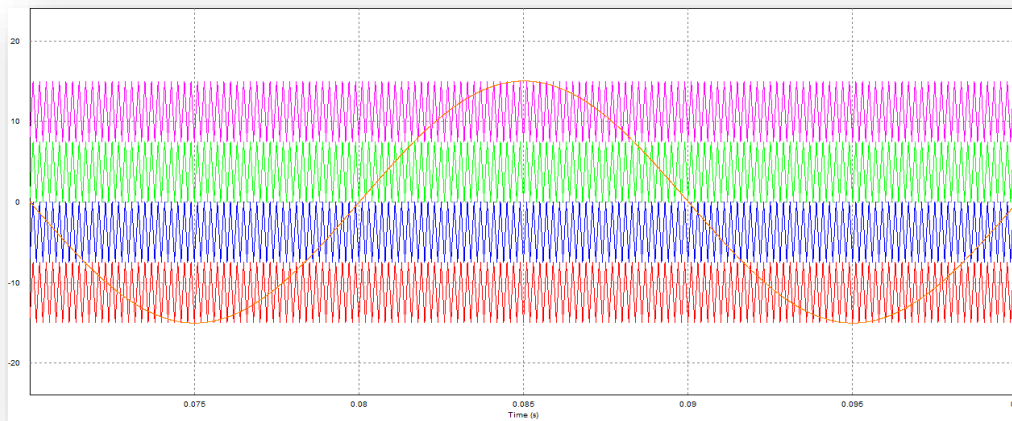


Figure III.14 : Signaux de MLI-sinusoidale multi porteuses de l'onduleur NPC.

III.6 Simulation de notre système avec un FAP parallèle et interprétations des résultats:

III.6.1. Simulation de filtre actif de type NPC 5 niveaux :

Maintenant nous allons présenter les résultats de simulation d'un filtre actif parallèle à cinq niveaux connecté en parallèle au réseau électrique triphasé. Et nous utiliserons une stratégie de commande de type p-q :

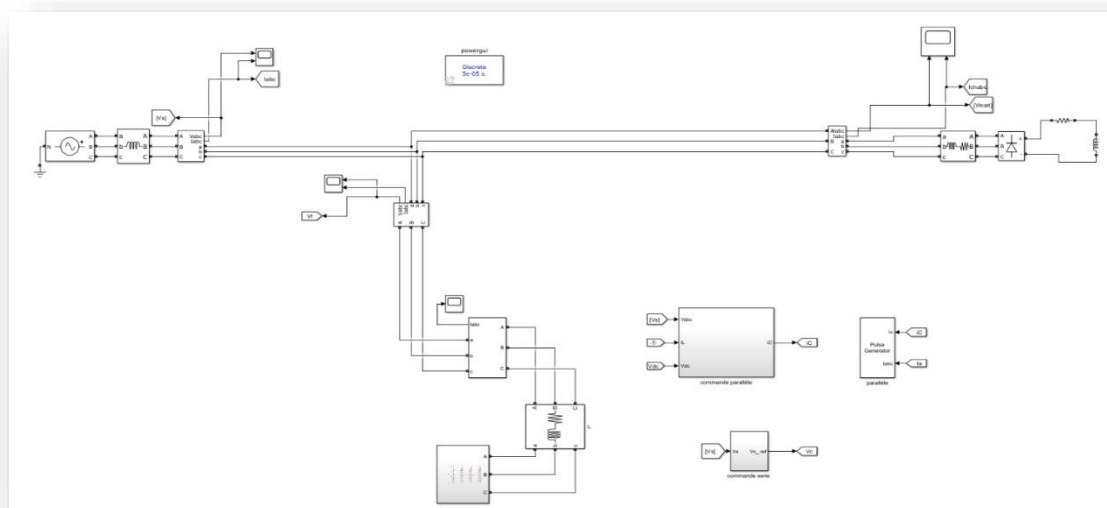


Figure III.15 : Modèle de simulation à étudié.

Le tableau suivant présente les paramètres de ce réseau électrique :

Tableau III. 2 : Paramètres de simulation pour ce système

$V_s(V)$	$F(Hz)$	$L_c(H)$	$R_c(\Omega)$	$L_p(H)$	$R_p(\Omega)$	$C(F)$
$5.5 \cdot 10^3$	50	10^{-3}	30	$6.9 \cdot 10^{-3}$	0.1	$1200 \cdot 10^{-6}$

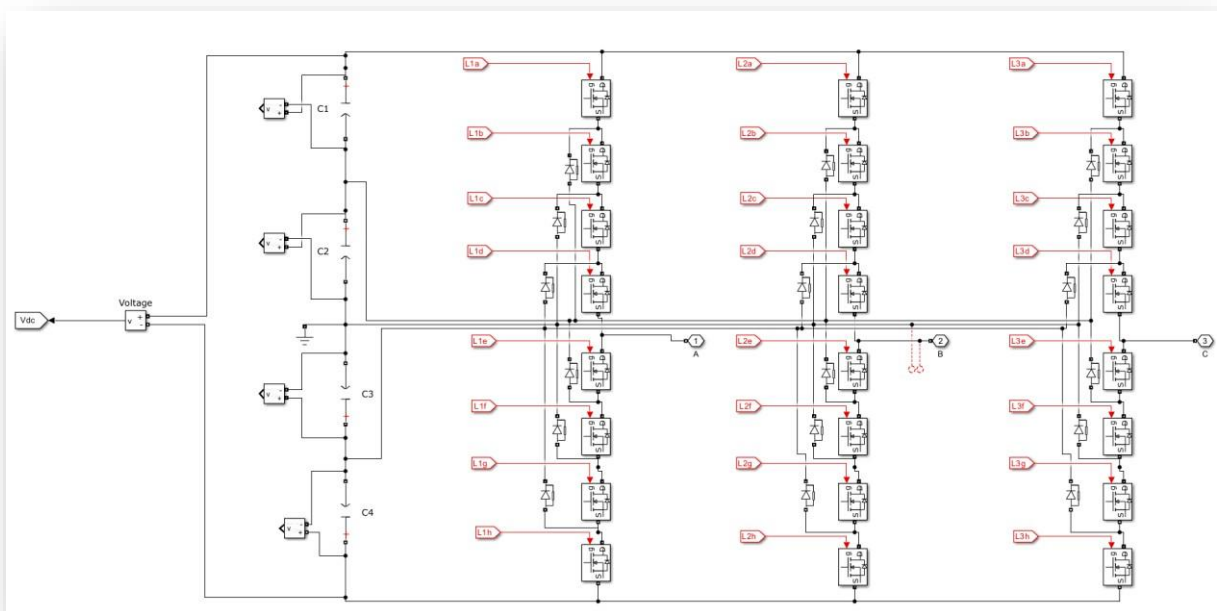


Figure III.16 : Onduleur type npc 5 niveaux

III.6.1.1 Résultats :

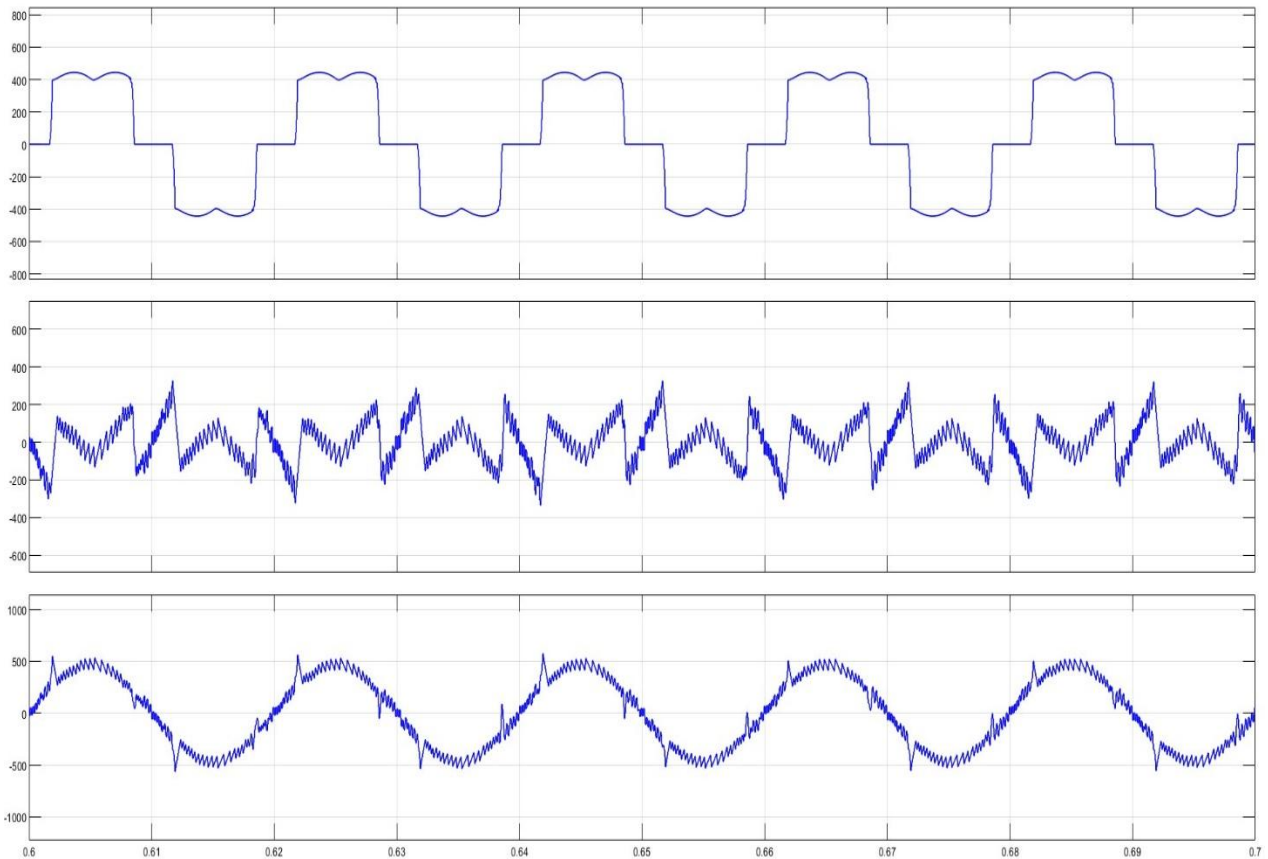


Figure III.17 : Allures de courant de source et de charge et de filtre

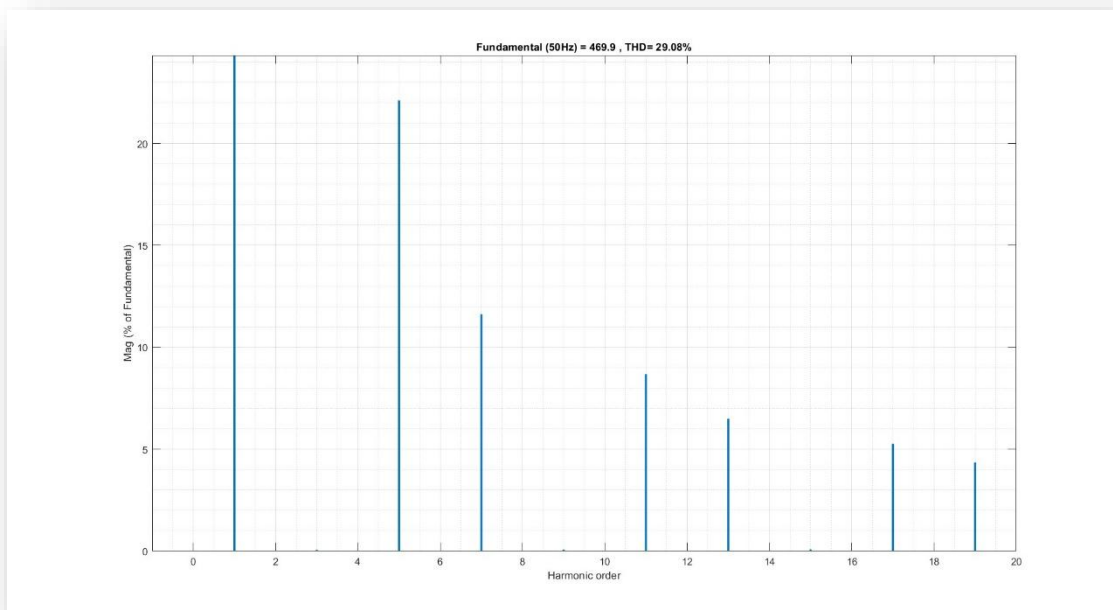


Figure III.18: THD du courant de charge

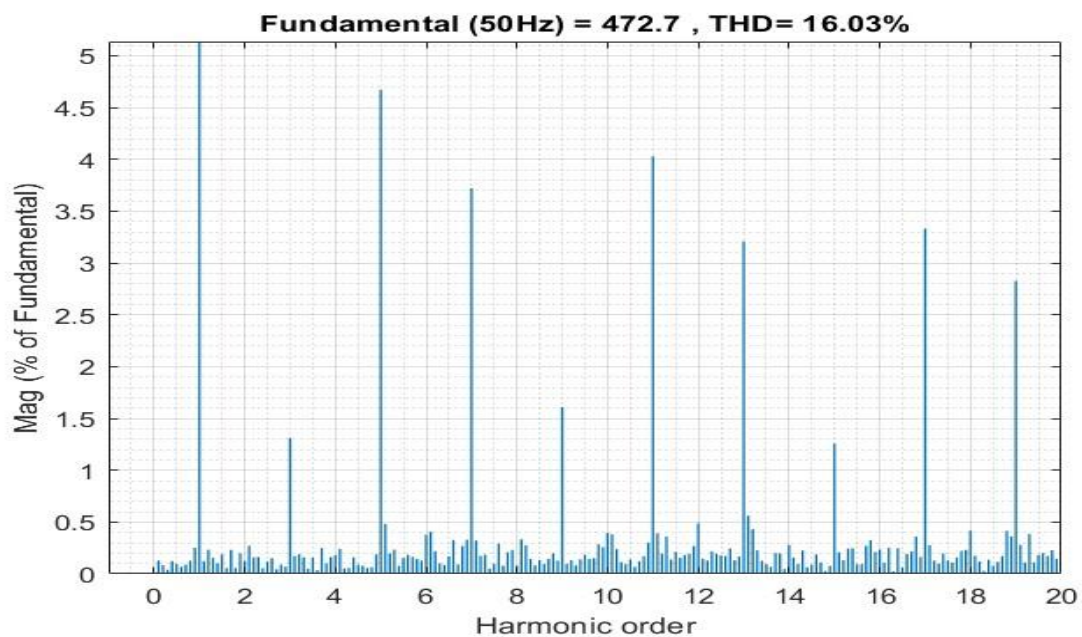


Figure III.19 : THD du courant de source

III.6.1.2 Interprétation des résultats:

Les résultats de simulation du filtre actif parallèle multiniveaux de type NPC à cinq niveaux montrent clairement l'efficacité du dispositif dans la réduction des distorsions harmoniques. Les figures III.18 et III.19 présentent respectivement les spectres harmoniques du courant de charge avant filtrage et du courant de source après filtrage.

Avant compensation, le courant de charge présente un THD élevé, atteignant **29,08%**, ce qui met en évidence la forte non-linéarité de la charge. Après l'action du filtre actif NPC, le THD du courant de source est ramené à **16,03 %**, ce qui constitue une réduction significative et confirme le bon fonctionnement du système de compensation.

Les formes d'ondes observées montrent également que le courant de source devient nettement plus sinusoïdal après filtrage, tandis que les composantes harmoniques indésirables sont fortement atténuées. Les résultats démontrent donc que le filtre actif NPC à cinq niveaux permet d'améliorer efficacement la qualité du courant injecté dans le réseau.

III. 6.2. Simulation du filter Hybride:

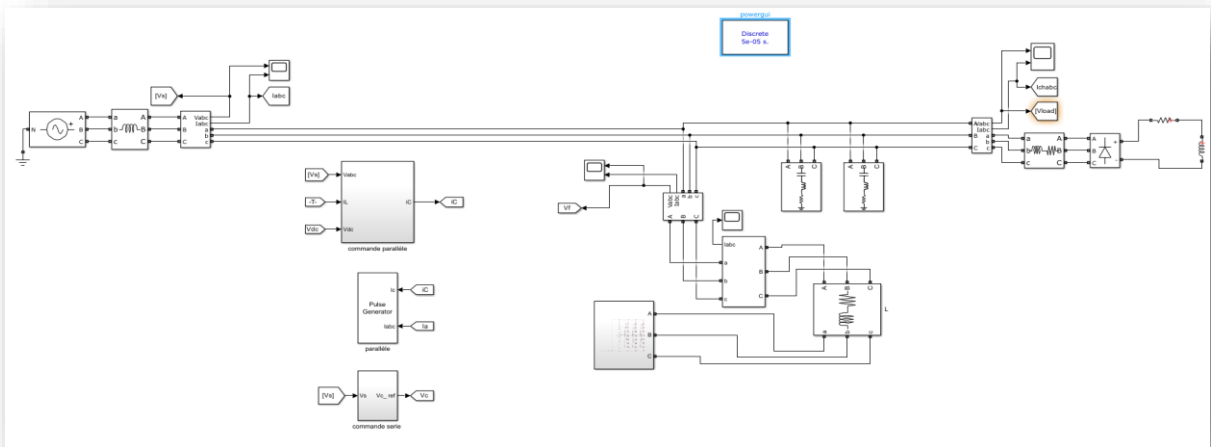


Figure III.20 : Modèle de simulation à étudié

Le tableau suivant présente les paramètres de ce réseau électrique:

Tableau III.3: Paramètres de simulation pour ce système

charge		FAP			FP				Source	
Lc(H)	Rc(Ω)	Lp(H)	Rp(Ω)	C (F)	Puissance réactif nominal	Fréquences harmonique		facteur de qualité	Vs (V)	F (Hz)
10^{-3}	30	$5 \cdot 10^{-3}$	0.1	$1000 \cdot 10^{-6}$	$0.9 \cdot 10^6$	Fr1= 5*50	Fr2= 7*50	16	$5.5 \cdot 10^3$	50

III.6.2.1. Résultats simulations:

a. 1^{er} Cas : FAP+FP_5 :

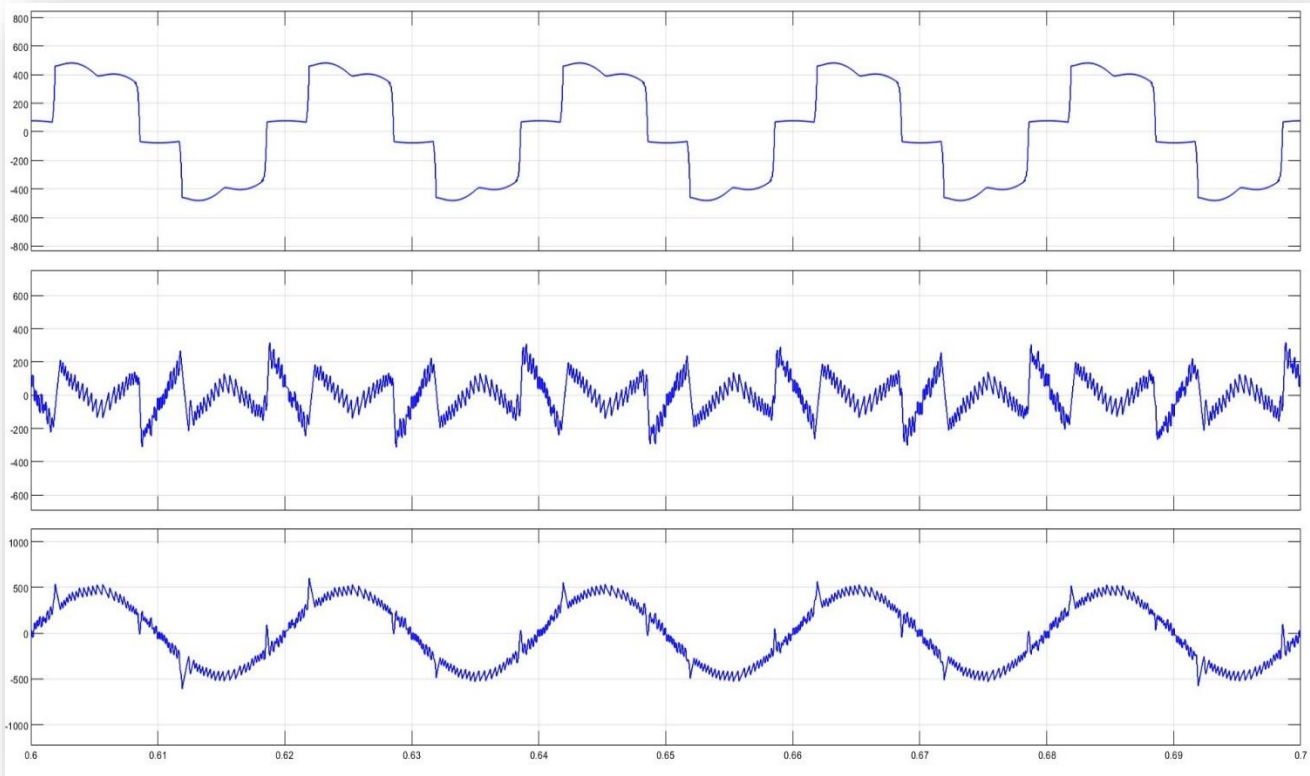


Figure III.21 : Allures de courant de source et de charge et de filtre

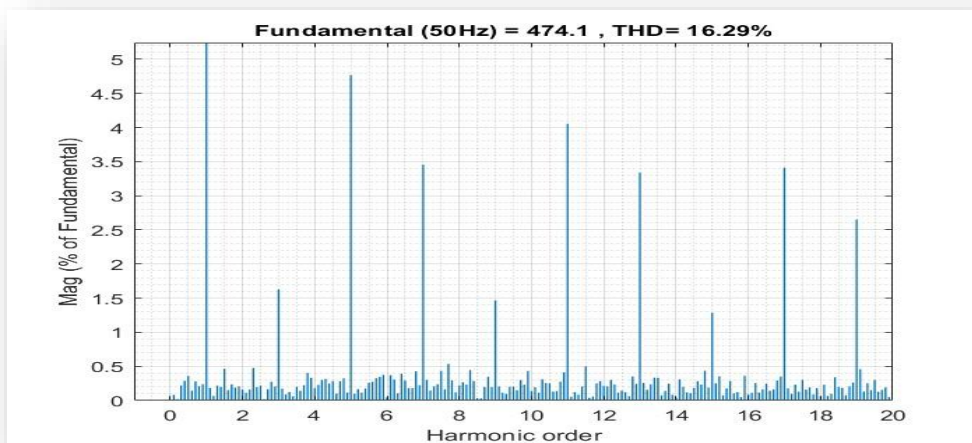


Figure III.22 : THD du courant de source

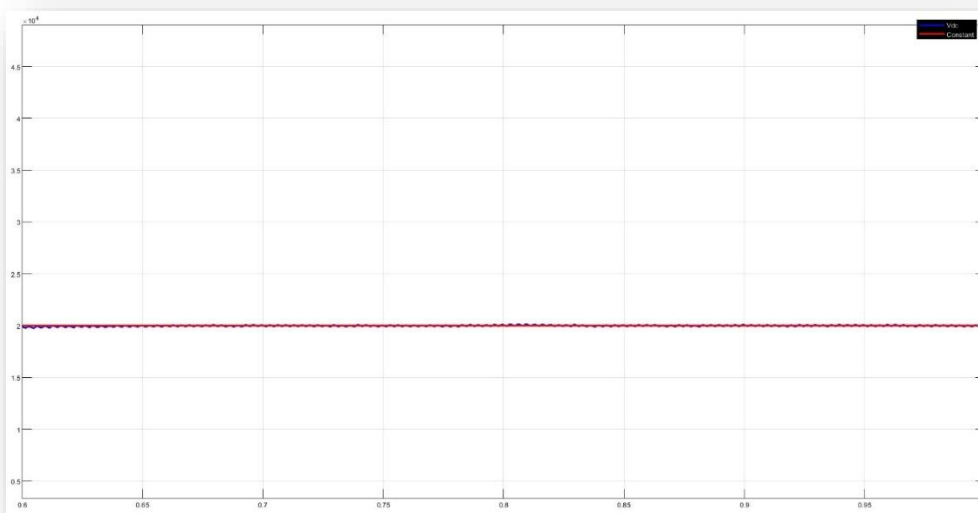


Figure III.23 tension aux bornes du condensateur

b. 2^{eme} Cas : FAP+FP_7 :

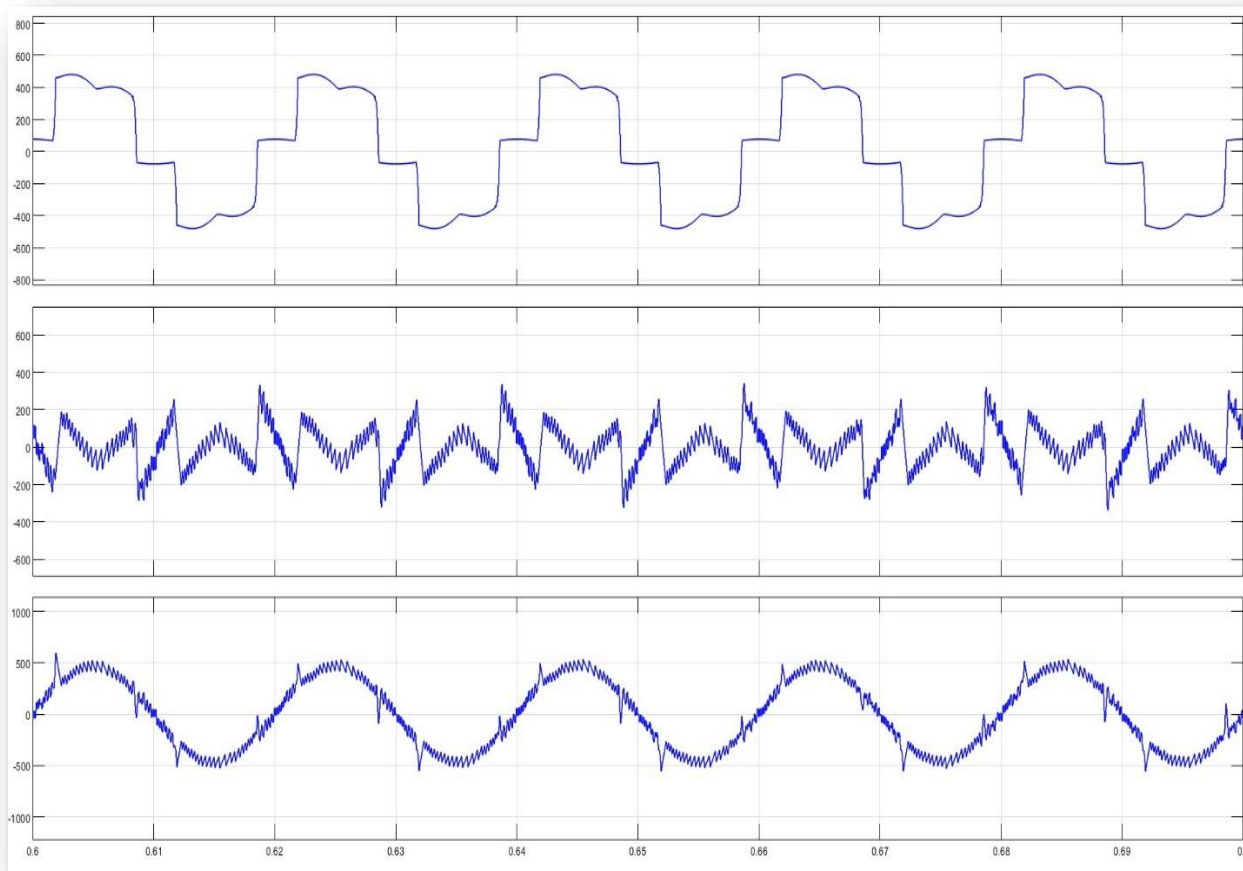


Figure III.24 : Allures de courant de source et de charge et de filtre

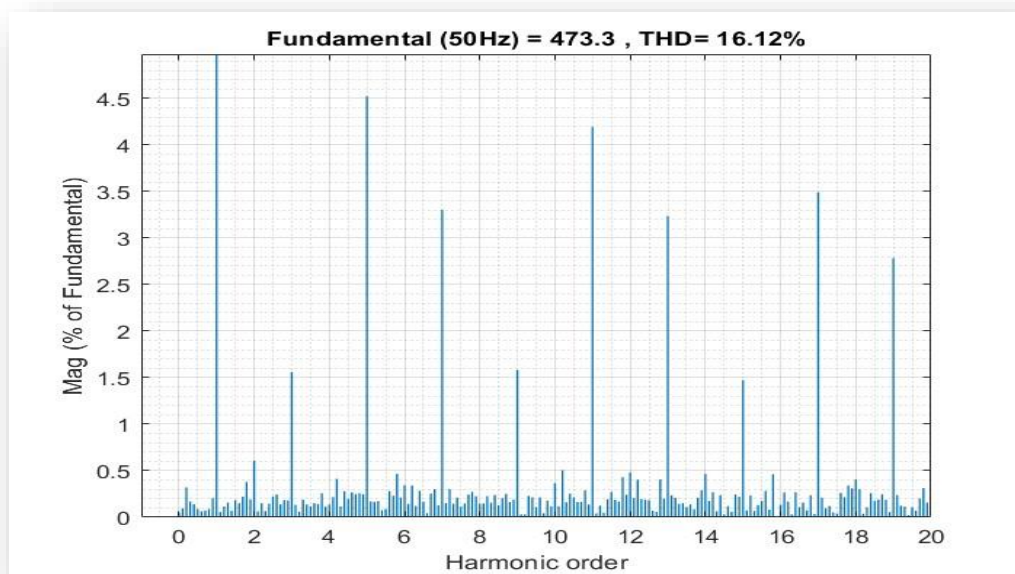


Figure III.25 : THD du courant de source

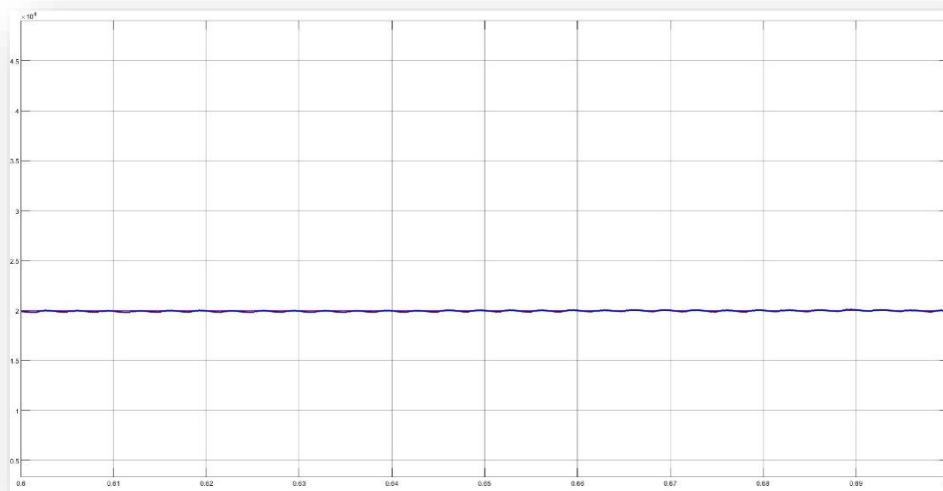


Figure III.26 : tension aux bornes du condensateur

c. 3^{eme} Cas : FAP+FP_5 +FP_7

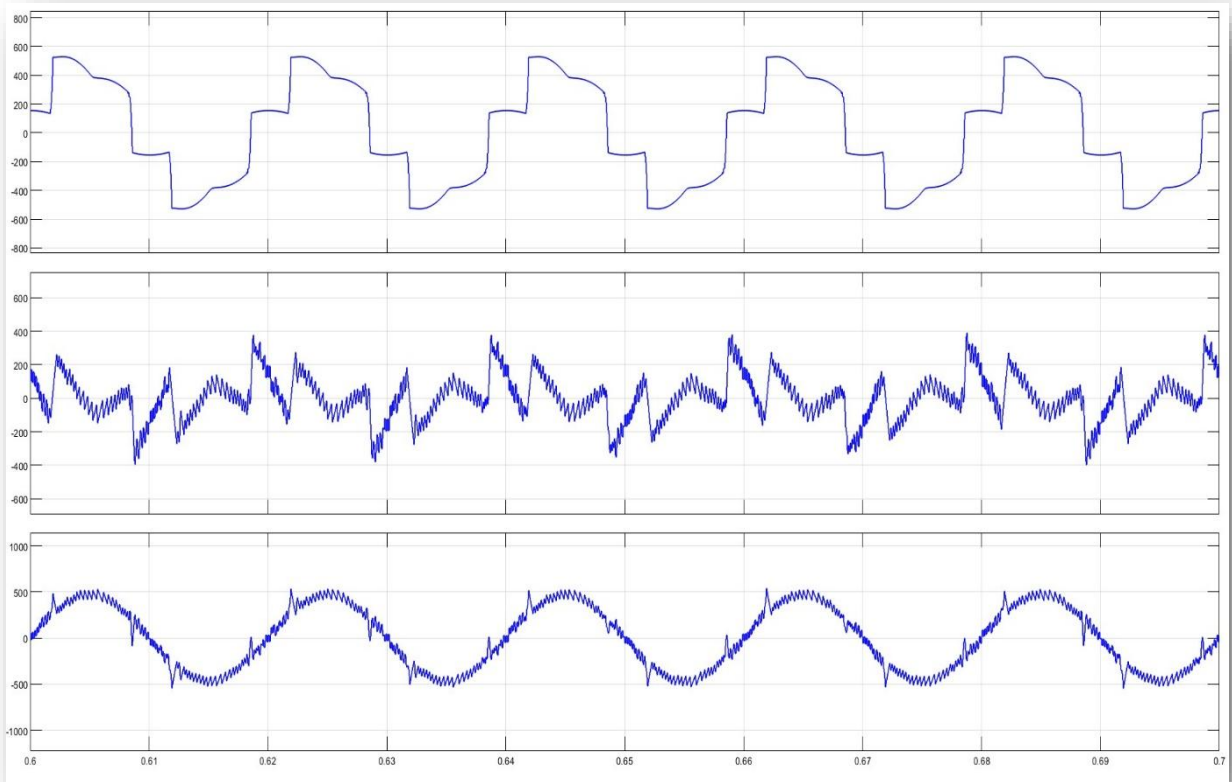


Figure III.27 : Allures de courant de source et de charge et de filtre

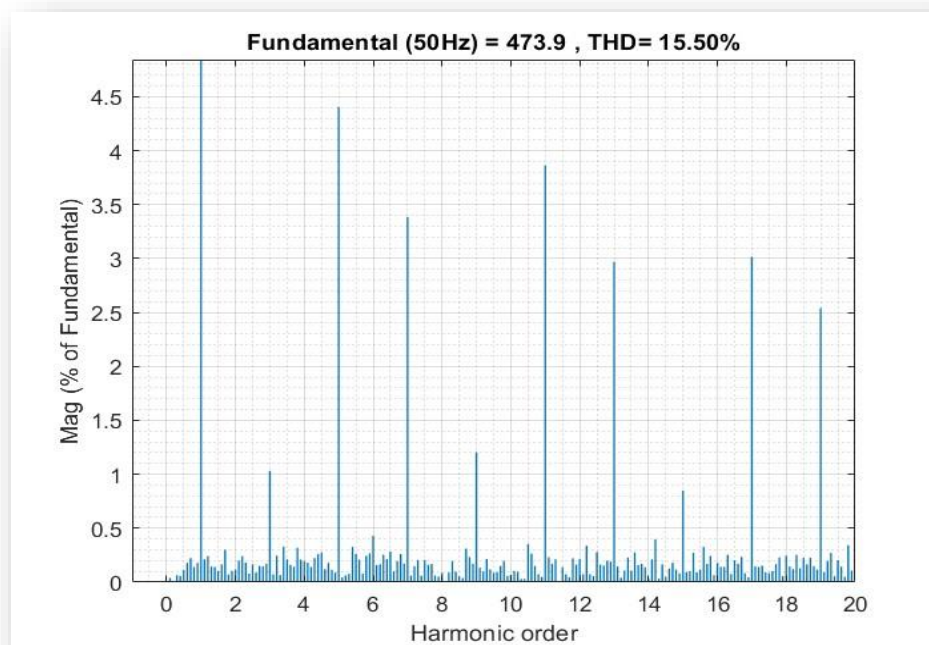


Figure III.28 : THD du courant de source

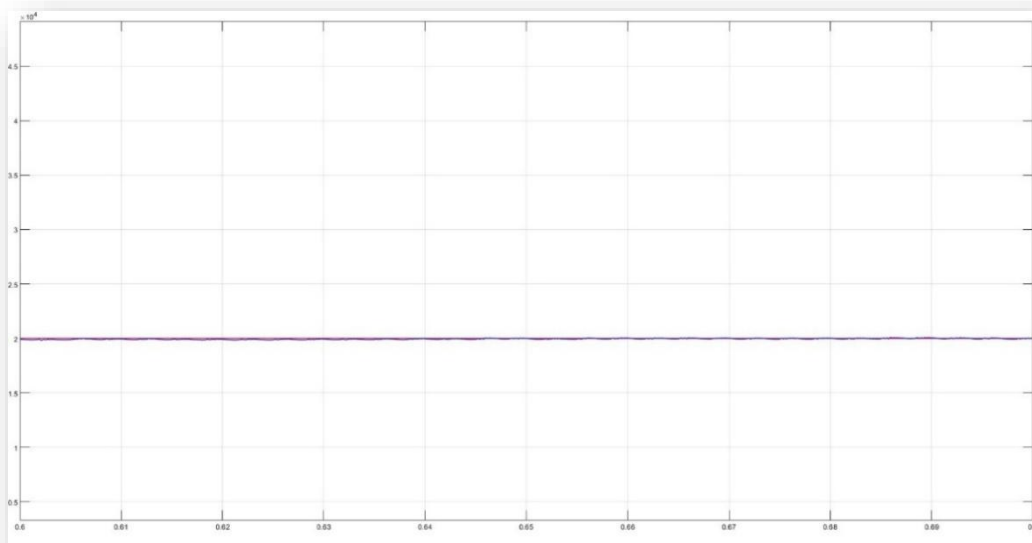


Figure III.29 : tension aux bornes du condensateur

III.6.2.2 Interprétation des résultats:

L'association du filtre passif avec le filtre actif NPC permet d'obtenir de meilleures performances de compensation harmonique que l'utilisation individuelle de chaque structure. Le filtre passif traite en priorité les harmoniques dominantes ciblées (5^{ème} et 7^{ème} ordre), tandis que le filtre actif élimine les harmoniques résiduelles et assure une compensation dynamique.

Les résultats montrent que le THD du courant source, initialement de **29,08 %**, est atteint la valeur de **15,50 %** lorsque le système hybride associe (FAP + FP5 + FP7). Les formes d'ondes des signaux des courants ainsi obtenues mettent également en évidence une amélioration nette de la sinusoïdalité du courant source, ainsi qu'une stabilité de la tension au niveau du point de couplage.

Le Tableau III.4 présente l'étude comparative entre filter actif type NPC et filter actif type NPC hybride :

Tableau III.4: Etude comparative entre utilisation de Filtres passifs & Filtre actif type NPC & Filtres actif type NPC hybride

		Sans Filtres	Filter Passif FP5	Filter Passif FP7	Filter Passif FP5+FP7	Avec FAP	Avec FAP+FP5	Avec FAP+FP7	Avec FAP+FP5+FP7
$C = 1200(\mu F)$	T	29.08	28.85	28.88	27.93	18.77	18.71	18.72	18.46
$R_l = 30 (\Omega)$	H								
$L_l = 1 (mH)$	D								
$C = 1000(\mu F)$	T	29.08	28.85	28.88	27.93	16.03	16.29	16.12	15.50
$R_l = 0.1 (\Omega)$	H								
$L_l = 7.2 (mH)$	D								

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons analysé et simulé le fonctionnement d'un filtre actif parallèle basé sur un onduleur NPC à cinq niveaux. L'étude des différentes topologies multiniveaux a permis de souligner les atouts majeurs de ces structures, notamment la diminution des contraintes en tension, la réduction des harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

Les simulations ont démontré que le filtre actif NPC à cinq niveaux offre de bonnes performances grâce à sa capacité à générer une tension de sortie plus proche de la sinusoïde, ce qui réduit efficacement la distorsion harmonique. L'intégration d'une commande MLI et d'un contrôle par théorie p-q a permis d'obtenir un courant de source significativement amélioré.

De plus, l'utilisation d'un filtre hybride combinant un filtre passif et un filtre actif NPC a montré une amélioration encore plus marquée, avec amélioration des valeurs du THD. Cette structure hybride constitue ainsi une solution adaptée pour les réseaux modernes confrontés à des charges non linéaires et aux exigences croissantes en matière de qualité de l'énergie.

Ces résultats confirment l'intérêt des structures multiniveaux pour les applications industrielles et ouvrent la voie à une optimisation future des architectures de filtrage harmonique.

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce projet de fin d'étude, nous avons analysé, modélisé et simulé un filtre actif de puissance parallèle à cinq niveaux de type hybride, destiné à améliorer la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux à forte distorsion harmonique. Ce filtre, combinant les avantages des structures multiniveaux et des techniques de compensation active, a démontré une capacité accrue à réduire les courants harmoniques et à compenser la puissance réactive de manière efficace.

L'architecture à cinq niveaux offre une meilleure qualité de tension de sortie, réduit les contraintes sur les composants de commutation, et permet un meilleur contrôle de la forme d'onde injectée dans le réseau. L'approche hybride, associant filtrage actif et passif, a permis de concilier performance, stabilité, et coût de mise en œuvre réduit.

Les simulations réalisées sous environnement MATLAB/Simulink, ont validé les performances du système, avec un THD réduit à des niveaux conformes aux normes internationales. Le contrôle associé à une stratégie de modulation MLI, a montré une dynamique de réponse rapide.

En conclusion, le filtre actif hybride à cinq niveaux représente une solution performante et prometteuse pour la compensation harmonique et l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les systèmes électriques modernes. Des perspectives d'amélioration incluent l'optimisation des algorithmes de commande, l'intégration de l'intelligence artificielle pour l'adaptation dynamique aux conditions du réseau, ainsi que la validation expérimentale en environnement réel.

La première partie nous a permis d'introduire et de clarifier les concepts essentiels relatifs aux filtres de puissance, en particulier les filtres passifs, actifs et hybrides. Il ressort de cette étude que les filtres hybrides constituent une solution pertinente, en combinant les avantages des technologies passives et actives. Ils offrent un bon compromis entre efficacité, flexibilité et coût, ce qui les rend particulièrement adaptés aux réseaux électriques modernes exigeant une qualité d'énergie élevée.

La deuxième partie, a intégré la présentation des onduleurs multiniveaux et leur méthode de commande, en donnant des performances très appréciable.

En dernier lieux, les topologies d'onduleurs à cinq niveaux les plus courantes ont été présenté, suivie d'une série de simulation intégrant la technique des commandes instantané des puissances active et réactive PQ, aboutissant à des résultats très appréciable.

En résumé, nous avons pu validé une étude avec simulation d'un FAP parallèle basé sur une structure hybride à cinq niveaux. Ce FAPP a permis à compenser les harmoniques de courant générés par les charges non linéaires, tout en améliorant la qualité de l'énergie injectée dans le réseau électrique.

La topologie hybride étudiée a combiné les avantages des onduleurs multi-niveaux avec une commande de type MLI et une stratégie de régulation en courant, Grâce à cette combinaison, le filtre actif est capable de générer une tension de compensation proche de la sinusoïde, tout en réduisant considérablement le THD du courant source.

Cette association de filtre actif multiniveau avec des filtres passif présente des avantages principalement au niveau du dimensionnement des équipements où il est clair que l'atout majeur étant la réduction des coûts.

En perspective, il serait intéressant d'améliorer les performances de cette configuration hybride en améliorant les performances des filtres passif et actif pour pouvoir avoir de meilleurs THDs inférieur à 5%.

الملخص

يركز هذا البحث على تحسين جودة الطاقة الكهربائية من خلال تعويض التوافقيات في الشبكات ثلاثية الأطوار. في البداية، تم إجراء دراسة نظرية لتحليل أسباب وتأثيرات وعواقب الاضطرابات التوافقية على المعدات الكهربائية، وكذلك المعايير السارية.

بعد ذلك، تمت دراسة تقنيات ترشيح مختلفة، بما في ذلك المرشحات السلبية، والمرشحات النشطة المتوازية، والمرشحات الهجينة. باستخدام محاكاة MATLAB/Simulink، قمنا بتقييم أداء كل تكوين من حيث تقليل معدل التشويه التوافقي الكلي (THD).

أخيراً، تم تخصيص دراسة متعمقة للمرشحات النشطة من نوع NPC ذات المستويات الخمسة. تم تحليل الهيكل، والتحكم، والسلوك الديناميكي لهذه المرشحات، ثم تم التحقق من صحتها عبر نتائج المحاكاة، مما أظهر تحسناً كبيراً في جودة التيار الذي يتم ضخه في الشبكة.

(عربي) الكلمات المفتاحية: جودة الطاقة الكهربائية; توافقيات; مرشحات NPC ذات المستويات الخمسة; الشبكات ثلاثية الأطوار

Résumé

Ce mémoire porte sur l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique par la compensation des harmoniques dans les réseaux triphasés. Dans un premier temps, une étude théorique a été menée pour analyser les causes, les effets et les conséquences des perturbations harmoniques sur les équipements électriques, ainsi que les normes en vigueur.

Ensuite, différentes techniques de filtrage ont été étudiées, notamment les filtres passifs, les filtres actifs de puissance parallèles, ainsi que les filtres hybrides. À l'aide de simulations sous MATLAB/Simulink, nous avons évalué les performances de chaque configuration en termes de réduction du taux de distorsion harmonique (THD). Enfin, une étude approfondie a été consacrée aux filtres actifs de type NPC à cinq niveaux. La structure, la commande et le comportement dynamique de ces filtres ont été analysés, puis validés par des résultats de simulation, montrant une nette amélioration de la qualité du courant injecté dans le réseau.

Mots clés : Qualité de l'énergie électrique; Harmoniques ; Filtres NPC à cinq niveaux ; Réseaux triphasés.

Abstract

This thesis focuses on improving the quality of electrical energy by compensating harmonics in three-phase networks. First, a theoretical study was conducted to analyze the causes, effects, and consequences of harmonic disturbances on electrical equipment, as well as the current standards.

Next, different filtering techniques were studied, including passive filters, parallel active power filters, and hybrid filters. Using MATLAB/Simulink simulations, we evaluated the performance of each configuration in terms of reducing the total harmonic distortion (THD). Finally, an in-depth study was dedicated to five-level NPC type active filters. The structure, control, and dynamic behavior of these filters were analyzed and then validated by simulation results, showing a significant improvement in the quality of the current injected into the network.

Keywords (English): Power quality ; Harmonics ; Five-level NPC filters ; • Three-phase networks