



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie
Département de Génie électrique
MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Machine électrique

Présenté par :

- 1. Ghezoula Abdenaceur**
- 2. Bouskaya Zine eddine**

Intitulé :

Etude de la Commande Directe de Puissance d'un Filtre Actif Parallèle

Soutenue le : 28/05/2025

Devant le jury composé de :

Dr : Touil Slimane

Président

Dr : Azza Abdelaziz

Examineur

Dr : Mahni Tidjani

Encadreur

Année académique : 2024/2025

Remerciement

*Notre premier Remerciement va à Allah
Soubhanhou Watahala.*

*Nous tenions à remercier vivement notre
encadreur, Dr "Mahni Tidjani",*

*pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa
contribution générale à l'élaboration de
ce travail. Nous souhaiterons également
remercier nos enseignants de la faculté de
la technologie Enfin, nous adressons nos
plus sincères remerciements à tous nos
proches et amis qui nous ont toujours
soutenu et encouragé pour la réalisation
de ce mémoire*

Dédicace

Avant tout, nous tenons à remercier le Bon Dieu, l'Unique, qui nous offre le courage et la volonté nécessaires pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce travail :

À mon père

À ma mère

À mes frères et mes sœurs

ملخص

تعالج هذه الدراسة الشاملة مشكلة في الشبكات الكهربائية، والذي يُعد من أهم التحديات في أنظمة الطاقة الحديثة. تتسبب الأجهزة الإلكترونية غير الخطية، مثل المقومات والمحولات، في تشويه شكل التيار والجهد، مما يؤدي إلى اضطرابات عديدة كالتذبذب، الهبوط المفاجئ في التوتر، تغير التردد، وعدم توازن الأطوار. تؤثر هذه التشوهات سلباً على كفاءة الشبكة وتتسبب في تسخين المعدات، ضعف عامل القدرة، وتشويش أجهزة القياس والتحكم ولمعالجة هذه المشاكل، تم التركيز على الفلاتر النشطة، وخصوصاً الفلتر النشط المتوازي، الذي يتميز بقدرته على توليد تيار يعاكس التيارات التوافقية الناتجة عن الحمل، مما يؤدي إلى تيار مصدر نقي شبه جيبي يتكون هذا الفلتر من جزأين رئيسيين: جزء طاقتوي يشمل العاكس والمكونات الإلكترونية، وجزء تحكمي يعتمد على تقنيات تحديد التيار المرجعي وتوليد إشارات القيادة. وقد تم استخدام تقنية التحكم المباشر في القدرة (DPC)، التي تتحكم مباشرة في القدرة الفعالة والتفاعلية بدون الحاجة لدوائر تحكم معقدة أو تعديل نبضي، معتمدة على جداول تبديل حسب موقع زاوية التوتر وأخطاء القدرة. وتظهر هذه التقنية فعالية كبيرة في تحسين الأداء الديناميكي. من خلال المحاكاة باستخدام Matlab/Simulink، أثبت الفلتر النشط فعاليته في تقليل معدل التشوه التوافقي من 25.41 % إلى 4.37 %، وتحقيق استقرار ممتاز في التوتر المستمر، مع الحفاظ على شكل تيار المصدر قريباً من الموجة الجيبية حتى عند تغير الأحمال، ما يعكس نجاح هذه التقنيات في تحسين جودة الطاقة الكهربائية

Résumé

Cette étude traite d'un problème dans les réseaux électriques, considéré comme l'un des défis majeurs dans les systèmes d'énergie modernes. Les dispositifs électroniques non linéaires, tels que les redresseurs et les convertisseurs, provoquent une déformation de la forme du courant et de la tension, entraînant de nombreuses perturbations telles que les oscillations, les baisses soudaines de tension, les variations de fréquence et les déséquilibres de phase. Ces distorsions ont un effet négatif sur l'efficacité du réseau, provoquant une surchauffe des équipements, une faiblesse du facteur de puissance et des interférences dans les instruments de mesure et de commande.

Pour résoudre ces problèmes, l'accent a été mis sur les filtres actifs, en particulier le filtre actif parallèle, qui se distingue par sa capacité à générer un courant opposé aux courants harmoniques générés par la charge, ce qui permet d'obtenir un courant d'alimentation propre et quasi sinusoïdal.

Ce filtre se compose de deux parties principales :

- Une partie de puissance, qui comprend l'onduleur et les composants électroniques.
- Une partie de commande, basée sur des techniques de génération du courant de référence et de production des signaux de commande.

Une stratégie de commande efficaces a été utilisées, la commande directe de la puissance (DPC), qui permet de contrôler directement la puissance active et réactive sans recourir à des circuits de commande complexes ni à une modulation impulsionnelle, en s'appuyant sur des tables de commutation selon la position de l'angle de la tension et les erreurs de puissance.

Grâce à la simulation sous Matlab/Simulink, le filtre actif a prouvé son efficacité en réduisant le taux de distorsion harmonique de 25,41 % à 4,37 %, tout en assurant une excellente stabilité de la tension continue, et en maintenant la forme du courant d'alimentation proche de l'onde sinusoïdale, même en cas de variations de charge. Cela reflète le succès de ces techniques dans l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	4
NOTATION & SYMBOLES.....	7
Chapitre I : Perturbation des réseaux électriques.....	9
I.1 Introduction	3
I.2 Fluctuation de la tension	3
I.3 Creux de tension	3
I.4 Déséquilibre de la tension et du courant	4
I.5 Variation de la fréquence.....	4
I.6 les perturbations harmoniques:	5
I.7 Solutions de dépollution harmoniques :	11
Chapitre II:princepe de filtrage actif parallel.....	13
II.1 Introduction :	14
II.2 Principe de filtrage actif parallèle :	14
II.3 Structure du filtre actif parallèle:	14
II.4 Etude de la partie puissance:.....	15
II.5 Etude de la partie commande :	18
II.6 Commande de l'onduleur	18
II.7 Conclusion :	20
Chapitre III:commande directe de puissance.....	21
III.1 Induction	22
III.2 Etude du contrôle direct de puissance du SAPF (D.P.C).....	22
III.3 Etat de l'art de la technique DPC.....	22
III.5 Contrôle de la tension du bus continu Vdc	28
III.6 Régulateur de type Proportionnel-Intégral (PI).....	29
III.7 Conclusion.....	30
Chapitre IV:smilation d'un DPC.....	31
IV.1 Introduction	32
IV.2 Schéma de simulation du FAP commandé par la DPC :	32
IV.3 Résultats de simulation sous Matlab-Simulink:	34
IV.4 Comportement du FAP en régime dynamique (changement de la charge)	38
IV.5 Interprétations des résultats :	40
IV.6 conclusion :	41
Conclusion général	44
Références Bibliographiques.....	46

LISTE DES FIGURES

N° de Figure	Titre de la Figure	Page
Figure I.1	Fluctuations de tension	7
Figure I.2	Les creux de tension	8
Figure I.3	Le déséquilibre de la tension et du courant	8
Figure I.4	Variation de fréquence	9
Figure I.5	Décomposition d'un signal périodique	9
Figure I.6	Diagramme vectoriel du facteur de puissance	11
Figure I.7	Filtres passifs RLC : résonant et amorti	12
Figure II.1	Schéma de principe : réseau, charge polluante et filtre actif	15
Figure II.2	Structure d'un filtre actif parallèle	15
Figure II.3	Schéma d'un onduleur de tension	16
Figure II.4	Schéma d'un onduleur de courant	17
Figure II.5	Principe de la commande par hystérésis	20
Figure II.6	Principe de la commande par MLI	21
Figure III.1	Comportement du contrôleur de puissance à hystérésis	24
Figure III.2	Synoptique : régulation de la tension du bus continu Vdc	26
Figure III.3	Schéma simplifié de régulation par PI	27
Figure III.4	Schéma du PI avec anti-emballement	28
Figure IV.1	Synoptique : filtre actif – réseau – charge polluante	30
Figure IV.2	Bloc de commande DPC	31
Figure IV.3	Transformation triphasé – biphasé	31
Figure IV.4	Courant de charge avant filtrage	32
Figure IV.5	Tension de source dans le repère	32
Figure IV.6	Courant harmonique – résultats de simulation	33
Figure IV.7	Tension aux bornes du condensateur	33
Figure IV.8	Courant source Is après filtrage + spectre	33
Figure IV.9	Courant Is et tension Vs	33
Figure IV.10	THD avant filtrage	34
Figure IV.11	THD après filtrage	34
Figure IV.12	Bloc de commande DPC	34
Figure IV.13	Résultats : puissances pm et pr	34
Figure IV.14	Synoptique avec variation de charge	35
Figure IV.15	Tension de source (variation de charge)	35
Figure IV.16	Courant harmonique (variation de charge)	35
Figure IV.17	Courant source Is après filtrage (variation de charge)	35
Figure IV.18	Courant de charge avant filtrage (variation de charge)	35
Figure IV.19	Tension aux bornes du condensateur (variation de charge)	36

LISTE DES TABLEAUX

N° de Tableau	Titre du tableau	Page
Tableau. III 1	commutation de la DPC	34
Tableau IV.1	Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée	38
Tableau IV.2	Les résultats des simulations	45

NOTATION & SYMBOLES

Symbole	notation	Unité
V	Tension électrique (tension de la source)	Volt (V)
V_{dc}	Tension du bus continu (condensateur de l'onduleur)	Volt (V)
I	Courant électrique (en général)	Ampère (A)
I_s	Courant de la source	Ampère (A)
I_f	Courant fondamental	Ampère (A)
I_h	Courant harmonique	Ampère (A)
I_{ref}	Courant de référence	Ampère (A)
P	Puissance active	Watt (W)
Q	Puissance réactive	Var
S	Puissance apparente	VA
D	Puissance déformante	VA
Φ	Angle de déphasage entre V et I	Radian / degré
F	Fréquence du réseau	Hertz (Hz)
Ω	Pulsation = $2\pi f$	rad/s
R	Résistance	Ohm (Ω)
L	Inductance	Henry (H)
C	Capacité	Farad (F)
THD	Taux de distorsion harmonique	%
V_{rms}	Valeur efficace de la tension	Volt (V)
I_{rms}	Valeur efficace du courant	Ampère (A)
α, β	Composantes du plan (α, β) dans la transformation de Park	
d, q	Composantes du plan tournant (dq0)	
V_α, V_β	Tensions transformées selon le plan (α, β)	Volt (V)
i_α, i_β	Courants transformés dans le plan (α, β)	Ampère (A)
V_0, V_1, \dots, V_7	Vecteurs de commutation de l'onduleur	Volt (V)
GPI(s)	Fonction de transfert du régulateur PI	
$\Delta P, \Delta Q$	Erreurs de puissance active et réactive	Watt (W), Var
V_{ref}, I_{ref}	Références de tension et de courant	Volt (V), Ampère
E	Erreur entre la valeur mesurée et la référence	
SAPF	Surface du filtre actif parallèle	

Introduction générale

Avec l'essor des technologies électroniques de puissance et l'augmentation continue de l'utilisation des charges non linéaires dans les réseaux électriques modernes, la question de la qualité de l'énergie devient un enjeu crucial. En effet, ces équipements, tels que les redresseurs, les variateurs de vitesse et les convertisseurs, introduisent dans le réseau des perturbations sous forme d'harmoniques qui altèrent la forme d'onde du courant et de la tension, provoquant ainsi des pertes, une surchauffe des équipements, et une dégradation du facteur de puissance.

Face à ces problématiques, les filtres actifs de puissance ont été développés comme une alternative performante aux solutions traditionnelles basées sur les filtres passifs. Parmi eux, le filtre actif parallèle (FAP) se distingue par sa capacité à injecter un courant en opposition de phase avec les composantes harmoniques, permettant ainsi de restaurer une forme d'onde quasi sinusoïdale à la source.

Dans ce contexte, cette étude se propose d'analyser et de mettre en œuvre un filtre actif parallèle commandé selon la méthode de Commande Directe de la Puissance (DPC). Cette stratégie, inspirée du contrôle vectoriel, permet de réguler directement les puissances active et réactive sans recourir à des modulateurs complexes, tout en assurant une réponse dynamique rapide et efficace.

L'approche adoptée repose sur une modélisation sous l'environnement Matlab/Simulink, afin d'évaluer les performances du système dans différents scénarios, tant en régime permanent qu'en régime transitoire.

Dans le premier chapitre de ce mémoire nous présentons des généralités sur la qualité de l'énergie et les perturbations des réseaux électriques.....

Dans le deuxième chapitre de ce mémoire nous présentons principe filtrage actif parallèle

Dans le troisième chapitre de ce mémoire nous présentons commande directe de puissance

Dans le quatrième chapitre de ce mémoire nous présentons simulation d'un DPC

Chapitre I :
Perturbation des réseaux électriques

I.1 Introduction

Les convertisseurs modernes, utilisés dans des applications nécessitant des puissances élevées, absorbent des courants non sinusoïdaux, ce qui perturbe la qualité de l'onde de tension du réseau. Cette perturbation génère des harmoniques, des courants et des tensions supplémentaires qui altèrent le facteur de puissance et peuvent avoir des conséquences négatives sur la performance du réseau électrique. Ce chapitre met en évidence les défis rencontrés par les réseaux électriques, notamment avec l'augmentation du nombre de convertisseurs statiques (convertisseurs électroniques) qui sont souvent responsables de la pollution harmonique.

I.2 Fluctuation de la tension

Les fluctuations de la tension sont des variations brusques et parfois répétitives ou aléatoires de la tension électrique. Elles résultent principalement de changements rapides de la puissance absorbée ou générée par des équipements tels que les soudeuses, les fours à arc ou les éoliennes.

Ces variations provoquent des variations d'intensité électrique, ce qui peut se traduire par un scintillement visible, notamment dans l'éclairage, même pour une baisse de seulement 1 % de la tension. [14]. [15].

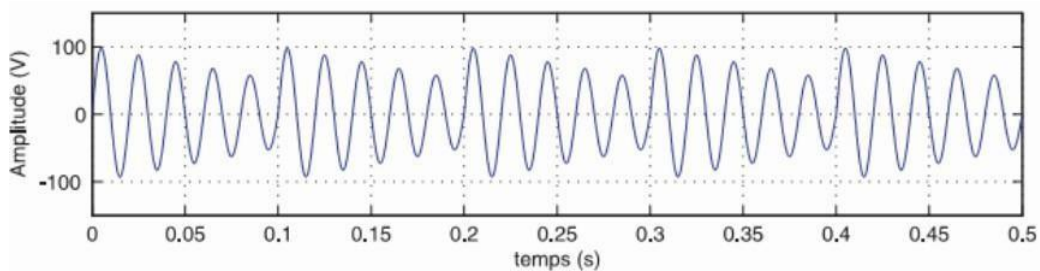
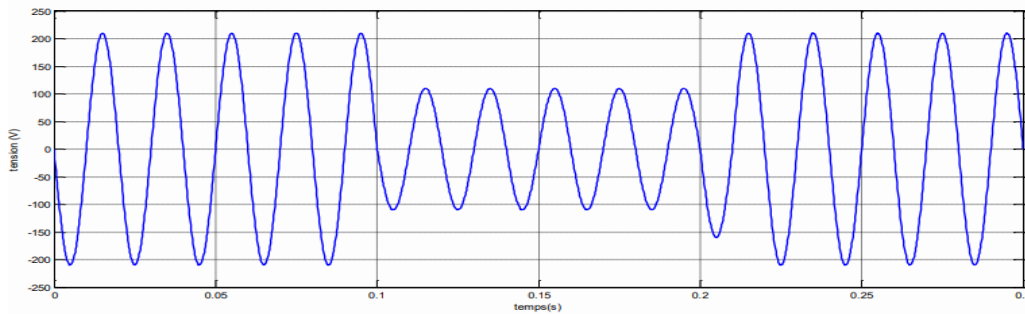


Figure I.1 Fluctuations de tension

I.3 Creux de tension

Le creux de tension est une chute brève et passagère de la tension électrique, dont l'amplitude varie généralement entre 10 % et 90 % de la valeur normale. Sa durée peut aller de quelques millisecondes à plusieurs secondes. Ce phénomène peut survenir à cause d'événement naturels comme la foudre, ou à la suite de défaillances dans les installations électriques, qu'elles soient domestiques ou industrielles.

Il peut également se produire lors d'opérations qui impliquent un fort appel de courant, comme le démarrage de gros moteurs, la mise en service de transformateurs, ou lors de courts-circuits. Ce type de perturbation peut nuire au bon fonctionnement des équipements électriques, en particulier des machines tournantes dont le couple dépend fortement de la tension. De plus, les creux de tension risquent de provoquer des arrêts soudains ou des dommages dans les appareils électroniques sensibles [1] [16]



.Figure I.2 Les creux de tension

I.4 Déséquilibre de la tension et du courant

Lorsqu'un système triphasé présente des tensions de valeurs différentes ou qui ne sont pas déphasées exactement de 120° entre elles, on dit qu'il est déséquilibré.

Même si le réseau d'alimentation est parfaitement équilibré, le fait de connecter une charge triphasée déséquilibrée peut provoquer un déséquilibre des tensions. Ce phénomène est dû à la circulation de courants asymétriques dans les impédances du réseau [2]. [17]

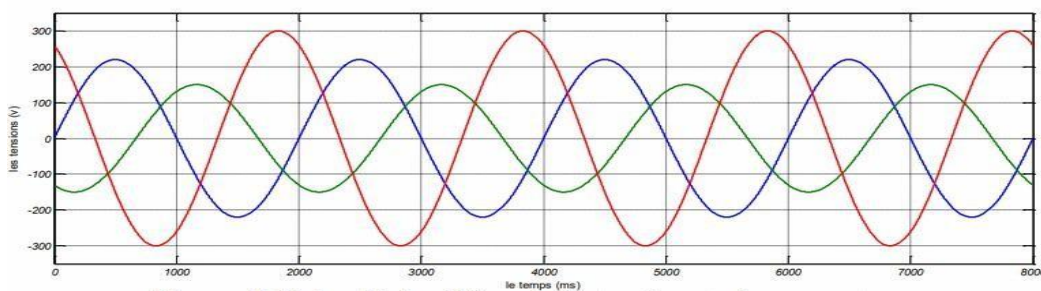


Figure I.3 Le déséquilibre de la tension et du courant

I.5 Variation de la fréquence

Des variations notables de la fréquence du réseau peuvent apparaître principalement dans les systèmes électriques isolés, c'est-à-dire non interconnectés au réseau national, ou bien lorsqu'ils

sont alimentés par une source thermique indépendante. En fonctionnement normal, la fréquence fondamentale du réseau doit rester stable autour de 50 Hz, ce qui garantit la fiabilité et la qualité de l'alimentation électrique. Toute déviation significative par rapport à cette valeur peut indiquer un déséquilibre entre la production et la consommation d'énergie[18].

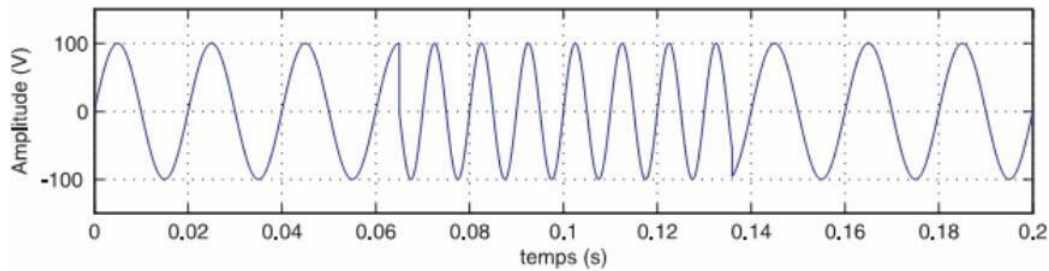
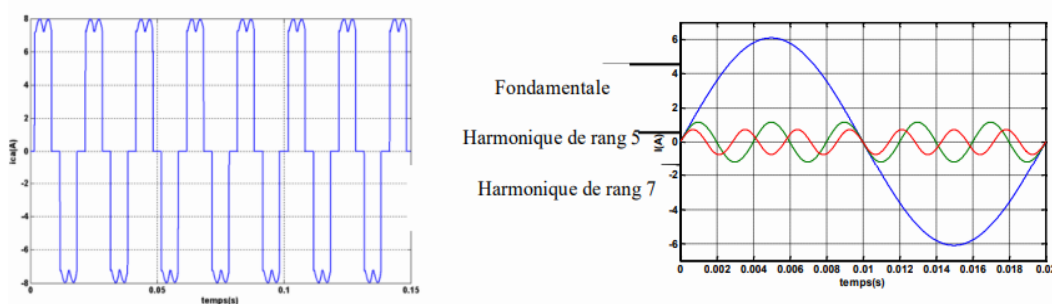


Figure I.4 Variation de fréquence

1.6 les perturbations harmoniques:

1.6.1 Définition d'un harmonique:

Les harmoniques sont des signaux sinusoïdaux qui composent une onde périodique, dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Par exemple, si la fréquence de base est de 50 Hz, les harmoniques auront des fréquences comme 100 Hz, 150 Hz, etc. L'étude des harmoniques se concentre généralement sur une plage allant de 100 Hz à 2000 Hz, ce qui correspond aux harmoniques de rang $h=2$ et $h=40$. Il existe aussi des inter harmoniques, qui ont des fréquences intermédiaires non entières et peuvent également altérer la qualité du signal électrique [3] [19] .



Signal déforme

Figure I.5 Décomposition d'un signal périodique

I.6.2 Sources des harmoniques

L'utilisation croissante d'appareils électriques intégrant des convertisseurs statiques dans les systèmes de conversion d'énergie a fortement contribué à l'augmentation de la pollution harmonique dans les réseaux. Ces équipements perturbent la qualité du courant et de la tension dans les réseaux de distribution.

Parmi les principales sources de cette pollution, on retrouve les lampes fluorescentes, les équipements informatiques, les appareils électroménagers (comme les téléviseurs ou les réfrigérateurs), les arcs électriques, ainsi que tous les types de convertisseurs statiques (redresseurs, onduleurs...) connectés directement au réseau. Ces dispositifs génèrent des courants harmoniques qui altèrent la forme sinusoïdale idéale du courant.

En réalité, ces équipements consomment un courant déformé, même si la tension d'alimentation est parfaitement sinusoïdale. Ce comportement les classe parmi les charges non linéaires, responsables de la génération de courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples, entiers ou non, de la fréquence fondamentale. Cette distorsion affecte sérieusement le bon fonctionnement et la performance des réseaux électriques [20].

I.6.2 Effets des harmoniques :

La présence d'harmoniques dans les réseaux électriques peut avoir de nombreuses conséquences négatives, aussi bien sur les équipements que sur la qualité de l'électricité.

Tout d'abord, les composants électriques comme les câbles, moteurs ou condensateurs peuvent surchauffer à cause des pertes supplémentaires générées par les courants harmoniques. Cette surchauffe réduit leur efficacité et accélère leur usure.

Ensuite, les appareils sensibles, notamment les systèmes de commande ou de régulation, peuvent mal fonctionner. Les formes d'ondes déformées perturbent leur fonctionnement, surtout quand ils dépendent de passages précis par zéro.

Les phénomènes de résonance représentent également un risque important : si un harmonique a la même fréquence qu'un circuit résonant du réseau (associant inductances et capacités), l'amplification de ce signal peut gravement endommager les équipements.

Enfin, les instruments de mesure perdent en précision en présence de signaux déformés, ce

qui peut fausser le contrôle et le suivi du réseau.

En résumé, les harmoniques représentent un vrai problème pour les réseaux modernes. Il devient essentiel de mettre en place des solutions techniques efficaces pour limiter leur impact et préserver la stabilité et la fiabilité de l'alimentation électrique. [21]

I.6.3 Taux harmonique de rang h :

Le taux de distorsion harmonique du rang h s'exprime par :

$$S_h = C_h / C_1 \quad (\text{I.2})$$

Où C_h représente la composante harmonique de rang h et C_1 représente la composante fondamentale

Le taux de distorsion globale d'harmonique est :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{C_h^2}{C_1^2}} \quad (1.3)$$

1.6.5. Normes sur les harmoniques:

Les normes relatives aux harmoniques électriques visent à limiter les effets négatifs des distorsions harmoniques sur les réseaux électriques afin d'assurer une alimentation stable et de bonne qualité. Les harmoniques sont des signaux électriques dont la fréquence est supérieure à la fréquence fondamentale (50 Hz en Europe, 60 Hz en Amérique du Nord), souvent générés par des équipements électroniques comme les variateurs de vitesse, les alimentations à découpage ou d'autres appareils à consommation non linéaire. [22] [23]

Parmi les principales normes, on trouve :

- **IEC 61000-4-7** : Cette norme fournit les méthodes et recommandations pour mesurer et analyser les harmoniques et les perturbations conductrices dans les réseaux électriques.
- **IEC 61000-3-2** : Elle fixe les limites des courants harmoniques que peuvent émettre les appareils électriques fonctionnant en courant alternatif, en particulier les équipements domestiques.
- **IEC 61000-3-4** : Elle concerne les installations industrielles et commerciales, définissant les exigences pour les courants harmoniques produits par des charges non linéaire

- **IEC 61000-3-6** : Cette norme définit les seuils d'émission d'harmoniques pour les équipements industriels générant des distorsions à partir d'une certaine puissance.
- **IEEE 519** : Utilisée largement aux États-Unis et dans le monde, cette norme précise les limites admissibles des distorsions harmoniques en fonction de la taille du système électrique. Elle propose aussi des méthodes pour mesurer et réduire ces harmoniques.
 - Limites de courant harmonique selon la capacité des transformateurs ou générateurs.
 - Limites de tension harmonique dépendant de la tension nominale du système.
- **IEEE 1159** : Cette norme porte sur la qualité globale de l'alimentation électrique, incluant la mesure et l'analyse des harmoniques dans le réseau.[4] [18].

I.6.6 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP :

Dans le cas d'un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est habituellement calculé comme le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Cependant, lorsqu'il y a des harmoniques présentes dans le système, la puissance apparente S se divise en trois composants : la puissance active P , la puissance réactive Q , et la puissance déformante D . Cette dernière est liée aux courants harmoniques, qui résultent des distorsions dans le signal électrique. Le courant total I peut donc être exprimé comme la somme du courant fondamental I_r et des courants harmoniques I_h , soit [5] [24]

$$I = I_r + I_h$$

Ces courants harmoniques génèrent la puissance déformante D , qui contribue à une détérioration du facteur de puissance et à des perturbations dans les systèmes électriques.

En d'autres termes, les harmoniques ajoutent des courants supplémentaires qui ne contribuent pas à la puissance active, mais qui participent à la puissance apparente et déformante, ce qui peut entraîner une mauvaise utilisation des équipements comme les générateurs, transformateurs et lignes de transmission. Cela peut conduire à des pertes supplémentaires et à une surcharge de ces équipements si le facteur de puissance est trop faible.

La gestion des harmoniques et la compensation du facteur de puissance deviennent donc cruciales pour assurer une utilisation optimale des systèmes électriques.

Le facteur de puissance (FP) devient:

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

$$P = \cos\varphi_1 \cdot \cos\gamma \quad (\text{I.5})$$

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

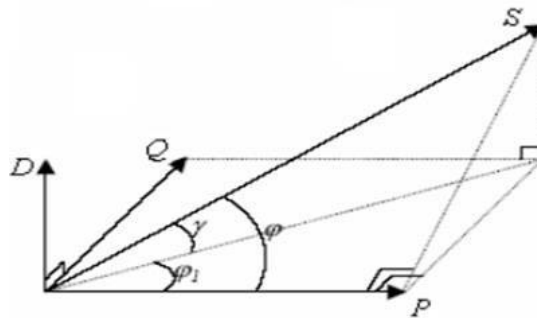


Figure I.6 Diagramme vectorielle du facteur de puissance

φ_1 : le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente.

γ : le déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré

linéaire S1 et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire S.

φ : le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S.

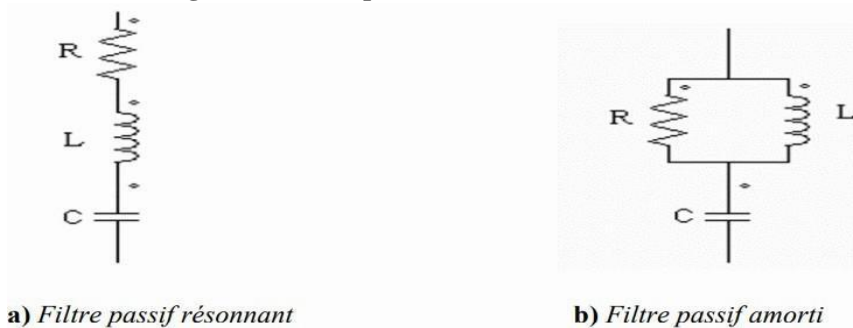
I.7 Solutions de dépollution harmoniques :

I.7.1 Solutions classiques

Ces techniques, essentielles pour tout électricien, offrent des solutions rapides et efficaces pour traiter certaines perturbations localisées. Elles utilisent des composants passifs comme des bobines, des condensateurs et des résistances, ainsi que des configurations spécifiques qui modifient le circuit électrique.

Le principe consiste à connecter en parallèle une impédance qui est très faible à la fréquence à filtrer, mais suffisamment élevée à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les filtres passifs les plus courants, on trouve les filtres résonants et les filtres amortis [26].

Figure I.7 Filtres passifs RLC : résonant et amorti



I.7.2 Solutions modernes

Les méthodes traditionnelles de traitement des perturbations ne suffisent plus face à l'évolution constante des réseaux électriques et des équipements à protéger. Afin d'assurer aux utilisateurs une qualité d'énergie optimale, même en présence de conditions de fonctionnement difficiles, les filtres actifs de puissance sont aujourd'hui proposés comme des solutions modernes et performantes. [27]

Ces filtres actifs ont l'avantage de s'adapter dynamiquement aux variations de charge et aux changements du réseau, tout cela sans nécessiter de modifications sur les installations du fournisseur d'énergie ni chez le consommateur.

a. Filtre actif parallèle

Le filtre actif peut être placé en parallèle avec la charge. On parle alors de filtre shunt ou parallèle.

b. Filtre actif série

Le filtre série fonctionnant en compensateur de tension fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique venant du côté source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire. On arrive ainsi à limiter la tension harmonique aux bornes de la charge. Le filtre actif est parcouru par la totalité du courant de charge, mais il ne supporte en fonctionnement normal que la tension harmonique qui est généralement d'amplitude faible

c. Filtre actif série-parallèle (UPQC)

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la distorsion harmonique et les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique, ainsi que leurs impacts négatifs sur les équipements électriques connectés. Ces perturbations peuvent entraîner des échauffements et des dégradations du fonctionnement des équipements. Nous avons également présenté les normes qui encadrent ces phénomènes, en spécifiant les limites de la génération d'harmoniques. Pour atténuer ces effets nuisibles, plusieurs solutions de dépollution, traditionnelles et modernes, ont été évoquées. Les solutions classiques, comme les filtres passifs, ne sont pas toujours très efficaces. Elles peuvent présenter des inconvénients tels qu'un encombrement important et des problèmes de résonance. De plus, ces filtres ne sont pas capables de s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Chapitre II:

Principe et structure du filtre actif parallèle

II.1 Introduction :

L'un des problèmes de la qualité d'énergie les plus importants est les harmoniques et comment les filtrer. Dans ce chapitre nous allons approfondir l'étude d'un type moderne de filtre c'est un filtre actif parallèle.

II.2 Principe de filtrage actif parallèle :

Pour illustrer le principe de filtrage actif, considérons l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif. La charge polluante est constituée d'un pont triphasé à diodes débitant sur un circuit RL. Alors que le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le filtre actif injecte un courant de telle manière que le courant absorbé par le réseau doit être sinusoïdal [6]. [27]

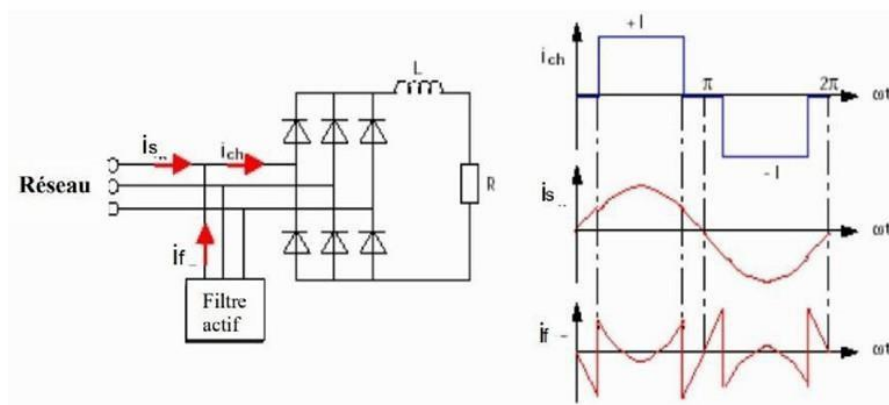


Figure II.1 Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs

II.3 Structure du filtre actif parallèle:

Les filtres actifs sont constitués de deux parties distinctes : une partie puissance, une partie commande.

La partie puissance est constituée d'un onduleur basé sur des interrupteurs de puissance commandés à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, MOSFET, etc.) avec des diodes en antiparallèle, d'un circuit de stockage d'énergie ainsi que d'un filtre de sortie. La partie commande, quant à elle, est constituée de la méthode d'identification des courants perturbés, de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie et de la commande de l'onduleur de tension [7] [28].

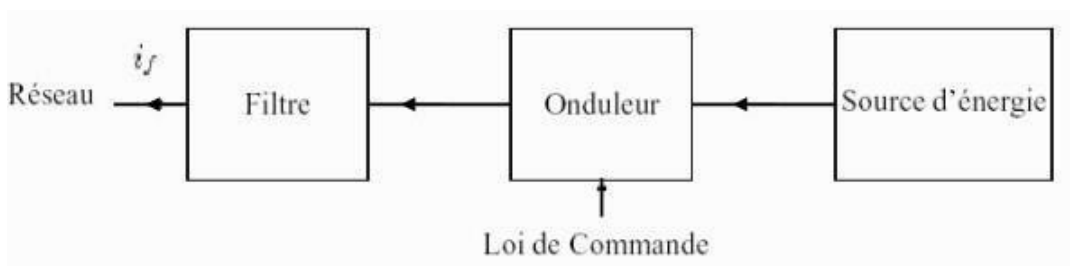


Figure II.2 Structure d'un filtre actif parallèle

II.4 Etude de la partie puissance:

II.4.1 L'onduleur :

II.4.1.1. Structure tension :

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré comme un système où [30] la capacité C joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V_0 doit être positive et maintenue quasiment constante afin, d'une part, de ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, et d'autre part, de ne pas dégrader les performances du filtre actif. L'onduleur est relié au réseau via un filtre du premier ordre constitué d'une inductance L_f qui a pour double rôle de transformer les variations de tension V_f variations de courant, et de filtrer les fréquences de commutation des bras de l'onduleur. Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant et constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture, montés en antiparallèle avec une diode [8].

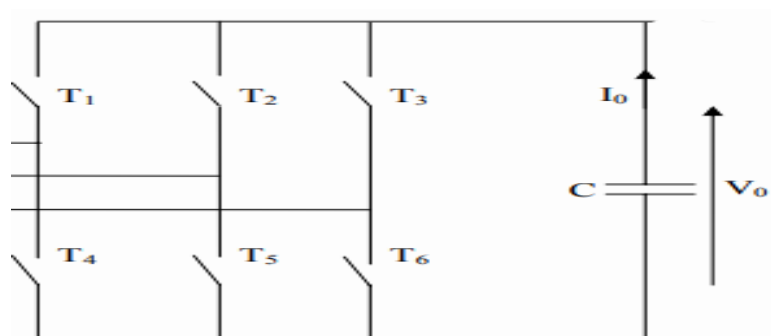


Figure II.3 Schéma d'un onduleur de tension

II.4.1.2 Structure courant :

L'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant L traversant cette inductance est maintenu quasiment constante pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance L_f et d'une capacité C_f .

Ainsi le courant i_f du filtre actif est égal au courant délivré par l'onduleur filtré par le filtre LC dont la fréquence propre

(II.1)

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$$

La bande passante du filtre actif est donc essentiellement imposée par le choix de L_f et de C_f , qui peuvent être dimensionnés de manière à atténuer la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur. Les interrupteurs, quant à eux, sont unidirectionnels : ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ne pouvant supporter de tension inverse, ces transistors nécessitent l'ajout d'une diode en série pour assurer leur bon fonctionnement [9].

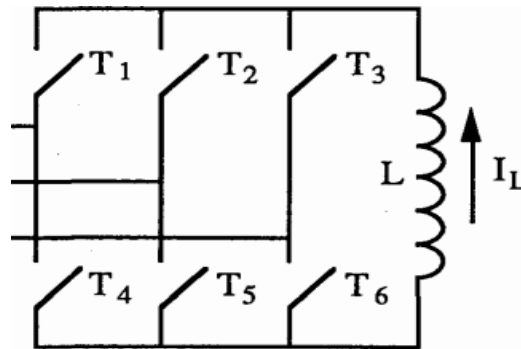


Figure II.4 Schéma d'un onduleur de courant

II.4.1.3 Source d'énergie

Le réseau électrique est représenté par un poste de transformation modélisée par la force électromotrice du réseau, par une inductance L_s et une résistance R_s .

II.4.1.4 Filtre de couplage

Le filtre entre l'onduleur et le réseau est appelé filtre de découplage. C'est un filtre passif de premier ordre, qui est en réalité une simple inductance avec une résistance interne, mais présentant des particularités au niveau de son circuit magnétique (notamment par l'introduction de noyaux en ferrite).

Il a deux objectifs, le premier est de générer des courants harmoniques à partir de la différence des tensions sent relais sortie du pont onduleur et le réseau. A ce titre, l'inductance L_f intervient dans la commande abilité du courant du filtre. Le deuxième est de réduire au point de raccordement au réseau (PCC), l'amplitude des créneaux de tension générés.

II.5 Etude de la partie commande :

II.5.1 Identification des courants de référence

Pour commander le filtre actif parallèle (FAP), il est nécessaire d'identifier les courants harmoniques issus de la charge polluante, servant de référence à ce filtre. Cette identification peut se faire à partir du courant de la charge, du courant de la source ou de la tension de la source.

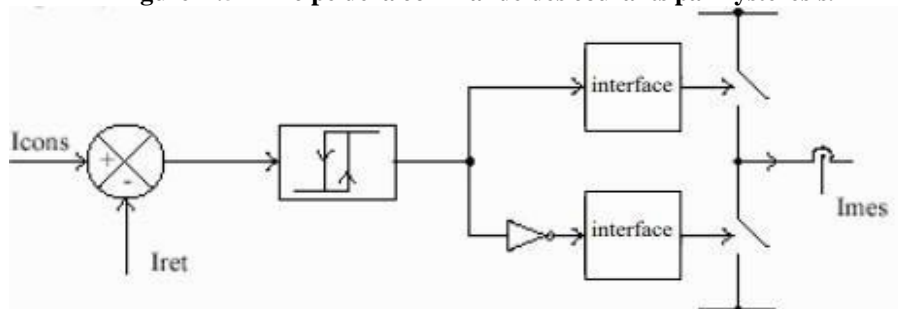
Les méthodes d'identification se répartissent en deux familles : celles basées sur la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, efficaces pour des charges à contenu harmonique stable, mais coûteuses en calcul, et celles fondées sur les puissances instantanées dans le domaine temporel, permettant aussi de compenser la puissance réactive. Récemment, des approches numériques plus avancées ont vu le jour, capables de compenser un ou plusieurs types de courants perturbateurs tout en régulant la tension de la charge, bien qu'elles ne garantissent pas une compensation parfaite.

II.6 Commande de l'onduleur

II.6.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.

Figure II.5 Principe de la commande des courants par hystérésis.



dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux

fréquences de commutations.

II.6.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Pour résoudre les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la technique de commande par MLI, qui résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation, dont le schéma de principe est donné par la plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, comme le montre.

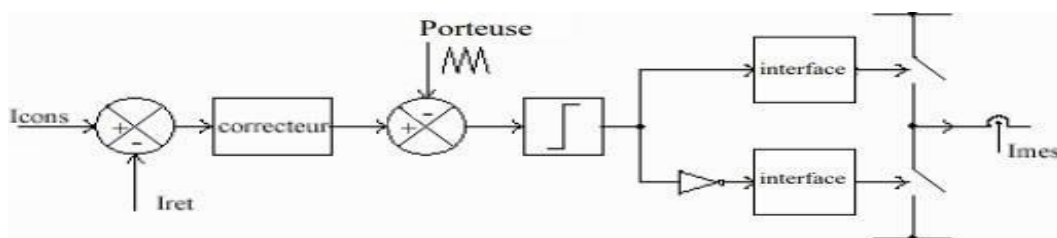


Figure II.6 Principe de commande des courants par MLI.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel.

Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature, comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- La MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse.
- La MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse.

Plus récemment, nous avons vu apparaître une technique de commande, dite commande à modulation vectorielle. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquées à chacun des interrupteurs [10].

II.6.3 Les boucles de régulation de l'onduleur

Pour que l'onduleur puisse générer les courants nécessaires pour compenser les harmoniques de courant créés par la charge non linéaire, il doit être régulé en fonction de la demande. Un condensateur est connecté à l'entrée continue de l'onduleur pour maintenir une tension moyenne constante à ses bornes.

Cependant, lorsque l'onduleur fournit de la puissance active, la tension moyenne aux bornes du condensateur tend à diminuer. À l'inverse, lorsque l'onduleur consomme de la puissance active, la tension moyenne aux bornes du condensateur tend à augmenter.

II.6.4 La Boucle de Régulation de la Tension

La tension V_{dc} mesurée au niveau du condensateur, est comparée à une tension de référence V_{ref} . Cette comparaison est réalisée à l'aide d'un régulateur qui produit en sortie un courant (ou une puissance) qui représente l'ajustement nécessaire pour ramener la tension V_{dc} en valeur moyenne à la tension V_{ref} .

II.7 Conclusion :

Nous avons présenté le principe et la structure du filtre actif parallèle. Il est composé de deux parties : partie puissance et partie commande. Nous avons présenté les deux stratégies de commande de l'onduleur couramment utilisées dans les applications des filtres actifs : la commande par hystérésis et la modulation par largeur d'impulsion (MLI).

Chapitre III:
Commande Directe de
Puissance

III.1 Induction

Ce chapitre est consacré à l'analyse de la commande directe des puissances (DPC), une approche innovante qui permet de se passer du modulateur et des boucles de régulation internes habituellement présentes dans les systèmes de commande classiques. À la place, cette méthode repose sur un tableau de commutation, dont le choix des états dépend directement des écarts entre les puissances mesurées et les puissances de référence.

III.2 Etude du contrôle direct de puissance du SAPF (D.P.C)

La commande directe de puissance (DPC) s'inspire du principe de la commande directe du couple (DTC) appliquée aux machines asynchrones. À la différence de la DTC, qui régule directement le couple et le flux, la DPC s'appuie sur le contrôle des puissances active (p) et réactive (q) instantanées comme grandeurs principales à réguler

La première utilisation de cette approche a concerné le pilotage de machines électriques, sous la forme de la DTC. Par la suite, une approche analogue a été proposée pour le contrôle des redresseurs connectés au réseau, dans laquelle la commande s'effectue directement sur les puissances instantanées.

L'un des avantages majeurs de la DPC réside dans sa simplicité de mise en œuvre : elle ne nécessite ni boucle de régulation du courant, ni modulation de largeur d'impulsion (MLI). À chaque période d'échantillonnage, les états de commutation de l'onduleur sont déterminés à partir d'une table de commutation, en fonction de l'erreur instantanée entre les puissances de référence et les puissances mesurées (ou estimées), ainsi que de la position angulaire du vecteur de tension de la source.

Dans ce schéma de commande, la tension du bus continu est généralement régulée afin d'assurer le contrôle de la puissance active, tandis que la puissance réactive est fixée à zéro pour garantir un fonctionnement à facteur de puissance unitaire [11].

III.3 Etat de l'art de la technique DPC

La commande directe de puissance (DPC) a été introduite pour la première fois par Ohnishi en 1991, puis développée par Noguchi et Takahashi en 1998. Ohnishi a proposé d'utiliser les puissances active et réactive instantanées comme variables de commande, en remplacement des courants triphasés instantanés. Il a tout d'abord établi une relation

proportionnelle entre ces puissances et les composantes de courant exprimées dans le repère tournant (d-q), dans le cadre d'un fonctionnement sinusoïdal et équilibré. Cette approche repose sur la sélection du vecteur de tension approprié à partir d'une table de commutation, en tenant compte des erreurs entre les puissances mesurées et leurs références, ainsi que de la position angulaire du vecteur de tension de la source.

Le vecteur de commutation optimal est choisi de manière à maintenir les erreurs de puissance active et réactive à l'intérieur de bandes à hystérésis définies. Pour améliorer la précision de commande, l'espace vectoriel est généralement divisé en douze secteurs, ce qui permet une identification plus fine de la position du vecteur de tension de la source.

Cependant, un inconvénient majeur de la DPC réside dans sa fréquence de commutation variable. Celle-ci dépend de plusieurs facteurs : la fréquence d'échantillonnage, la structure de la table de commutation, les caractéristiques du système, les valeurs de référence des puissances active et réactive, les largeurs des bandes d'hystérésis, ainsi que l'état actuel des interrupteurs de l'onduleur [12].

III.4 Stratégie du contrôle direct de puissance du FAP

La stratégie de commande DPC appliquée au FAP est représentée dans le synoptique. Elle consiste à sélectionner l'état approprié à partir d'une table de commutation, basée sur les erreurs des puissances active et réactive, lesquelles sont limitées par une bande d'hystérésis.

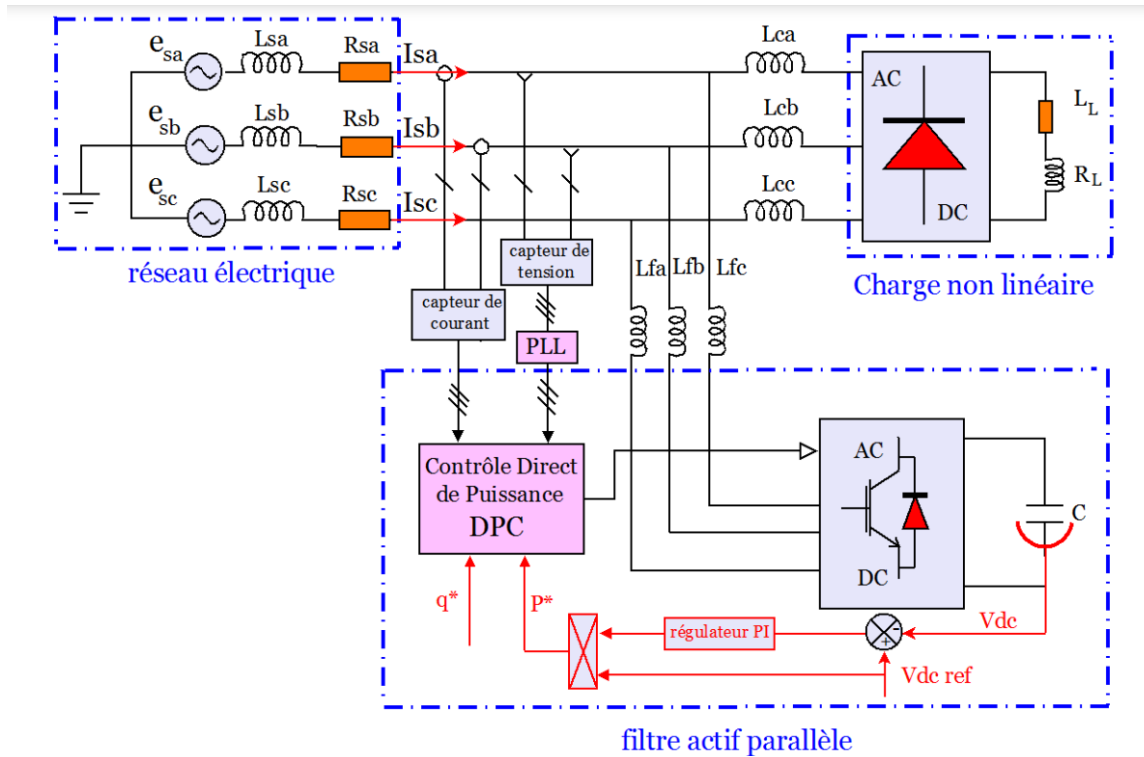


Figure III.1 : Contrôle du FAP par la commande DPC

Deux éléments clés assurent un fonctionnement efficace et stable du système :

- La détermination précise des états de commutation.
- Une estimation rapide et exacte des puissances active et réactive.

III.4.1 Calcul des puissances instantanées [13]

Pour un système triphasé, la puissance active instantanée est définie par le produit scalaire des courants et des tensions de ligne. La puissance réactive est définie par le module de leur produit vectoriel. Ces puissances sont exprimées respectivement par les relations suivantes:

$$P_S(t) = v_{sa} * i_{sa} + v_{sb} * i_{sb} + v_{sc} * i_{sc} \tag{III.1}$$

$$q_s(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[(v_{sa} - v_{sb}) * i_{sb} + (v_{sb} - v_{sc}) * i_{sb} + (v_{sc} - v_{sa}) * i_{sc} \right] \tag{III.2}$$

III.4.2 Contrôleur à hystérésis

La commande directe de puissance (DPC) vise à réguler directement les puissances active et réactive fournies par un convertisseur (souvent dans un système de conversion d'énergie, comme un onduleur ou un convertisseur statique) sans passer par une régulation intermédiaire des courants. Cette méthode repose sur la comparaison des puissances instantanées estimées avec leurs valeurs de référence, à l'aide de deux comparateurs à hystérésis. Ces comparateurs déterminent si l'erreur entre la puissance mesurée et la puissance désirée reste dans une certaine bande tolérable. Si ce n'est pas le cas, le système de commande ajuste l'état de commutation du convertisseur pour ramener les puissances dans la bande spécifiée.

$$\Delta p_s = p_{ref} - p_s \quad (\text{III.3})$$

$$\Delta q_s = q_{ref} - q_s \quad (\text{III.4})$$

Ces deux contrôleurs sont chargés de décider à quel point une nouvelle commutation et/ou un vecteur de tension de sortie de l'onduleur est appliquée. Si l'erreur de la puissance (p_s ou q_s) est en croissance et atteint le niveau supérieur, le contrôleur à hystérésis change sa sortie à '1'. Ainsi, la table de commutation reçoit le changement de l'entrée et commute la sortie sur un vecteur approprié qui permettra à l'onduleur de modifier l'état des puissances active et réactive instantanées. Le niveau de sortie du contrôleur à hystérésis est maintenu jusqu'à ce que le signal d'erreur atteigne la bande inférieure, où la sortie sera commutée à zéro.

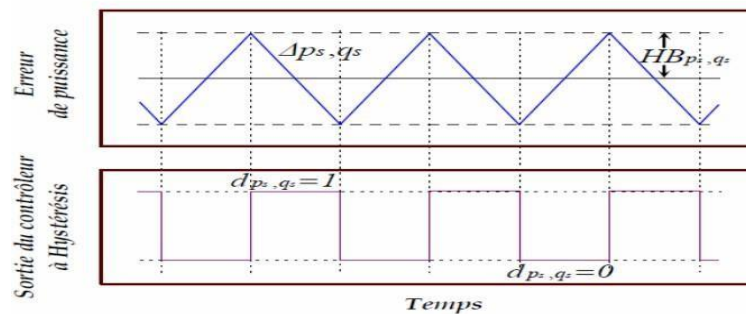


Figure III.2 Comportement d'un contrôleur de puissance à hystérésis à deux niveaux.

Bien que la sortie du contrôleur soit maintenue jusqu'à ce que l'erreur parvienne à l'autre bande, la table de commutation peut commuter sur un autre vecteur de sortie suite à un basculement du deuxième contrôleur à hystérésis ou à une modification de la position du vecteur de tension [14].

III.4.3 Choix du secteur

L'influence de chaque vecteur de sortie résultant du FAP sur les puissances active et réactive dépend fortement de la position instantanée du vecteur de la tension de source. Ainsi, en plus des signaux issus des deux contrôleurs à hystérésis, la table de commutation est également fonction de la position angulaire du vecteur de tension de source, lequel tourne à la pulsation (ω) dans le plan complexe.

Cependant, au lieu d'introduire directement la position exacte de ce vecteur dans la table de commutation, un bloc appelé sélecteur de secteur identifie dans quel domaine angulaire se trouve actuellement le vecteur de tension de la source.

Pour améliorer la précision et éviter les ambiguïtés aux frontières entre les vecteurs de commande, le plan de l'espace vectoriel est divisé en 12 secteurs de 30° chacun. Le premier secteur, par exemple, est défini entre 0° et 30° , le deuxième entre 30° et 60° , et ainsi de suite, couvrant ainsi l'ensemble des 360° .

Les régions consécutives suivent dans le sens trigonométrique le même critère, qui peut être génériquement exprimé par :

$$0 < \theta_1 < \frac{\pi}{6} \quad (\text{III.5})$$

$$(n-1)\frac{\pi}{6} < \theta_n \leq (n)\frac{\pi}{6} \quad n=1,2,\dots, 12 \quad (\text{III.6})$$

L'hexagone de tension de la Figure III.1 est la représentation vectorielle des vecteurs non nuls v_1 à v_6 (v_0 et v_7 étant les vecteurs nuls correspondant aux états 000 et 111 respectivement). Ensuite, l'algorithme de commande doit identifier le secteur, parmi les 1 à 12 secteurs, puis sélectionner le vecteur de tension de sortie du filtre actif v_f appartenant à l'hexagone de tension qui rend la puissance de sortie le plus proche possible de sa consigne

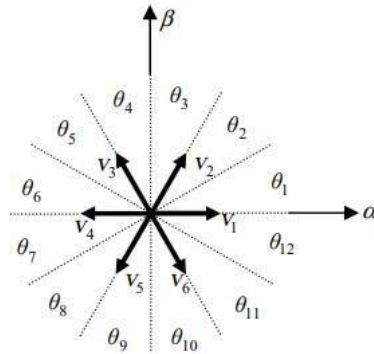


Figure III.3 Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel (α, β) . [11]

A partir des tensions au point PCC dans le repère (α, β) , on déduit la position angulaire du vecteur de tension. Cette position est définie par l'équation

$$\theta = \arctan \frac{V_\beta}{V_\alpha} \quad (\text{III.7})$$

III.4.4 La table de commutation

La table de commutation peut être considérée comme le cœur du contrôle direct de puissance. Elle permet de sélectionner un vecteur de tension approprié parmi ceux générés par l'onduleur, afin de diriger les puissances active et réactive instantanées dans la direction souhaitée. Cette sélection repose à la fois sur la position du vecteur de tension de la source et sur les erreurs mesurées des puissances active et réactive.

Rappelons qu'un onduleur de tension à deux niveaux peut générer sept vecteurs de tension

distincts, correspondant à huit combinaisons possibles d'états de commutation. Chaque vecteur est déterminé en fonction de la configuration des interrupteurs et de la tension du bus continu. [12]

En se basant sur cette approche, Noguchi a développé la table de commutation suivante :

S_p	S_q	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6	φ_7	φ_8	φ_9	φ_{10}	φ_{11}	φ_{12}
1	0	v_6	v_7	v_1	v_0	v_2	v_7	v_3	v_0	v_4	v_7	v_5	v_0
	1	v_7	v_7	v_0	v_0	v_7	v_7	v_0	v_0	v_7	v_7	v_0	v_0
0	0	v_6	v_1	v_1	v_2	v_2	v_3	v_3	v_4	v_4	v_5	v_5	v_6
	1	v_1	v_2	v_2	v_3	v_3	v_4	v_4	v_5	v_5	v_6	v_6	v_1

$v_0(000), v_1(100), v_2(110), v_3(010), v_4(011), v_5(001), v_6(101), v_7(111)$.

Tableau. III 1 de commutation de la DPC

III.5 Contrôle de la tension du bus continu V_{dc}

Le contrôle de la tension du bus continu est une étape essentielle dans la commande du FAP. En effet, l'analyse des variations de la tension aux bornes des condensateurs permet de suivre les échanges d'énergie entre ces condensateurs et le réseau.

Dans l'hypothèse d'un convertisseur idéal (sans pertes), le réseau assure uniquement l'alimentation en puissance active nécessaire à la charge. Dans ce cas, les condensateurs de l'étage continu jouent le rôle de réservoir énergétique destiné uniquement à la circulation des composantes harmoniques. Par conséquent, ils ne fournissent pas de puissance active en régime permanent.

Ainsi, en régime stationnaire, la puissance active délivrée par la source doit correspondre exactement à celle requise par la charge. Si un déséquilibre de puissance active survient, c'est le condensateur de stockage qui compense l'écart, en injectant ou absorbant la puissance manquante. Ce phénomène entraîne inévitablement une variation de la tension continue à ses bornes.

III.6 Régulateur de type Proportionnel-Intégral (PI)

Un régulateur de type Proportionnel-Intégral, dont la fonction de transfert est notée $G_{PI}(S)$, est choisi comme correcteur pour la boucle de régulation externe. En négligeant l'effet de la perturbation induite par le courant de charge, le schéma fonctionnel peut être simplifié. Cette simplification conduit au synoptique illustré à Figure III.2, en considérant l'hypothèse suivante :

$$K = \frac{\sqrt{2}C_{dc} V_{dcref}}{3V_s} \quad (\text{III.8})$$

A partir du schéma simplifié de la fonction de transfert du système en boucle fermée s'écrit:

$$GV_{dc(PI)}(s) = \frac{k_p + s * k_i}{k * s^2 + k * s + k_p} \quad (\text{III.9})$$

Cette fonction de transfert représente un système de deuxième ordre [11].

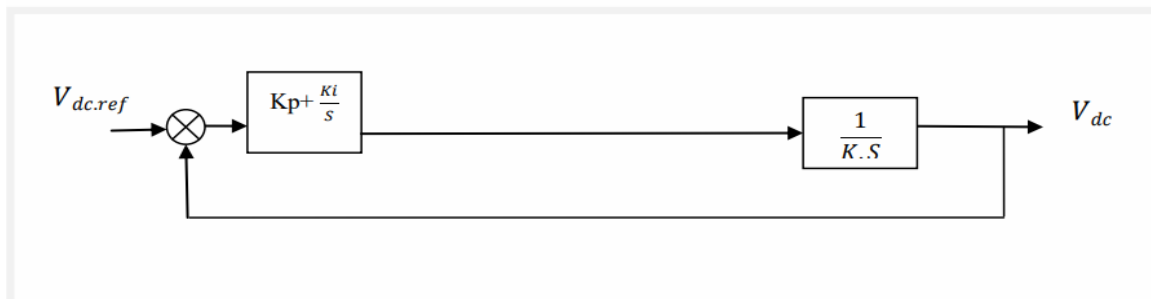


Figure III.4 Schéma simplifié de régulation de la tension du bus continu par un PI

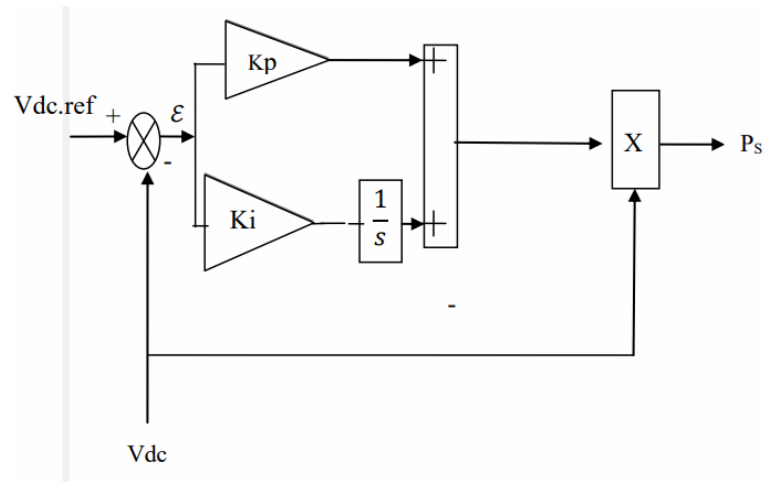


Figure III.5 Schéma du PI pour le calcul de la puissance active de référence.

$$k_i = k \cdot \omega_n^2$$

$$k_p = 2 \cdot \xi \cdot k \cdot \omega_n$$

En plaçant les pôles pour :

$$\xi = 0,707 \quad \omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, la commande directe des puissances (DPC) appliquée à un filtre actif parallèle triphasé a été présentée et analysée, avec l'utilisation d'un contrôleur à hystérésis. La conception d'un régulateur PI, assurant une régulation efficace de la tension du bus continu, a également été étudiée.

Chapitre IV:
Simulation du filtre actif parallèle avec la
commande DPC

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'évaluation des performances d'un filtre actif parallèle (FAP) piloté par la stratégie de Commande Directe de Puissance (DPC). Pour cela, une série de simulations a été réalisée dans l'environnement Matlab/Simulink afin de valider l'efficacité du système dans l'atténuation des courants harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

L'étude porte sur deux situations principales : le fonctionnement en régime permanent et en régime dynamique lors de variations de charge. Les résultats obtenus permettent d'analyser le comportement du filtre à travers les formes d'onde des courants, l'évolution de la tension continue aux bornes du condensateur, ainsi que le taux de distorsion harmonique (THD) avant et après filtrage.

IV.2 Schéma de simulation du FAP commandé par la DPC :

Les simulations ont été réalisées grâce à Matlab/Simulink, un outil permettant d'observer l'évolution des courants et des tensions dans les différentes branches du circuit au cours d'un intervalle de temps déterminé.

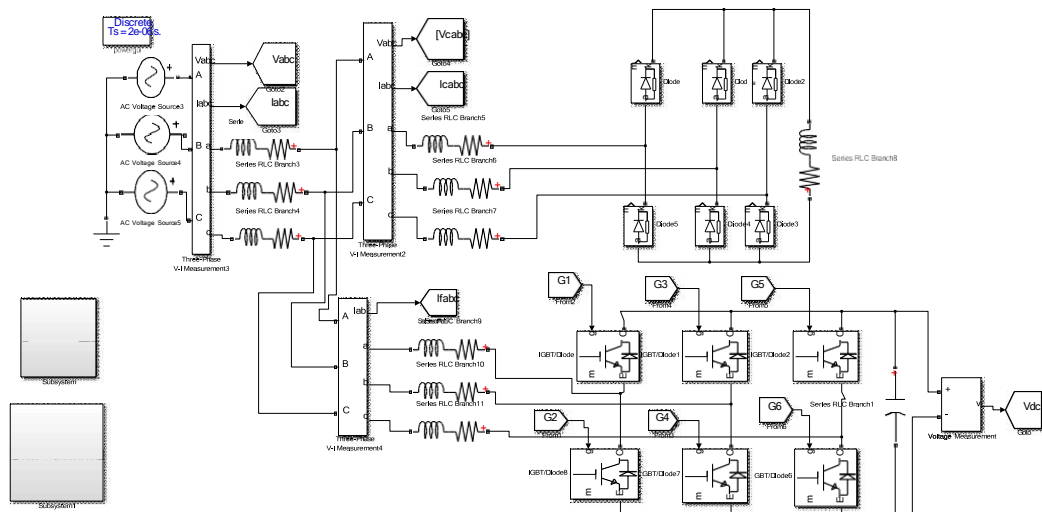


Fig. IV.1: Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluant

La figure (IV.1) illustre un schéma de simulation d'un réseau électrique alimentant une charge non linéaire, avec l'intégration d'un filtre actif parallèle. La détection des courants de la source est assurée par la méthode de contrôle direct de puissance, tandis qu'un régulateur PI est utilisé pour maintenir la tension continue aux bornes du condensateur.

Réseau électrique	$V=100*\sqrt{2/3}$ $f=50$ Hz $R=0.42 \Omega$ $L=2.5e-3H$
Résistance et inductance de l'entrée du redresseur:	$R= 0.2 \Omega$ $L =1e-3$ (H)
Pont de Gréât alimentant une charge R-L série:	$R=0.9\Omega$ $L= 4e-3H$.
Filtre parallèle	$V=120V$, $L=1.1e-3F$, $R=0.4\Omega$, $L_f=5e-3H$, $f=50$ H z
Commande hystérésis	$H=\mp 0.01A$
Régulateur PI	$K_p=39.08$, $K_i= 0.29$

Tableau (IV. 1): Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.

Le calcul des puissances actives et réactives instantanées est basé sur la mesure des tensions et des courants de source.

La figure (IV.2) montre le schéma bloc de la commande DPC en MATLAB/SIMULINK comme suit :

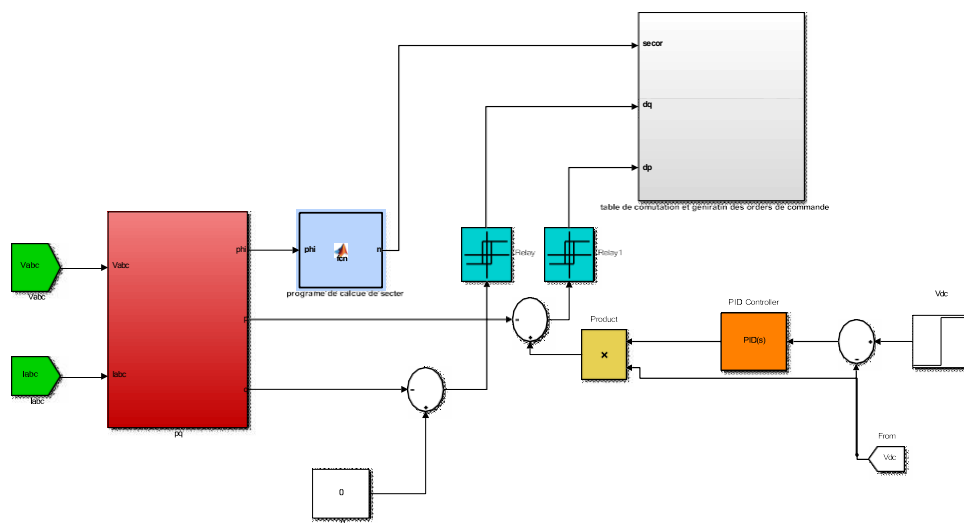


Figure IV.2 Schéma bloc de commande DPC

La transformation des systèmes triphasé en biphasé sous Matlab-Simulink comme suit

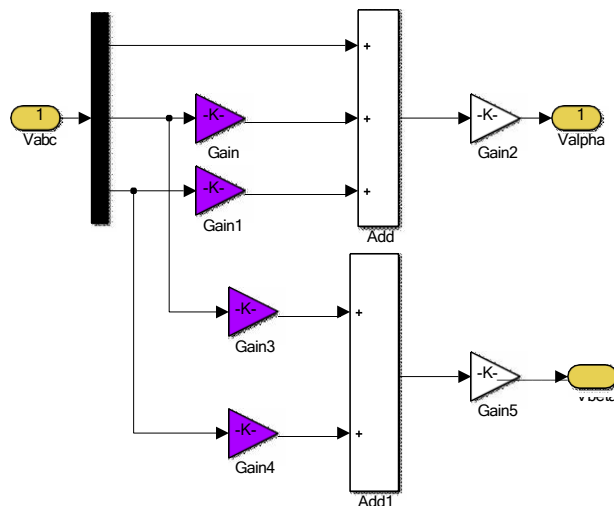


Figure IV.3 Schéma bloc des transformations des systèmes triphasé en biphasé

IV.3 Résultats de simulation sous Matlab-Simulink:

En utilisant les paramètres précédents sur notre bloc Simulink pour l'extraction des courbes (avant et après le filtrage), donc les résultats de simulation sont présentés sur les figures suivante : On prendre le temps de la simulation ($t=0.2s$).

IV.3.1 Comportement du FAP en régime permanent:

IV.3.1.1 Compensation des courants harmoniques

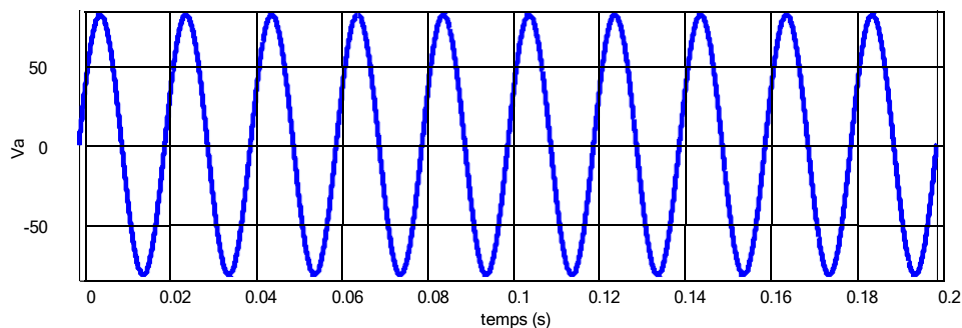


Figure IV.4 la tension de source.

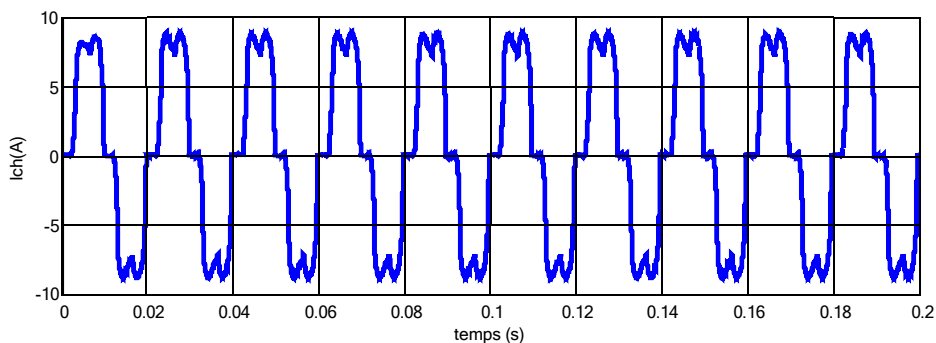


Figure IV.5 Courant de charge avant le filtrage

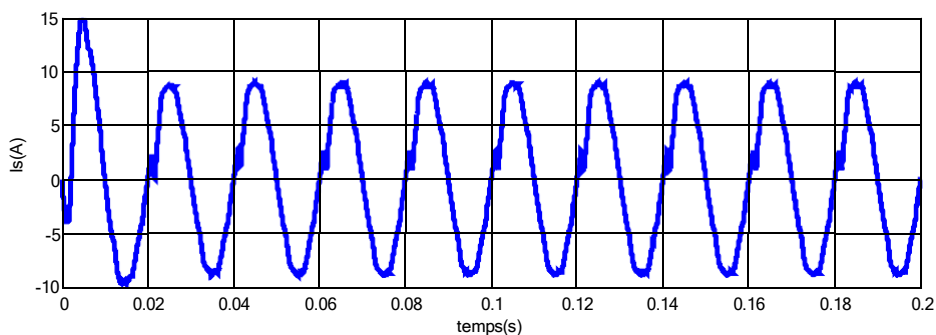


Figure IV.6 Courant source Is après filtre.

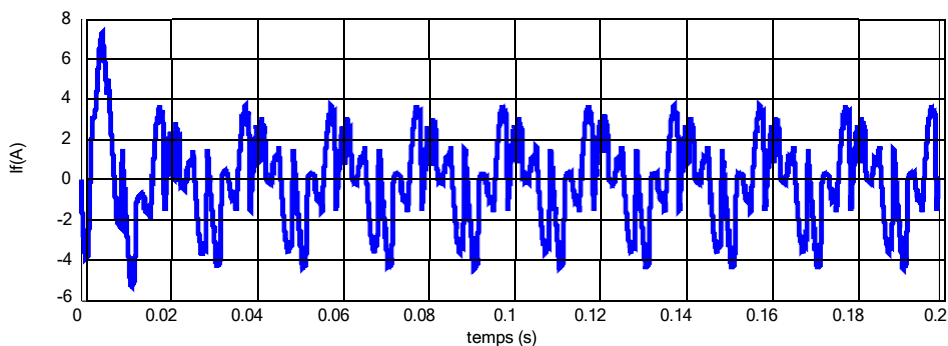
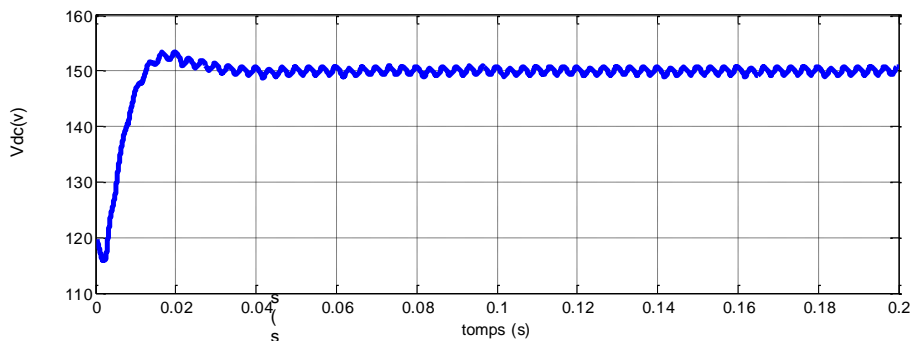
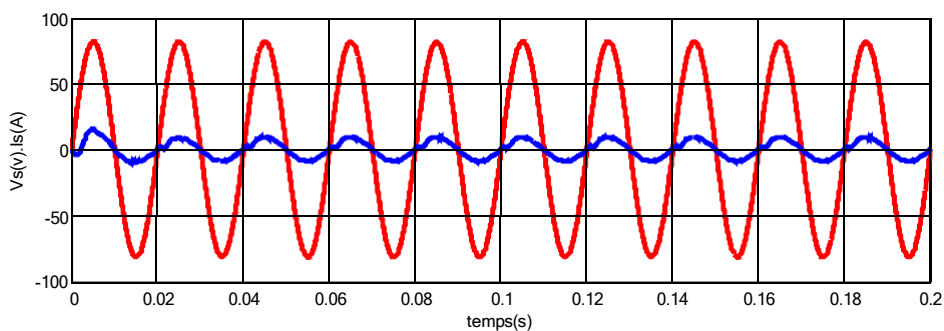


Figure IV.7 Courant de harmonique injecté par le filtre



figureIV.8 La tension aux bornes du condensateur



FigureIV.9 Résultats de simulations de: I_s : Courant de source et V_s : Tension de source.

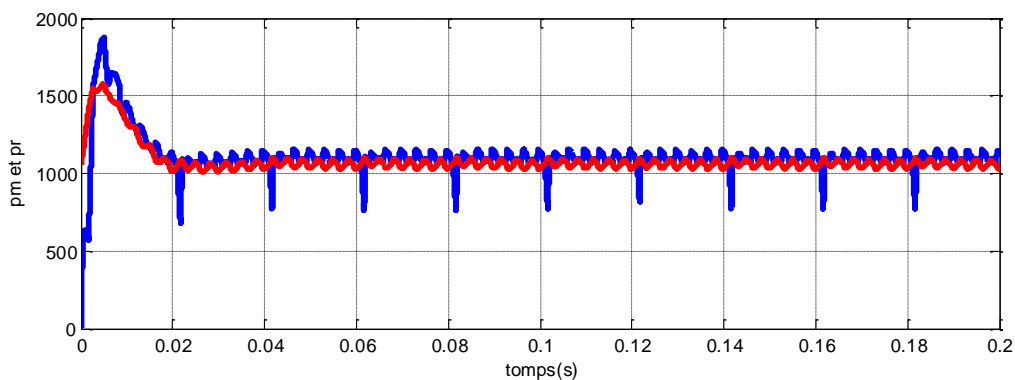


Figure IV.10 Résultats de simulations de : p_m et p_r .

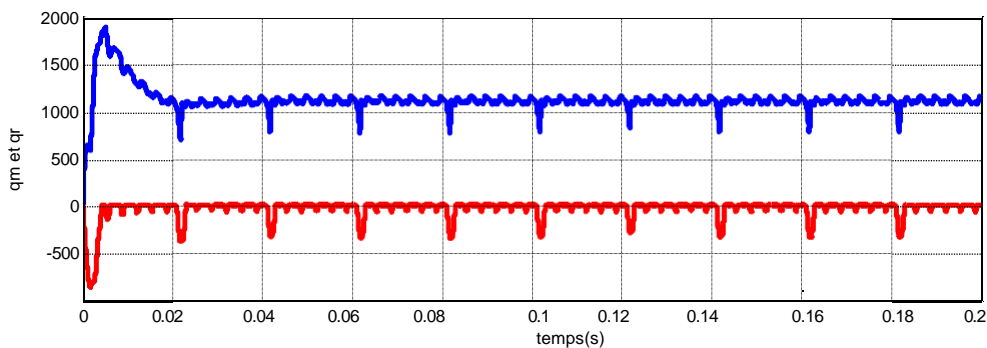


Figure IV.11 Résultats de simulations de : q_m et q_r .

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesuré, = 25.41 %

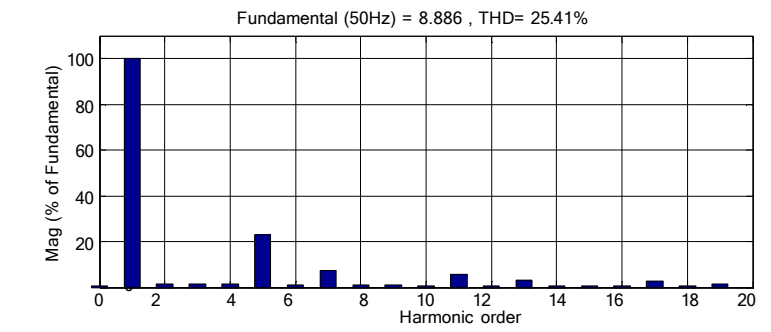


Figure IV.12 THD avant le filtrage

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesuré = 4.37%.

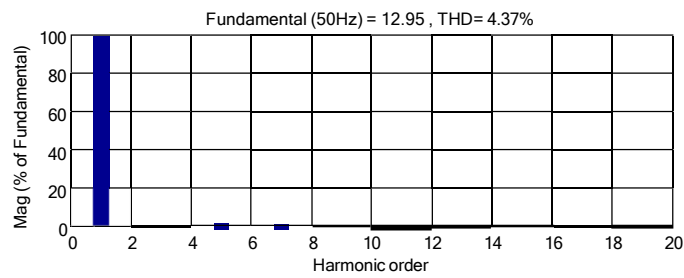


Figure IV.13 THD après le filtrage.

IV.4. Comportement du FAP en régime dynamique (changement de la charge)

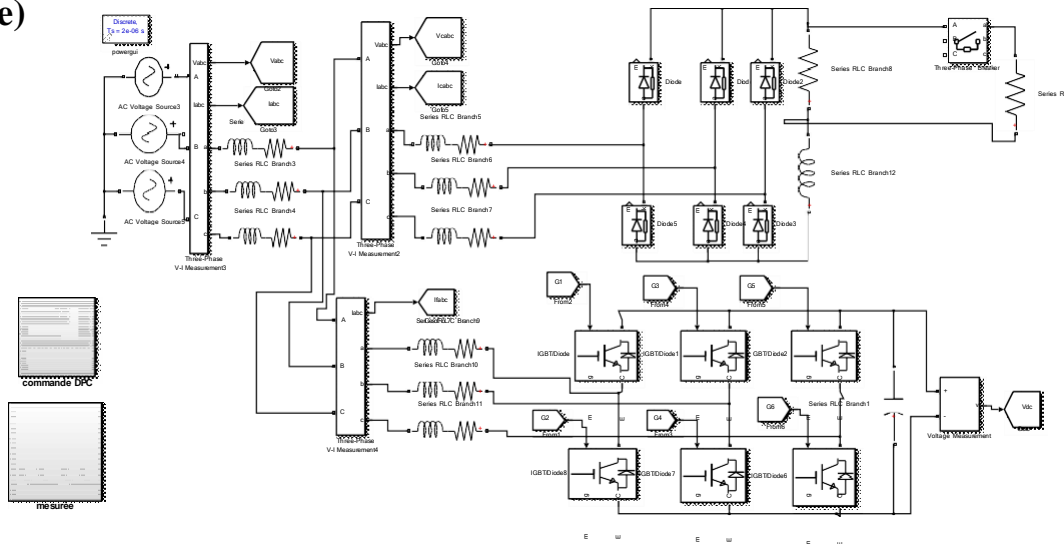


Figure IV.14 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluant avec charge

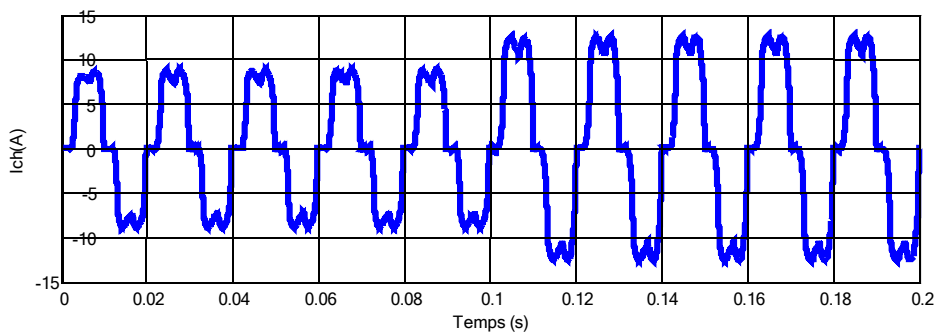


Figure IV.15 Courant de charge avant le filtrage

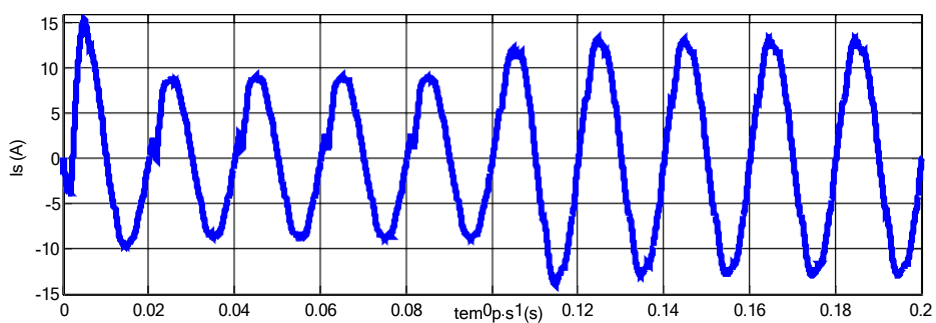


Figure IV.16 Courant source Is après filtre et son analyse spectrale

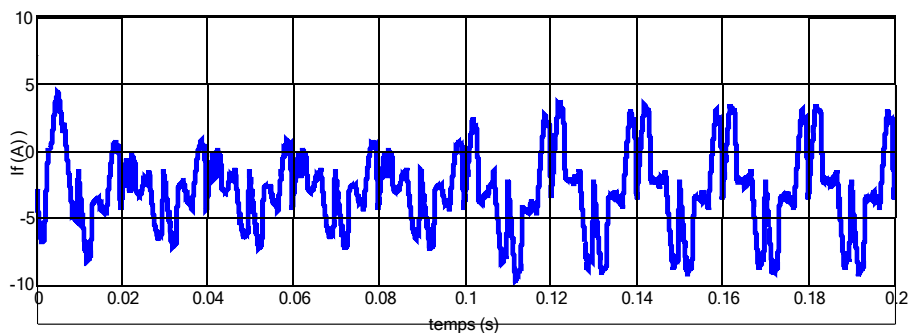


Figure IV.17 Résultats de simulations de: Courant de harmonique

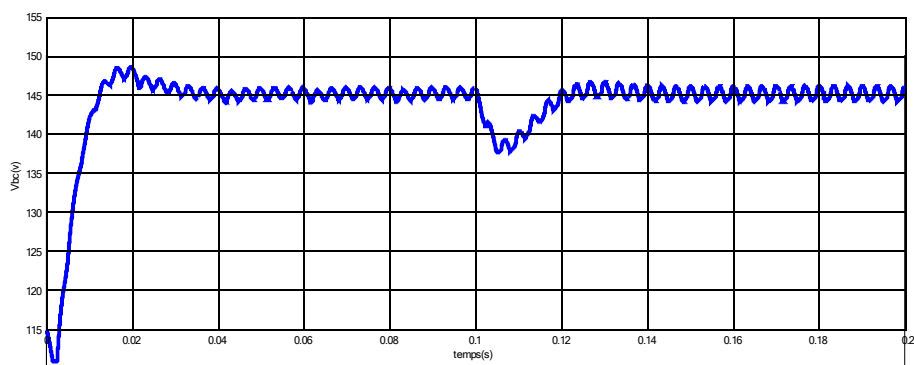


Figure IV.18 Tension aux bornes du condensateur

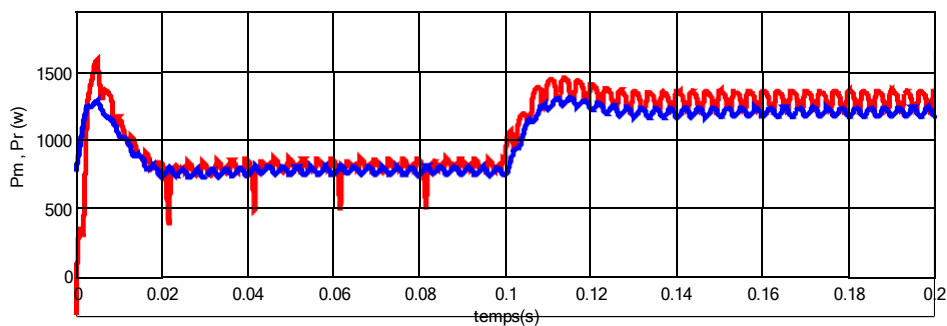


Figure IV.19 Résultats de simulations de : p_m et p_r

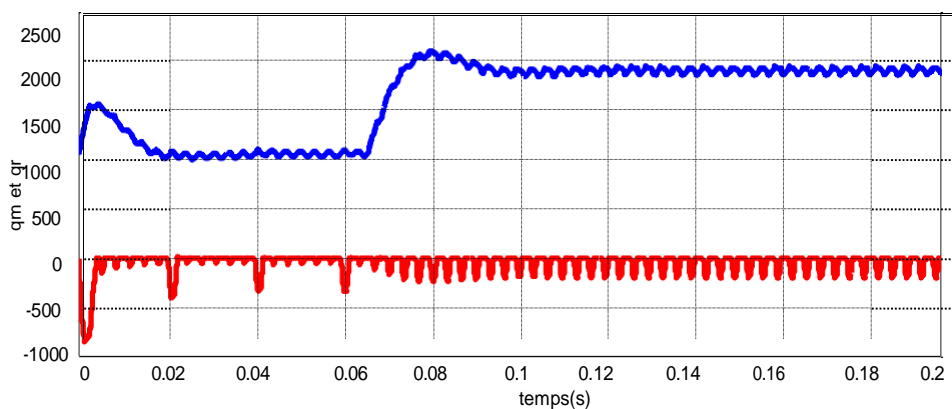


Figure IV.20 Résultats de simulations de : q_m et q_r

IV.5 Interprétations des résultats :

Les résultats de simulation présentés dans les figures ci-dessus, relatifs à la compensation des courants harmoniques à l'aide d'un filtre actif parallèle commandé par la méthode de contrôle direct de la puissance (DPC) combinée à un régulateur PI, permettent de constater que :

A. En régime permanent :

Dans la figure (IV.4), on observe l'évolution de tension de la source.

La figure (IV.9) montre que le courant présente une forme quasi sinusoïdale, bien qu'un pic soit observé au démarrage. Par ailleurs, après compensation, le courant de source devient pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension de source, traduisant ainsi une excellente correction du facteur de puissance. Cela témoigne de l'efficacité du filtrage assuré par le filtre actif parallèle (FAP).

La figure (IV.12) illustre le spectre harmonique du courant de source avant filtrage, tandis que la figure (IV.13) présente celui après filtrage. Il est évident que, avant filtrage, le courant de source contient une forte concentration d'harmoniques d'ordre impair (de type $2k+1$, avec k allant de 2 à 9). Après filtrage, le taux de distorsion harmonique (THD) est réduit à 4.37%, ce qui démontre la conformité aux exigences de la norme IEEE 519- 1992.

Après l'insertion du FAP la figure (IV.9):le courant, et la tension deviennent en phase (compensation de la puissance réactive), ce qui nous donne un bon facteur de puissance proche de l'unité. Aussi nous remarquons que la tension du bus continu est régulée par un régulateur PI.

D'après les figures (IV.8) et (IV.18), on observe qu'avant l'activation du filtre actif, la tension du bus continu est d'environ 100 V. Cette tension correspond à une pré charge de la capacité du bus, réalisée pour éviter toute surtension liée à un courant d'appel important lors de l'insertion. Une fois le filtre actif enclenché, la tension se stabilise à 150 V et suit de manière précise la valeur de référence.

Avant l'insertion du filtre actif parallèle (FAP), la figure (IV.5) montre que le courant de charge présente une distorsion significative. En revanche, après l'insertion du filtre, comme le montre la figure (IV.6), une amélioration considérable de la forme d'onde du courant de source est observée. Ce dernier devient quasi sinusoïdal, ce qui indique une compensation efficace des harmoniques. Les petits pics périodiques qui apparaissent sont liés aux commutations des semi-conducteurs

Commande	Charge	% Avant filter	% Après filtre
Commande DPC	Charge R-L	25.41	4.37

Tableau (IV.2):Les résultats des simulations.

B. En régime dynamique

Les résultats présentés dans les figures (IV.5), (IV.7), (IV.8), (IV.6) et (IV.18) sont très convaincants concernant les dépassements et les temps de réponse. De plus, ces figures démontrent que le courant de source conserve une forme quasi sinusoïdale malgré les variations de charge

IV.6 conclusion :

Ce chapitre a présenté et interprété les résultats de simulation concernant le réseau, le filtre actif parallèle et la charge polluante. Le filtre, commandé par la méthode de contrôle direct de la puissance (DPC), a permis de réduire le taux de distorsion harmonique du courant de source de 25.41% à 4.37% dans le cas d'une charge R-L. De plus, les performances du filtre actif parallèle se sont avérées excellentes même en présence de variations de charge. Le régulateur PI a efficacement assuré la stabilisation de la tension du bus continu dans les différents modes de fonctionnement. Par ailleurs, le filtre a contribué à une amélioration notable du facteur de puissance

Conclusion général

Dans un contexte où les réseaux électriques modernes sont de plus en plus sollicités par des charges non linéaires et des équipements électroniques de puissance, la qualité de l'énergie devient un enjeu crucial pour garantir la fiabilité, l'efficacité et la durabilité des systèmes. Les distorsions harmoniques engendrées par ces charges affectent non seulement la forme des signaux électriques, mais provoquent également des pertes d'énergie, une dégradation du facteur de puissance, un échauffement des équipements, ainsi que des dysfonctionnements dans les systèmes de mesure et de commande.

Ce mémoire a abordé cette problématique à travers l'étude, la conception et la simulation d'un filtre actif parallèle (FAP) commandé selon la stratégie du Contrôle Direct de la Puissance (DPC). Le choix de cette approche s'est justifié par sa capacité à offrir une régulation rapide et directe des puissances active et réactive, sans passer par des modulations complexes, tout en assurant une réponse dynamique adaptée aux variations du réseau.

Dans une première partie, nous avons présenté les différentes perturbations rencontrées dans les réseaux électriques, en particulier les harmoniques, leurs sources, effets, et les normes encadrant leur limitation. Ensuite, nous avons analysé les solutions classiques et modernes de filtrage, en mettant l'accent sur l'efficacité des filtres actifs dans les environnements industriels.

La seconde partie a été consacrée à la modélisation du filtre actif parallèle, en détaillant les deux composantes essentielles du système :

- La partie puissance, composée principalement de l'onduleur, du filtre de couplage et du système de stockage d'énergie.
- La partie commande, basée sur la détection des courants de référence, la régulation de la tension du bus continu et la génération des signaux de commande à travers la stratégie DPC.

La stratégie DPC adoptée repose sur le calcul des puissances instantanées, l'utilisation de contrôleurs à hystérésis pour limiter les erreurs de puissance, et l'identification du secteur de tension via la position du vecteur de la source. L'ensemble permet de sélectionner, en temps réel, le vecteur de commutation optimal pour l'onduleur.

Dans la dernière partie, les résultats de simulation sous Matlab/Simulink ont validé les

performances du système. Le filter actif a réussi à :

- Réduire le taux de distorsion harmonique (THD) de 25,41 % à 4,37 %,
- Améliorer le facteur de puissance en rendant le courant source quasi sinusoïdal et en phase avec la tension,
- Assurer une régulation efficace de la tension du bus continu via un régulateur PI
- Maintenir des performances stables même en régime dynamique, lors de changements soudains de la charge.

Ces résultats démontrent que la combinaison du FAP et de la commande DPC constitue une solution efficace, adaptable et prometteuse pour le traitement des perturbations dans les réseaux électriques modernes.

Références Bibliographiques

- [1] g. desquilbet, c. foucher, p. fauquembergue, « statistical analysis of voltage dips », notes edf, 1995.
- [2] mr.galou elhacene, melle. hamani rachida ., " contribution a la commande d'un filtre actif parallèle", mémoire de fin d'étude université Abderrahmane mira- Bejaia, 2017.
- [3] t. deflandre et p. maurs " les harmoniques sur les réseaux électriques ", direction des études et recherche en france - edition eyrolles, 1998.
- [4]m. m. Abdeslam, "structures et strategies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales", thèse de doctorat, université henri poincare, nancy-i, mai 2008
- [5] ben Ali Sofiane, bouhanak saddam, " étude et simulation d'un filtre actif parallèle a quatre fils", mémoire master de université echahid hama lakhder d'el-oued , 2015.
- [6] zaiter rida mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme d'ingenieur d'etat en génie électrotechnique université de m'sila 2008/2009.
- [7] power quality improvement using custom power devices – *springer*, 2016
- [8] thierry gouraud, « identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », thèse de doctorat de l'école centrale de nantes, 7 janvier 1997
- [9] c. lott, o. lapierre, h. pouliquen et s. saadate, « filtrage actif des harmoniques en courant et en tension des réseaux électriques: modelisation, simulation numérique et expérimentation », dec1997, pp.2433-2457.
- [10] Mohamad alaa eddin alali, « contribution a l'étude des compensateurs actifs des reseaux électriques basse tension », thèse de doctorat de l'université de louis pasteur Strasbourg, 12 septembre 2002
- [11] sahli abdeslem " filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systemes photovoltaïques interconnectes au réseau". magistère de l'université Ferhat Abbas, Sétif, 2012.
- [12] Abdelmadjid chaoui " filtrage actif triphasé pour charges non lineaires" doctorat de l'université de Sétif; 2010.
- [13] mesbahi nadhir "contribution a l'étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les réseaux de distribution" doctorat, doctorat de l'université de Annaba, 2014
- [14] Abdelmadjid chaoui " filtrage actif triphasé pour charges non linéaires" doctorat de

l'université de Sétif; 2010.

[15] ghosh, a., & ledwich, g. (2002). power quality enhancement using custom power devices. Springer

[16] Math H. J. Bollen (2003). *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Wiley-IEEE Press

[17] IEEE Power Engineering Society. (2006). *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality (IEEE Std 1159-2009)*

[18] El-Hawary, M. E. (2008). *Electrical Power Systems: Design and Analysis*. CRC Press.

[19] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2002). *Power Electronics: Converters Applications, and Design*. Wiley

[20] Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuña, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*

[21] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2002). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. Wiley.

[22] Galli, S., Scaglione, A., & Wang, Z. (2011). For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid.

[23] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). (2006). *EN 50160: Voltage characteristics in public distribution systems*

[24]Kastha, D., & Patnaik, M. S. (2008). Power factor improvement and harmonic reduction using active filters. *International Journal of Electric al Power & Energy Systems*,

[25]Singh, B., Al-Haddad, K., & Chandra, A. (1999). A review of active filters for power quality improvement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*

[26]Grady, W. M., & Santoso, S. (2001). Understanding power system harmonics. *IEEE Power Engineering Review*

[27]Mokhtari, H., Golkar, M. A., & Hosseini, S. H. (2016). Harmonic current compensation using three-phase active power filters in distribution networks. *International Transactions on Electrical Energy Systems*

[28]Singh, B., & Verma, V. (2020). Review on control strategies of active power filters for power quality improvement. *Journal of Power Electronics*

[29]Mehdi, M., & Ghodelbourk, S. (2021). Advanced inverter structures in active filters for harmonic mitigation.