



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude
Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : *Sciences et Technologie*

Filière : *Electrotechnique*

Spécialité : *Commande Electrique*

Thème

Commande Directe de Puissance d'un Filtre
Actif Parallèle

Soutenu le : Septembre 2020

Dirigé par :

Dr. BEKAKRA Youcef

Réalisé par :

- BAHY Mounib

- HANI Hicham

-BAATOUT Tarek

Année universitaire : 2019/2020

RESUME

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupant avec l'accroissement de l'usage des charges non-linéaires. Le filtrage actif parallèle de puissance est l'un des solutions les plus efficaces face à ce problème. Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions qui permettent l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique lorsque le réseau est perturbé et déséquilibré en tension. Les résultats de simulation montrent les performances et efficacités de la commande directe de puissance.

Mots clé : Qualité de l'Energie Electrique, Filtre Actif Parallèle, Commande Directe de Puissance, Réseau Perturbé.

ABSTRACT

The problem of harmonic pollution in electrical distribution networks is becoming more and more worrying with the increase in the use of non-linear loads. Power parallel active filtering is one of the most effective solutions to this problem. The work presented in this dissertation is part of the search for new solutions that improve the quality of electrical energy when the network is disturbed and unbalanced in voltage. The simulation results show the performance and efficiency of direct power control.

Keywords: Quality of Electrical Energy, Parallel Active Filter, Direct Power Control, Disturbed Network.

الملخص

أصبحت مشكلة التلوث التوافقي في شبكات التوزيع الكهربائي أكثر إثارة للقلق مع زيادة استخدام الأحمال غير الخطية. يعد التصفية النشطة المتوازية للطاقة أحد أكثر الحلول فعالية لهذه المشكلة. العمل المقدم في هذه الرسالة هو جزء من البحث عن حلول جديدة تعمل على تحسين جودة الطاقة الكهربائية عند تعطل الشبكة وعدم توازنها في الجهد. تظهر نتائج المحاكاة أداء وكفاءة التحكم المباشر في القدرة.

الكلمات المفتاحية : جودة الطاقة الكهربائية ، التصفية النشطة الموازية ، التحكم المباشر في الطاقة ، الشبكة المضطربة.

Remerciement

*Nous tenons à exprimer nos remerciement et nôtres profondes gratitudes avant tout à **ALLAH** le tout puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Dr. BEKAKRA Youcef** pour avoir proposée ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.*

Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

On remercie aussi tous l'encadrement du département de génie électrique et en particulier nos enseignants qui ont assuré notre formation pour ce qu'on attend d'eux,

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral.

Dédicace

À qui consacrerions-nous cet humble travail si ce n'était pour nos chers parents,

Qui sacrifie, tendresse, amour, patience, soutien, le laid et

L'encouragement est au cœur de notre succès. Sans eux, nous ne serions pas

Ce que nous sommes aujourd'hui. que Dieu les garde.

Nous dédions également ce travail:

À mes chères sœurs.

À mes chers frères.

*À mes chers amis Yousef, Ali Tlili, Anouar, Salah, Dina, Abd Allah, Walid,
Kaise, Mouradj.*

À tous ceux qui sont publiquement chers.

Hani Hicham

Tout d'abord, louez le Bon Dieu qui m'a donné l'opportunité et la force de poursuivre mes études Je dédie cet humble travail au fruit de notre carrière universitaire :

- *À mon cher père, qui m'a soutenu et s'est tenu à mes côtés tout au long de ma vie scolaire.*
- *À ma très chère maman, qui m'a permis de devenir qui je suis aujourd'hui, car tout succès dans ma vie est dû aux aimables sacrifices de ma mère, je n'en dirai pas assez pour exprimer sa gratitude alors merci maman.*
- *À mes chères grand-mères*
- *À mes oncles et ma tante*
- *À mes frères et leurs femmes: Hicham (Soumia), Houssam (Labiba)*
- *À mes chères sœurs : ibtissam et samah*
- *À mon petit frère, Moayed El'islam*
- *À mes neveux: Touka , Mouhammad al-Bashir, Ayham, Adam, Miral.*
- *À mes ami et à mes prochess : Hicham, tarek, Rachad ,Tahar, Ali, Flako , Raid , fawzi , nouou , yazid , riadh , lbay , farok, foad , ramzi , mouhamed , adel , aymen , baha , zaza , khaled. ...*
Etc
- *À mes collègues de travail: Ali, Ayoub, Al-Aroussi, Mourad, Kamal, Mouhammad*
 - *À tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.*
- *À tous ceux qui veulent me voir le plus de succès dans ma vie.*

Bahi Mounib

Je dédie ce mémoire

À mes chers parents.

À mes frères et sœurs.

À ma petite sœur.

Baatout Tarek

Liste des Figures

Figures du Chapitre I

Figure I.1 : Creux et coupure de tension.	5
Figure I.2 : Fluctuations de tension.	6
Figure I.3 : Déséquilibre en amplitude et en phase.	7
Figure I.4 : Variation de fréquence.	7
Figure I.5 : Forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé.	9
Figure I.6 : Décomposition d'un signal périodique.	9
Figure I.7 : Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante.	13
Figure I.8 : Structure du filtre résonant.	15
Figure I.9 : Montage du filtre amorti.	16
Figure I.10 : Filtre actif parallèle.	18
Figure I.11 : Filtre actif série.	19
Figure I.12 : Filtre combiné parallèle-série (UPQC).	20
Figure 1.13 : Montre l'une des configurations les plus récentes.	21

Figures du Chapitre II

Figure II.1: Principe de filtre actif parallèle.	23
Figure II.2: Structure générale du FAP.	24
Figure II.3: Onduleur de tension triphasé.	25
Figure II.4 : Circuit de puissance du filtre actif parallèle.	26
Figure II.5 : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.	28
Figure II.6 : Synoptique de la PLL.	29
Figure II.7 : Schéma simplifié de la PLL.	30
Figure II.8 : Schémas de régulation de la tension du bus continu par un PI :	32
Figure II.9 : Synoptique de contrôle du FAP avec la commande DPC.	34
Figure II.10 : Comportement d'un contrôleur de puissance à hystérésis à deux niveaux.	35
Figure II.11 : Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel.	35
(α , β), divisé en douze (12) secteurs.	36

Figures du Chapitre III

Figure III.1 : Contrôle du FAP par la commande DPC	38
Figure III.2 : Résultats de la simulation de la tension source (V_s), de la courante source (I_s), du courant de charge (I_c), du courant du filtre (I_f), du filtre activé à $t = 0,05$ s	40
Figure III.3 : Résultats de simulation de la tension du bus continu V_{dc} , la puissance active P , réactive q et leurs références avant et après la mise en service du FAP à $t = 0.05$ s	40
Figure III.4 : Analyse FFT de la courante source avant filtrage.....	41
Figure III.5 : Analyse FFT de la courante source après filtrage.....	41
Figure III.6 : Simulation de la tension source sur les coordonnées stationnaires ($e\alpha$, $e\beta$), l'angle de phase et les secteurs	42
Figure III.7 : Résultats de la simulation de la tension source (V_s), de la courante source (I_s), du courant de charge (I_c), du courant du filtre (I_f), de la variation de pas de la charge à $t = 0.1$ S.....	43
Figure III.8 : Résultats de simulation de la tension du bus continu V_{dc} , la puissance active P , réactive q et leurs références, variation échelonnée de la charge à $t = 0.1$ s.	44
Figure III.9 : Résultats de la simulation de la tension source (V_s), de la courante source (I_s), du courant de charge (I_c), du courant du filtre (I_f), de la variation de pas de la charge à $t = 0,1$ s.....	45
Figure III.10: Résultats de simulation de la tension du bus continu V_{dc} , la puissance active P , réactive q et leurs références, variation échelonnée de la charge à $t = 0,1$ s.....	45

Liste des Tableaux

Tableaux du Chapitre I

Tableau I.1 : Effet des harmoniques sur quelques matériels	10
--	----

Tableaux du Chapitre II

Tableau II.1 : Tensions en sortie de l'onduleur.....	28
Tableau II.2 : Table de commutation pour la DPC classique	37

Tableaux du Chapitre III

Tableau III.1 : Paramètres de simulations du FAP.....	39
---	----

LISTE DES SYMBOLES

V_s :	tension de source.
f_n :	fréquence fondamentale.
i_s :	Courant de source.
P :	puissance active.
S :	puissance apparente.
Q :	la puissance réactive associée au courant fondamental.
D :	la puissance déformante due aux harmoniques du courant.
C_{dc} :	Capacité du condensateur.
L_s :	Inductance du réseau.
k_{pdc}, k_{idc} :	Les constants du régulateur PI de la tension continue.
V_{dc} :	Tension continue de l'onduleur.
d, q :	Repère tournant de Park.
θ :	Position angulaire.
L :	Inductance.
C :	Capacité.
R :	Résistance.
R_f :	Résistance du filtre de sortie.
L_f :	Inductance du filtre de sortie.

LISTE DES ABREVIATIONS

IGBT: Insulated-Gate Bipolar Transistor.

PI: Proportional Integral.

DPC: Direct power control.

DTC: Direct Torque Control.

FAP: Filtre Actif Parallèle.

PLL: Phase Locked Loop.

FAS: Filtre Actif Série.

THD: Total Harmonic Distortion.

GTO: Enanglais Gate turn off thyristor.

F.P : Facteur de puissance.

Sommair

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

Généralité sur la Qualité d'Energie Electrique

I .1 Introduction :.....	3
I.2 Qualité de l'Energie Electrique :.....	3
I.3 Perturbation Electrique :.....	4
I.3.1 Creux et Coupure de Tension :.....	4
I.3.2 Fluctuation de Tension :.....	5
I.3.3 Déséquilibre du Système Triphasé :	6
I.3.4 Variation de Fréquence :	7
I.4 Origine des Harmoniques :	8
I.4.1 Sources Harmoniques Identifiables :	8
I.4.2 Sources Harmoniques non Identifiables :.....	8
I.4.3 Décomposition d'un Signal Périodique :	9
I.4.4 Les Effets des Harmoniques :.....	10
I.4.4.1 Les Effets Instantanés :.....	10
I.4.4.2 Les Effets à Terme :	10
I.5 Grandeurs Caractéristiques :.....	11
I.5.1 Grandeur Harmonique :.....	11
I.5.2 Rang de l'Harmonique :.....	11
I.5.3 Valeur Efficace d'une Grandeur Alternative :.....	12
I.5.6 Spectre d'Harmonique :	13
I.6 Conséquences de la Distorsion Harmonique :	14
I.7 Solutions de Dépollution du Réseau Electrique :.....	14
I.7.1 Solutions Traditionnelles :	14
I.7.1.1 Filtre Résonant :	15
I.7.1.2 Filtre Amorti :	15
I.7.1.3 Avantages des Filtres Passifs :	16
I.7.1.4 Inconvénients des Filtres Passifs :.....	16

I.7.2 Solutions Modernes :	17
I.7.2.1 Filtrage Actif :	18
I.7.2.2 Filtre Actif Parallèle (FAP) :	18
I.7.2.3 Filtre Actif Série (FAS) :	19
I.7.2.4 Combinaison Parallèle-Série Actifs (UPQC) :	19
I.7.2.5 Filtre Actif Hybride :	20
I.7.2.6 Avantages des Filtres Actifs :	21
I.7.2.7 Inconvénients des Filtres Actifs :	21
I.8 Conclusion :	22

CHAPITRE II

Modélisation et Commande Directe de Puissance (DPC) du Filtre Actif Parallèle.

II.1 Introduction:	23
II.2 Principe de Filtre Actif Parallèle (FAP) :	23
II.3 Structure Générale du Filtre Actif Parallèle :	24
II.3.1 Topologie Générale :	24
II.4 Etude de la Partie de Puissance :	25
II.4.1 Onduleur de Tension :	25
II.4.1.1 Structure Générale :	25
II.4.1.2 Tension Génère par l'Onduleur :	26
II.5 Structure de la PLL :	29
II.6 Contrôle de la Tension du Bus Continu V_{dc} :	31
II.6.1 Régulateur de Type Proportionnel-Intégral (PI) :	31
II.7 Stratégies des Commandes du FAP :	32
II.7.1 Etude du Contrôle Directe de Puissance du FAP(DPC)	32
II.7.2 Etat de l'Art de la Technique DPC :	33
II.7.3 Stratégie du Contrôle Direct de Puissance du FAP ;	33
II.7.4 Calcul des Puissances Instantanées :	34
II.7.5 Contrôleur à Hystérésis :	34
II.7.6 Choix du Secteur :	35
II.7.7 Table de Commutation :	36

II.8 Conclusion :	37
-------------------	----

CHAPITRE III

Résultats de Simulation

III.1 Introduction :	38
III.2 Schéma Synoptique de l'Association Filtre – Réseau – Charge Polluante :	38
III.3 Résultats de Simulation de la DPC Appliquée au FAP	39
III.3.1 Paramètres de Simulation :	39
III.4 Résultats des Simulations de Filtre Actif Parallèle par DPC :	39
III.4.1 Variation de Charge :	43
III.4.2 Variation de Vdc :	45
III.5 Conclusion	46
CONCLUSION GENERALE	47

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

A l'heure actuelle, l'utilisation des convertisseurs statiques (les redresseurs à diodes ou thyristors, les gradateurs, etc.), dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué aux progrès réalisés aux niveaux des performances et de l'efficacité de ces systèmes. Ces convertisseurs absorbent des courants non sinusoïdaux et entraînent de ce fait une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique.

En effet, la présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des perturbations au niveau des réseaux électriques. Les effets néfastes les plus connus de la pollution harmonique se résument dans le dysfonctionnement de certains équipements électriques : l'échauffement des conducteurs, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, et les phénomènes de résonance avec les éléments composant le réseau [1].

Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent :

- La réduction de l'impédance de court-circuit.
- La modification du convertisseur statique polluant en termes de la topologie et/ou de la commande afin d'intervenir directement à la source des perturbations harmoniques.
- Les dispositifs de filtrage [2].

Les filtres passifs sont traditionnellement placés pour absorber des courants harmoniques et pour relever le facteur de puissance. L'efficacité de ces derniers est limitée en terme de compensation. De plus, ils forment avec l'impédance du réseau, un circuit résonnant qui favorise l'amplification de tous les harmoniques ayant une fréquence voisine de celle de résonance.

Les filtres actifs de puissance sous leurs différentes structures à savoir le filtre actif parallèle, filtre actif série, et les filtres hybrides, répondent mieux aux contraintes industrielles, et s'adapte à l'évolution de l'impédance du réseau et de la charge.

Le filtre actif parallèle (FAP) est à ce jour la solution moderne et efficace de dépollution la plus adéquate pour restaurer la forme sinusoïdale du courant dans un réseau de distribution électrique. Le

FAP est utilisé pour compenser les courants harmoniques, courants déséquilibrés ainsi que de la puissance réactive [1].

- Dans le premier chapitre, nous identifions les différents problèmes effectuant la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux basse tension et leurs origines, nous présentons également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique.
- Au deuxième chapitre, nous étudions théoriquement la topologie la structure générale des FAP et sa stratégie ainsi que la commande directe de puissance d'un un Filtre Actif Parallèle.
- En finalement, nous simulons la commande directe de puissance d'un un Filtre Actif parallèle en utilisant MATLAB / Simulink, puis nous obtenons les résultats et les interprétons.

Chapitre I

Généralité sur la Qualité
d'Energie Electrique

I.1 Introduction :

Depuis de nombreuses années, le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle.

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants [3].

- ❖ La fréquence.
- ❖ L'amplitude des trois tensions.
- ❖ La forme d'onde. qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- ❖ Le déséquilibre. La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules Des trois tensions et de leur déphasage relatif.

I.2 Qualité de l'Energie Electrique :

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension [4].

La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

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

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

- ❖ Les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes.
- ❖ Les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes.
- ❖ Les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période [4].

I.3 Perturbation Electrique :

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension, caractérisée par sa fréquence, son amplitude et sa forme d'onde qui doit être sinusoïdale. La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées. Ces perturbations sont classées comme suit.

I.3.1 Creux et Coupure de Tension :

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation des réseaux électriques. Ils apparaissent également lors de manœuvre d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs transformateurs, etc). Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale, disparition

totale pendant une durée comprise entre 10 ms est une minute pour les coupures brèves, supérieur à une minute pour les coupures longues. La plus part des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure I.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension [5].

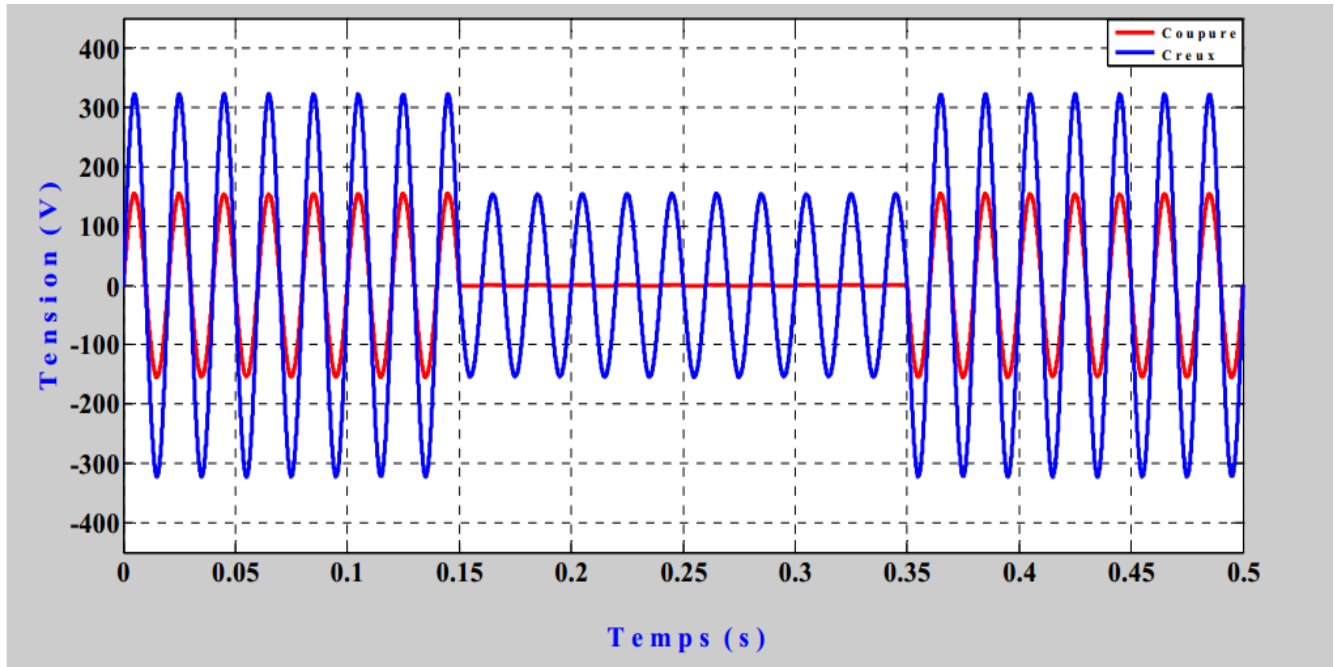


Figure I.1 : Creux et coupure de tension.

I.3.2 Fluctuation de Tension :

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension qui se produisent à des intervalles de temps de quelques centièmes de secondes. L'amplitude de la tension doit se situer dans une bande de $\pm 10\%$ de sa valeur nominale. Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière [6]. La figure I.2 montre un exemple d'une fluctuation de tension.

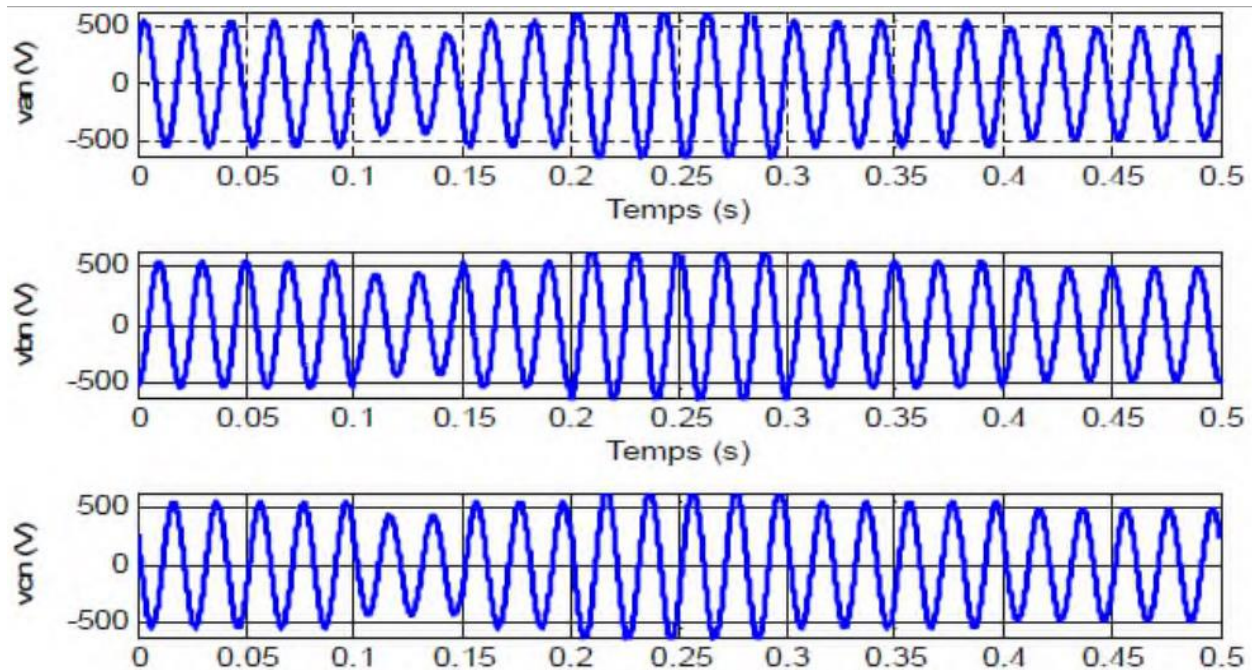
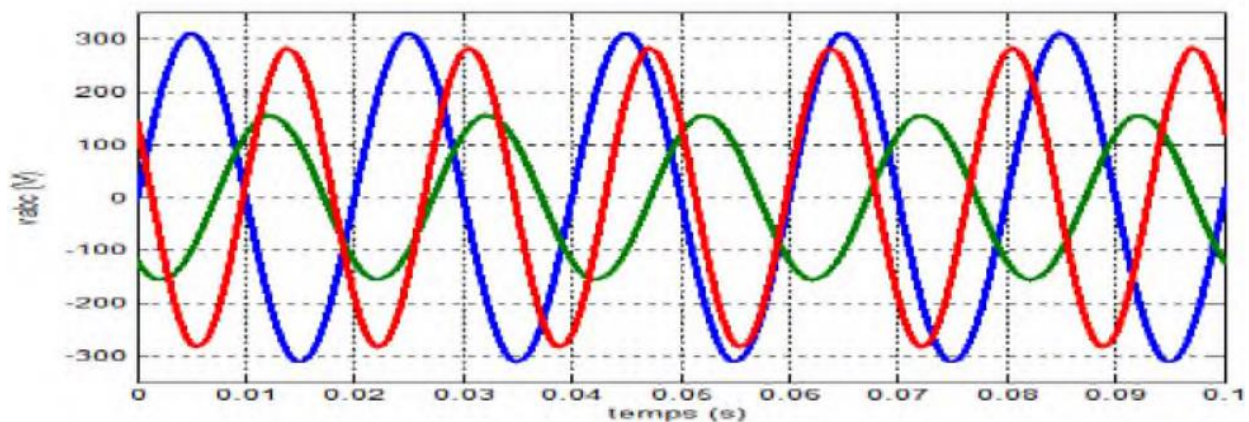


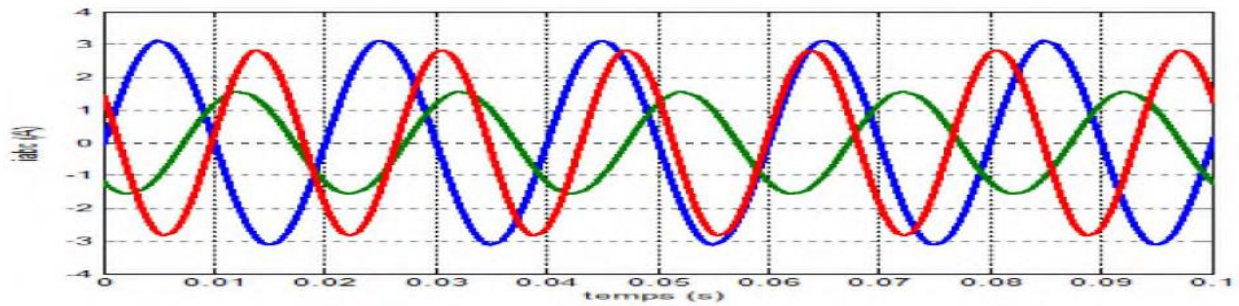
Figure I.2 : Fluctuations de tension.

I.3.3 Déséquilibre du Système Triphasé :

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera du déséquilibre du système triphasé. La figure I.3 (**a**- la courbe de la tension et **b**- la courbe du courant) représente respectivement, un exemple de déséquilibre de courants et de tensions d'un système triphasé.



a. la courbe de la tension



b. la courbe du courant

Figure I.3 : Déséquilibre en amplitude et en phase.

I.3.4 Variation de Fréquence :

Les réseaux de distributions ou de transport ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de $50 \text{ Hz} \pm 1\%$. La figure I.4 montre un exemple sur la variation de fréquence d'un réseau électrique.

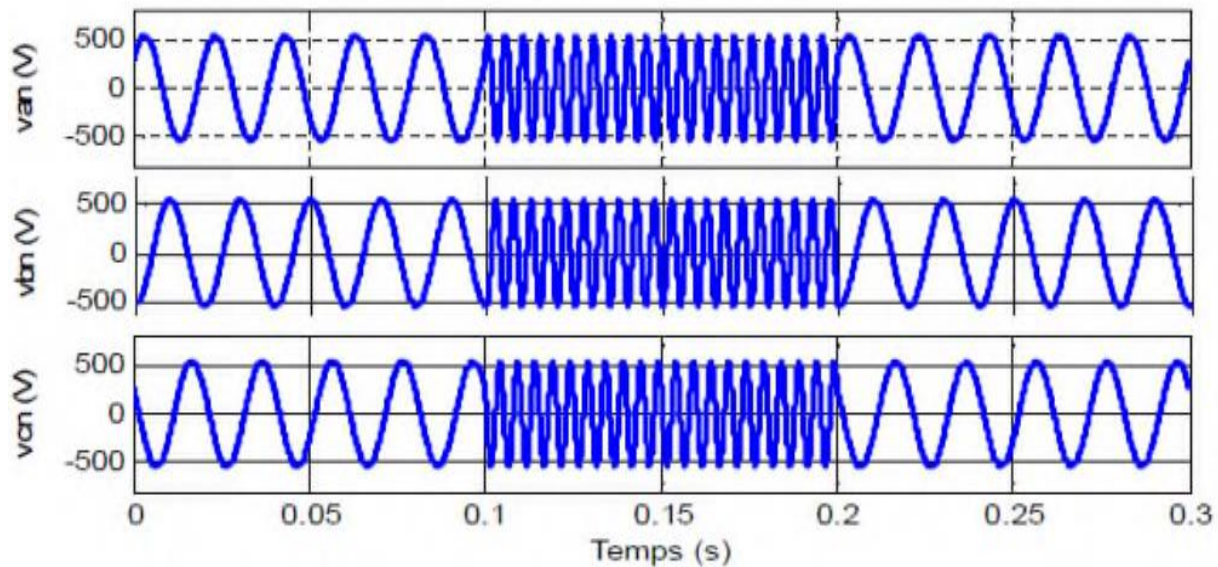


Figure. I.4 : Variation de fréquence.

I.4 Origine des Harmoniques :

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental [8]. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent [9].

Nous pouvons également observer des sous-harmoniques ou des inters harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale. La cause principale de l'existence des harmoniques de tension, comme on le montrera ultérieurement, est l'injection dans le réseau des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires. Il s'agit alors de sources génératrices de courants harmoniques qui peuvent être classées en deux types :

I.4.1 Sources Harmoniques Identifiables :

Les équipements dotés de dispositifs à base d'électronique de puissance, notamment les redresseurs et les cyclo convertisseurs de puissances importantes, installés sur les réseaux haute et moyenne tension sont typiquement des sources harmoniques identifiables. Avec ce type de charge non linéaire, le distributeur d'énergie est capable d'identifier le point d'injection des harmoniques et de quantifier la perturbation provoquée. Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui doit se procurer les moyens nécessaires afin de réduire cette perturbation au-dessous du seuil exigé par le distributeur de l'énergie sous peine d'être pénalisé [8]. Typiquement des sources harmoniques identifiables. Avec ce type de charge non linéaire, le distributeur d'énergie est capable d'identifier le point d'injection des harmoniques et de quantifier la perturbation provoquée. Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui doit se procurer les moyens nécessaires afin de réduire cette perturbation au-dessous du seuil exigé par le distributeur de l'énergie sous peine d'être pénalisé [8].

I.4.2 Sources Harmoniques non Identifiables :

Ce type de générateur de courants harmoniques est principalement représenté par les appareils utilisés dans les domaines électrodomestiques ou tertiaires tels que les téléviseurs et les micro-ordinateurs. Vue leur très large diffusion, ces équipements comportant souvent un redresseur monophasé à diodes avec un condensateur de lissage, prélèvent des courants harmoniques non négligeables. Dans ce cas, il est de la responsabilité du distributeur de l'énergie électrique d'empêcher

la propagation de la perturbation harmonique sur le réseau puisque individuellement chaque utilisateur génère un faible taux d'harmonique [8]. A titre d'exemple, la figure I.5 ci-dessous montre l'allure du courant absorbé par un ordinateur. Il est de forme impulsionnelle et riche en harmoniques et possède un taux de distorsion inadmissible.

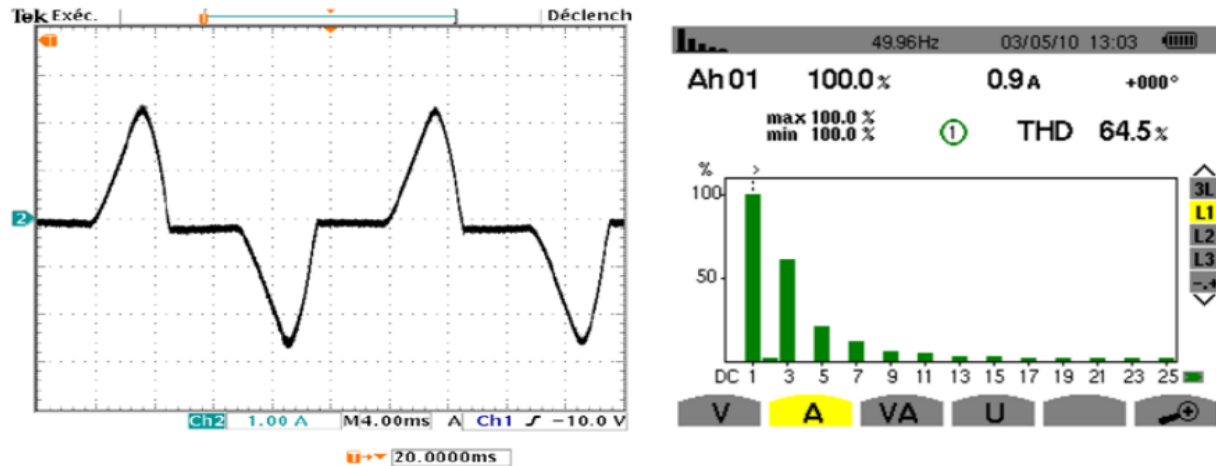


Figure I.5 : Forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé.

I.4.3 Décomposition d'un Signal Périodique :

Un signal déformé se compose généralement de plusieurs harmoniques, les courbes de la figure I.6 nous montrent la décomposition d'un signal périodique en série de FOURIER.

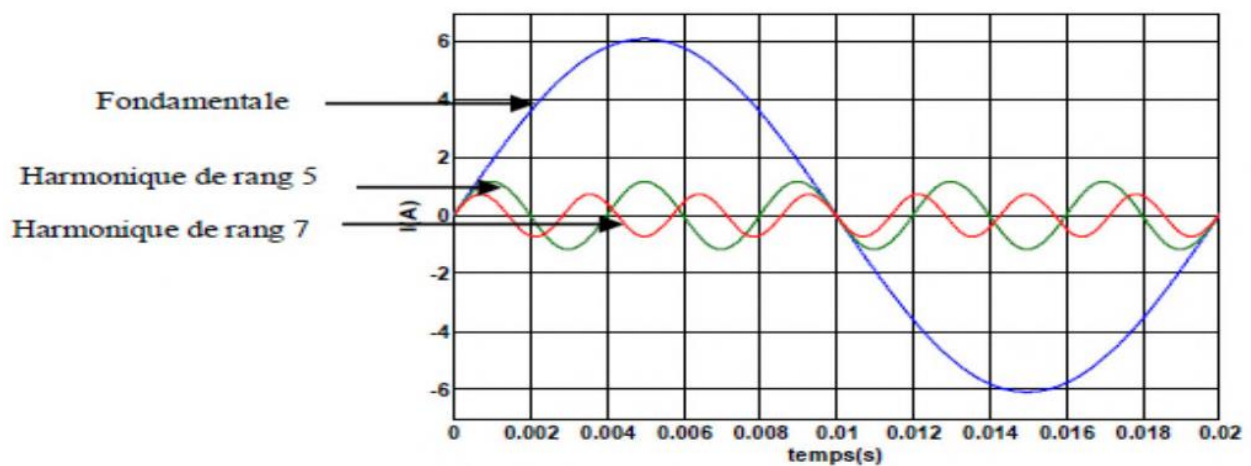


Figure. I.6 : Décomposition d'un signal périodique.

I.4.4 Les Effets des Harmoniques :

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. Un autre phénomène, de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3 [10].

I.4.4.1 Les Effets Instantanés :

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement. Par exemple, dans le cas des appareils électroniques, il peut s'agir d'une altération de l'image pour les écrans de télévision ou une altération du son s'il s'agit d'une chaîne HI-FI ou d'un téléphone. La précision des appareils de mesure est également affectée par la présence d'harmoniques [11].

I.4.4.2 Les Effets à Terme :

En prendre comme un exemple en explique : l'échauffement des câbles et des équipements, les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, entraînant une élévation de température. Parmi les causes de pertes supplémentaires, l'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence [11].

Tableau I.1 : Effet des harmoniques sur quelques matériels.

Nature du matériel électrique	Effet de la «pollution harmonique »
Machines tournantes Moteurs triphasés, alternateurs	Echauffements supplémentaires (effet Joule) dans les enroulements statoriques. Couples oscillatoires. Augmentation du bruit.
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques pairs.
Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et

multiples de 3. Pertes diélectriques supplémentaires.	
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristor, transistors, etc.)	Troubles fonctionnels à liés la forme d'onde (commutation, synchronisation).
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillessement prématuré des condensateurs
Lampes à décharge	Risque de vacillement
Dispositifs de protection (Fusibles. Disjoncteurs magnétothermiques...)	Fonctionnement intempestif
Ordinateur	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques
compteur d'énergie	Erreurs de mesure
Téléviseurs	Déformation d'image

I.5 Grandeurs Caractéristiques :

I.5.1 Grandeur Harmonique :

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental [12].

I.5.2 Rang de l'Harmonique :

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50Hz) :

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (I.1)$$

I.5.3 Valeur Efficace d'une Grandeur Alternative :

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative ($y(t)$) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique :

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T Y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2} \quad (I.2)$$

On note qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée (> 1 kHz).

I.5.4 Taux de Distorsion :

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{l=2}^n Y_l^2}}{Y_1} \times 100 \quad (I.3)$$

Y_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

Y_n : Les valeurs exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

I.5.5 Facteur de Puissance :

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements. Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D) entre en considération.

Elle est donnée par la relation :

$$D = V \cdot \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{sn}^2} \quad (I.4)$$

Le facteur de puissance est donc égal :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.5)$$

Avec

$$P = V \cdot I_{s1} \cdot \cos \varphi_1$$

$$Q = V \cdot I_{s1} \cdot \sin \varphi_1$$

On peut aussi calculer le facteur de puissance de la manière suivante :

$$FP = \frac{V \cdot I_{s1} \cdot \cos \varphi_1}{V \cdot I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \varphi_1 \quad (I.6)$$

On constate que la puissance déformante et la puissance réactive contribuent à la dégradation du facteur de puissance. [12]

I.5.6 Spectre d'Harmonique :

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme la figure I.7 [11].

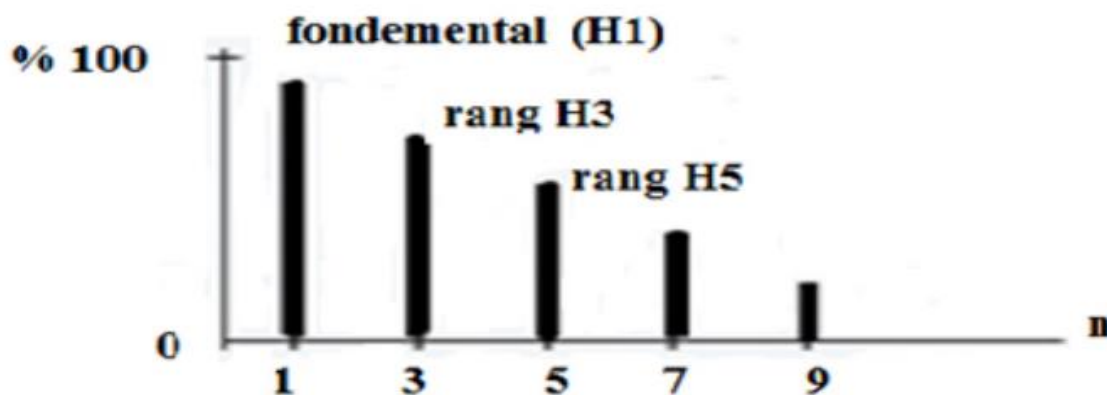


Figure I.7 : Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante.

Il est à noter que l'amplitude (l'énergie) des raies harmoniques décroît en fonction de leur rang.

I.6 Conséquences de la Distorsion Harmonique :

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance [12].

- Echauffement.
- Dysfonctionnement de certains équipements.
- Interférences dans les systèmes de communication.
- Excitation des résonances.

I.7 Solutions de Dépollution du Réseau Electrique :

Afin de compenser toutes les perturbations, deux méthodes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne sont présentés. Le filtrage est une méthode de réduction des missions harmoniques au sein d'un site industriel, où la distorsion harmonique a graduellement augmenté ou comme solution globale pour un nouveau site, donc le filtre est un absorbeur de courants harmoniques [13]. On distingue les techniques suivantes :

- les filtres passifs.
- les filtres actifs.
- les filtres hydrides

I.7.1 Solutions Traditionnelles :

Afin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions ont été proposées, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [14].

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation des convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- L'utilisation de dispositif du filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par les charges non-linéaires.

- Les filtres passifs : cette solution de dépollution consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs du filtrage les plus répandus, On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques :

- 1) Filtre passif résonnant.
- 2) Filtre passif amortie ou passe-haut.

I.7.1.1 Filtre Résonant :

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur. La figure I.8 montre clairement le montage de ce dernier ainsi que leurs impédances en fonction de la fréquence [15].

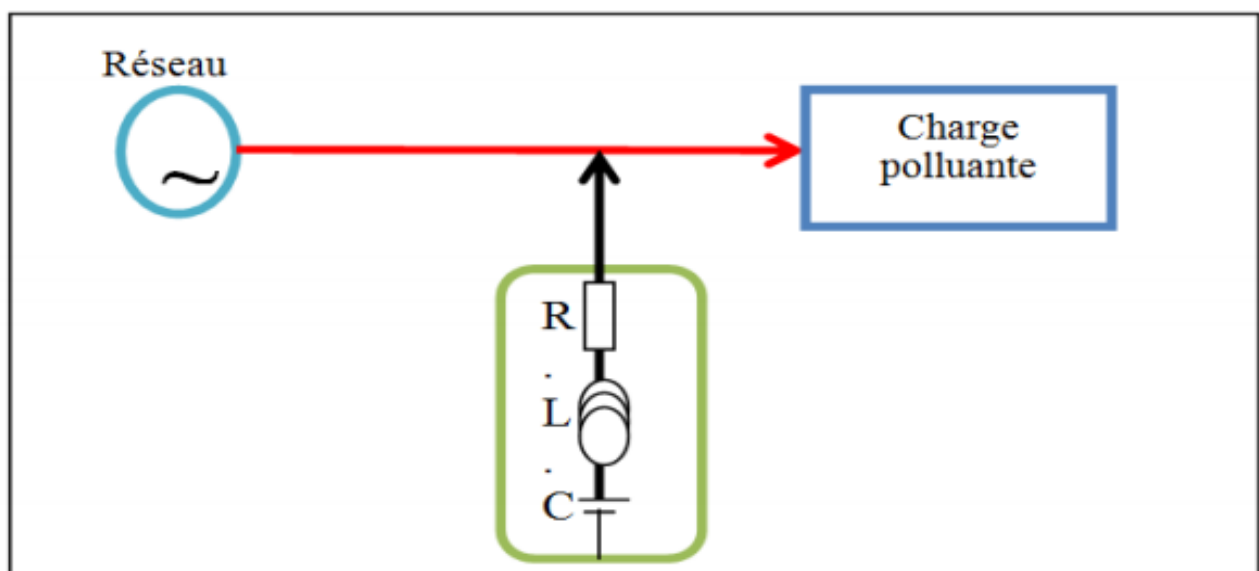


Figure I.8 : Structure du filtre résonant.

I.7.1.2 Filtre Amorti :

Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants [17].

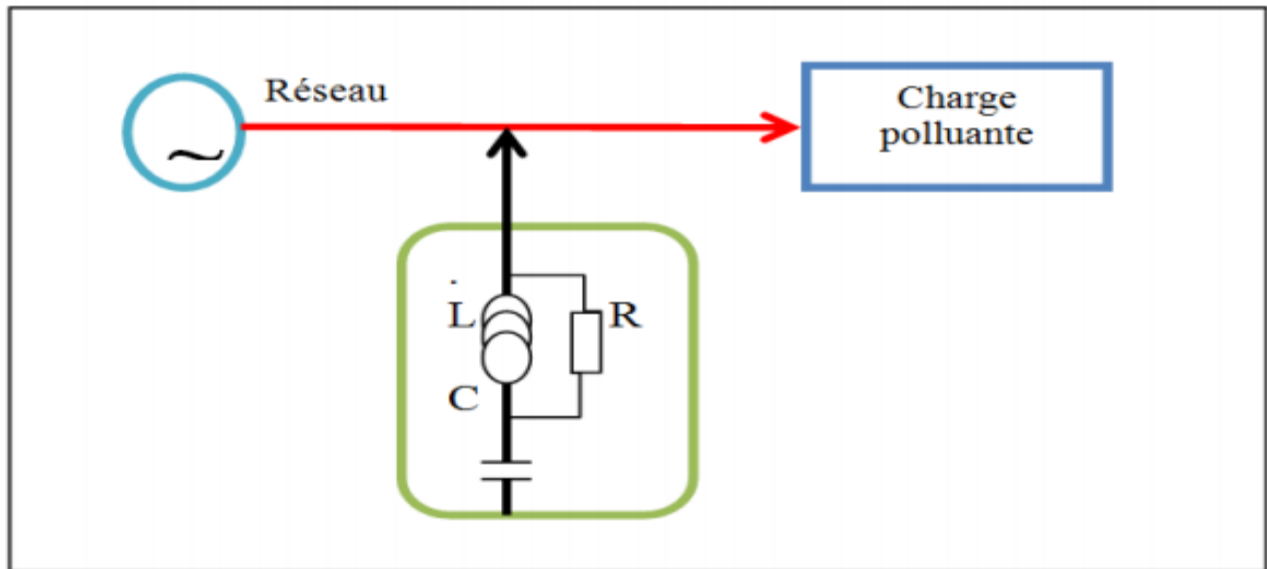


Figure I.9: Montage du filtre amorti.

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

I.7.1.3 Avantages des Filtres Passifs :

Bien que les filtres passifs n'éliminent pas les harmoniques dans une grande plage, néanmoins, il est utilisé en raison de certaines caractéristiques importantes qui sont décrits comme suit :

- Ils sont plus simples à configurer et à construire.
- Ils possèdent un faible coût initial et de maintenance (par rapport au filtre actif).

I.7.1.4 Inconvénients des Filtres Passifs :

Certains inconvénients majeurs des filtres passifs sont cités ci-dessous :

- La propriété et les caractéristiques du filtre dépendent de l'impédance de la source qui sont soumises à des variations dues à une condition externe.
- L'état de résonance dans le filtre peut créer un problème avec les charges et le réseau entraînant des fluctuations de tension.

- Il est fondamentalement capable d'enlever certaines composantes harmoniques particulières par le raccordement chaque fois que l'ampleur de cette composante harmonique est constante et le facteur de puissance FP du système est faible.
- La réponse du filtre est statique, c'est-à-dire, si la variation de charge introduit de nouvelles composantes harmoniques, le filtre doit être redessiné, ce qui augmente les coûts de maintenance et d'exploitation du filtre.
- Les problèmes de déséquilibre de la charge ne peuvent pas être résolus.

En raison des inconvénients cités ci-dessus et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, une nouvelle structure de filtres, appelée filtre actif de puissance est conçu pour générer des courants ou des tensions harmoniques de manière à ce que le courant est la tension du réseau soient sinusoïdaux et parfois opérant avec un facteur de puissance unitaire.

I.7.2 Solutions Modernes :

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs :

- Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle-série actifs : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension [18].

I.7.2.1 Filtrage Actif :

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorée par les constructeurs. Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé du réseau quasi sinusoïdal. Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs.

Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Dans ce qui suit, nous donnons les structures les plus utilisés dans la littérature, à savoir les filtres parallèle série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actifs -passifs [15].

I.7.2.2 Filtre Actif Parallèle (FAP) :

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution la figure I.10. Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques i_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure auto-adaptabilité, fiabilité et performance [16].

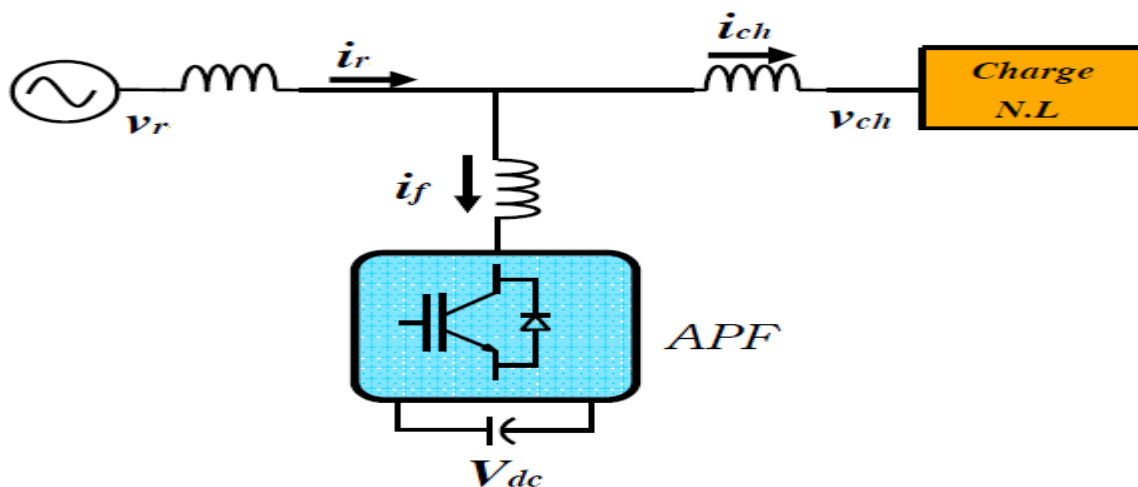


Figure I.10 : Filtre actif parallèle.

I.7.2.3 Filtre Actif Série (FAS) :

Le filtre actif série engendre des tensions harmoniques V_h dont la somme avec la tension réseau V_s est une onde sinusoïdale la figure I.11. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [19].

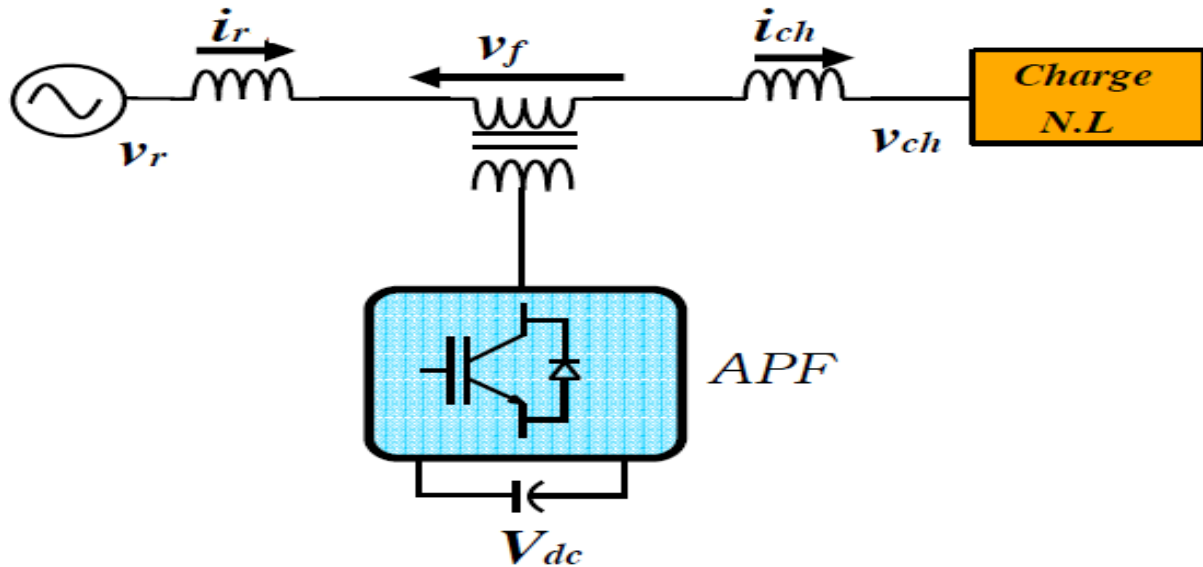


Figure I.11 : Filtre actif série.

I.7.2.4 Combinaison Parallèle-Série Actifs (UPQC) :

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée (Unified Power Quality Conditioner) (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Figure I.12. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [15].

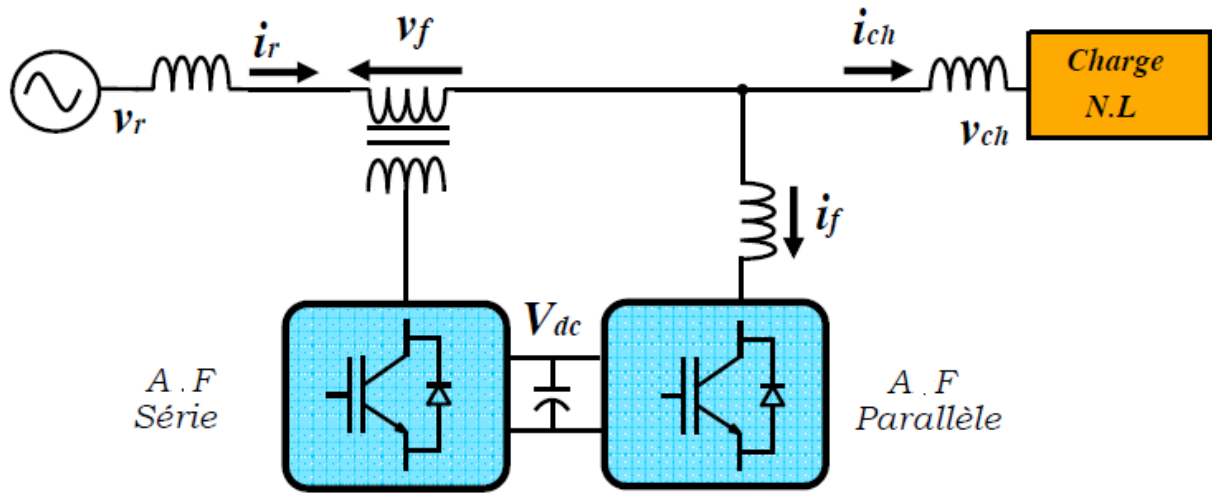


Figure I.12 : Filtre combiné parallèle-série (UPQC).

Il existe plusieurs autres groupes mixtes de filtres actifs avec cette fois des filtres passifs :

- Le filtre actif série connecter en série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

I.7.2.5 Filtre Actif Hybride :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Plusieurs configurations sont possibles combinant éléments passifs et filtre actif série ou parallèle :

- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

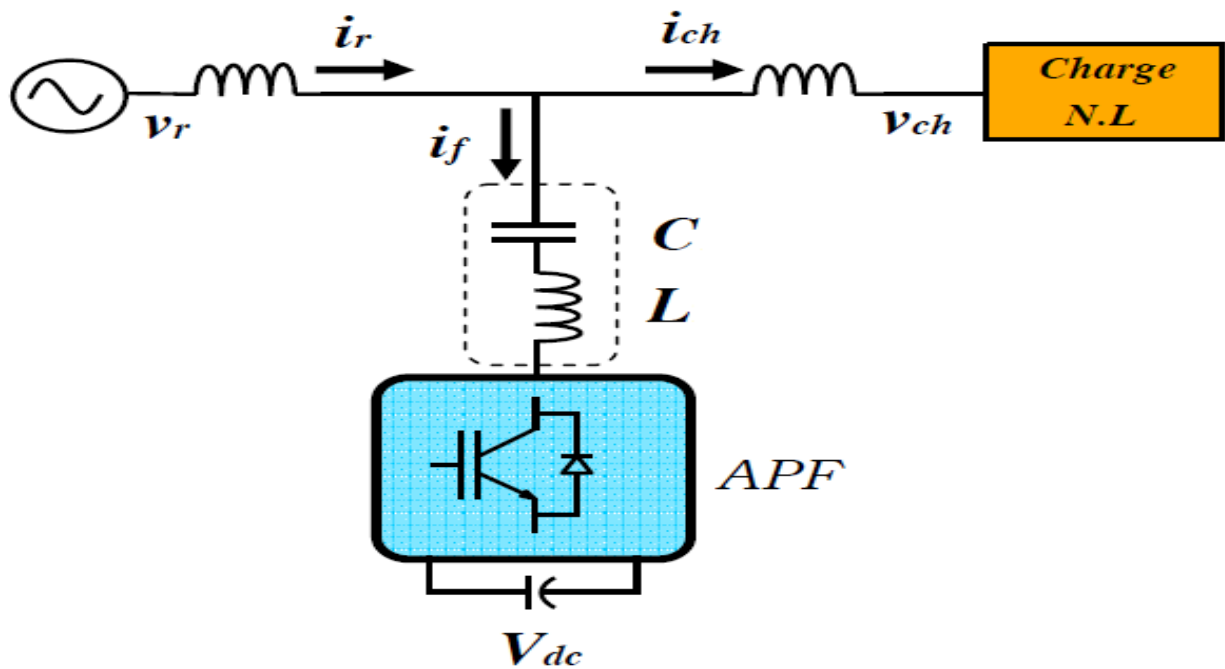


Figure 1.13 : Montre l'une des configurations les plus récentes

I.7.2.6 Avantages des Filtres Actifs :

- Un seul filtre peut éliminer tous les harmoniques indésirables.
- L'état de résonance est absent, augmentant ainsi la stabilité du système de puissance.
- La flexibilité et l'adaptabilité avec la variation de la charge.

I.7.2.7 Inconvénients des Filtres Actifs :

- Le coût élevé a limité l'implémentation dans l'industrie.
- Les pertes sont plus élevées.
- Amélioration de la forme de la tension n'est pas toujours évidente.

I.8 Conclusion :

Nous avons consacré dans ce premier chapitre pour la définition de la qualité de l'énergie électrique, Puis nous avons recensé les origines et les conséquences des harmoniques sur les différents éléments constitutifs du réseau et sur les récepteurs raccordés au réseau.

Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées.

Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème ; les technologies mises en œuvre, telles que les filtres passifs, sont souvent pénalisantes en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et des charges polluantes.

Pour l'objectif d'améliorer la qualité de l'énergie électrique, nous étudierons dans le prochain chapitre : Modélisation et Commande Directe de Puissance (DPC) du Filtre Actif Parallèle.

Chapitre II

Modélisation et Commande
Directe de Puissance (DPC) du
Filtre Actif Parallèle.

II.1 Introduction:

En raison de l'augmentation des charges non linéaires dans les systèmes d'alimentation électrique, qui produisent du courant, le problème des harmoniques est devenu sérieux, affectant la qualité de l'énergie.

Il existe de nombreux problèmes liés à l'utilisation de filtres passifs. Les filtres Active Parallèles sont des dispositifs émergents, qui peuvent effectuer correctement le travail d'annulation des harmoniques de courant.

D'autre part, la stratégie de contrôle direct de la puissance est une stratégie de contrôle appropriée car elle offre des transitoires plus rapides et un comportement robuste avec contrôle direct de la puissance. Dans ce chapitre, une vue d'ensemble du filtre actif shunt est effectuée, la configuration de SAPF est modélisée et analysée. Dans la deuxième partie, l'état de l'art de la DPC est présenté. L'approche DPC est évaluée par résultats de simulation [20].

II.2 Principe de Filtre Actif Parallèle (FAP) :

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants alternatifs au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire. En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec les performances appréciables [18]. Sa structure est la suivante :

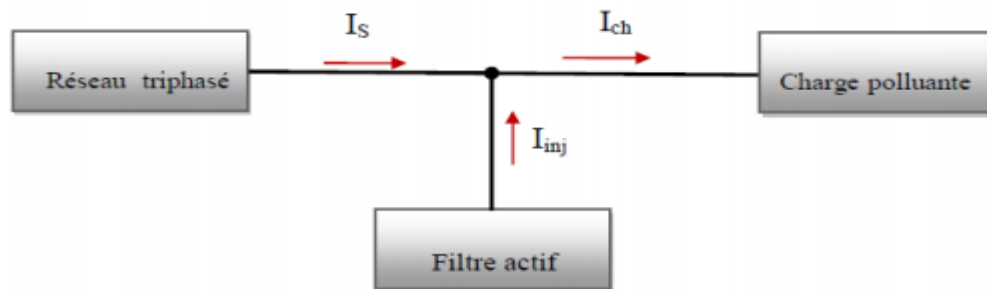


Figure II.1: Principe de filtre actif parallèle.

II.3 Structure Générale du Filtre Actif Parallèle :

II.3.1 Topologie Générale :

La figure II.2 donne la structure générale du FAP, laquelle se présente sous la forme de deux parties :

- ❖ La partie puissance et la partie contrôle-commande. La partie puissance est constituée :
 - 1) D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle.
 - 2) D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
 - 3) D'un filtre de sortie.
- ❖ La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :
 - 1) De la méthode d'identification des courants perturbés.
 - 2) Du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants.
 - 3) De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
 - 4) De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
 - 5) De la commande de l'onduleur de tension [21].

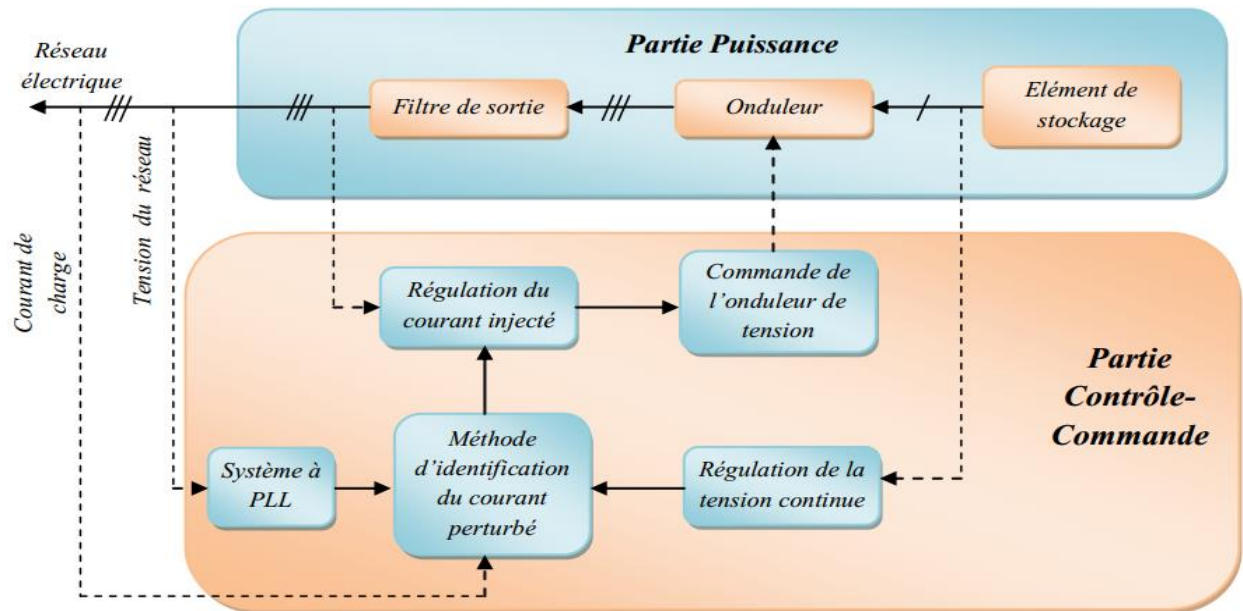


Figure II.2: Structure générale du FAP.

II.4 Etude de la Partie de Puissance :

II.4.1 Onduleur de Tension :

II.4.1.1 Structure Générale :

La figure. II.3 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir de transistors (GTO ou IGBT) et de diodes en antiparallèle.

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) employé pour relier l'onduleur de tension au réseau électrique.

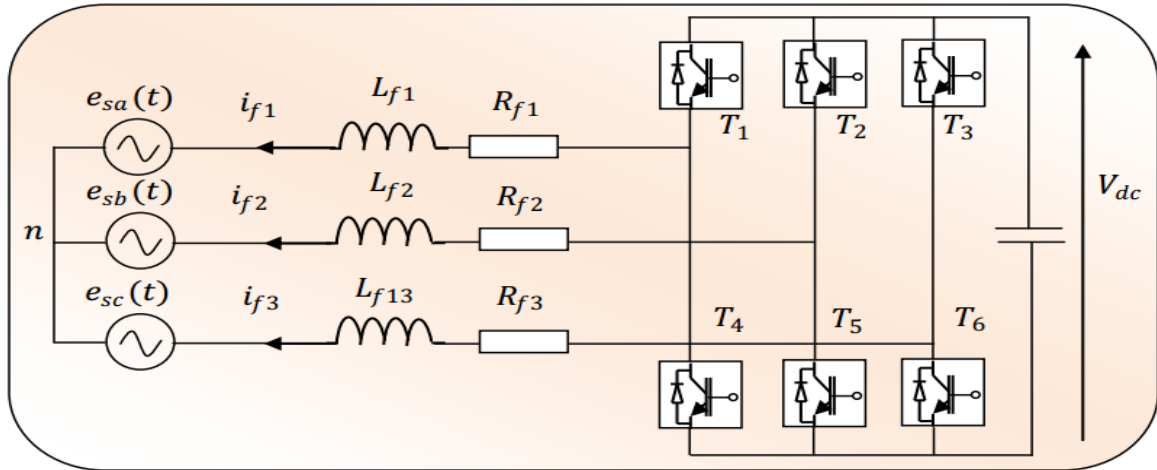


Figure II.3: Onduleur de tension triphasé.

Cette structure du FAP ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations.

Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé *temps mort*, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre [21,22].

Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.

II.4.1.2 Tension Génère par l'Onduleur :

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure. II.4 dépendent de l'état des signaux de commande (S_a, S_b, S_c), comme défini ci-dessous :

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

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

(II.1)

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

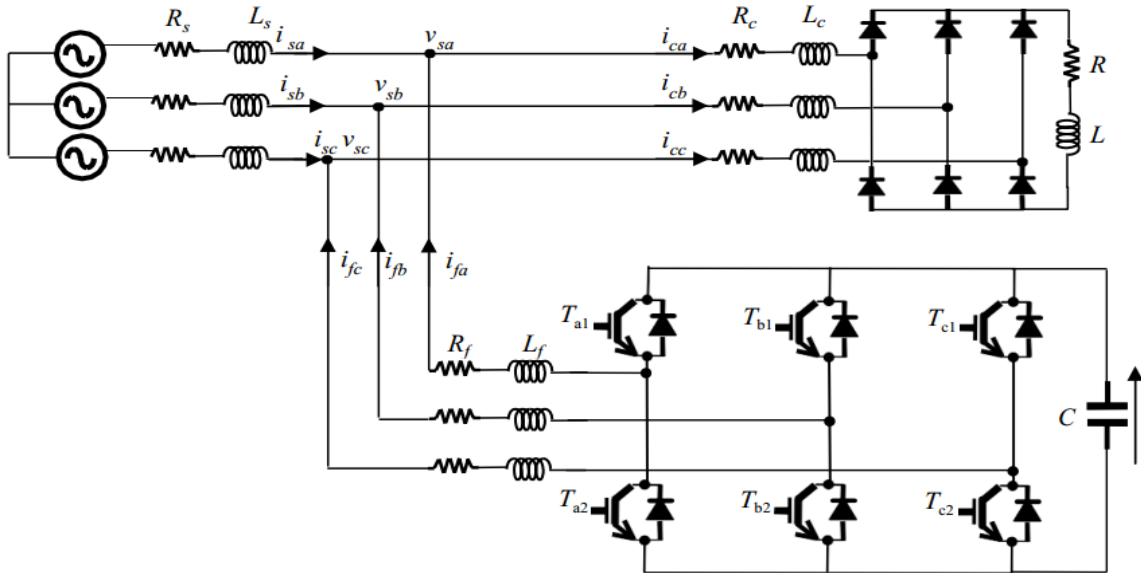


Figure II.4 : Circuit de puissance du filtre actif parallèle.

Les trois tensions composées à la sortie de l'onduleur sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} - V_{fb} \\ V_{fb} - V_{fc} \\ V_{fc} - V_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a - S_b \\ S_b - S_c \\ S_c - S_a \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.2})$$

Les trois tensions simple de sortie de l'onduleur notées (v_{fa} , v_{fb} , v_{fc}) sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} + R_f \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

On suppose que les trois tensions du réseau soient équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} = 0$$

$$i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = 0 \quad (\text{II.4})$$

Nous pouvons donc déduire la relation suivante :

$$v_{fa} + v_{fb} + v_{fc} = 0 \quad (\text{II.5})$$

A partir des équations (II.2) et (II.4), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_a & -S_b & -S_c \\ -S_a & 2S_b & -S_c \\ -S_a & -S_b & 2S_c \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (\text{II.6})$$

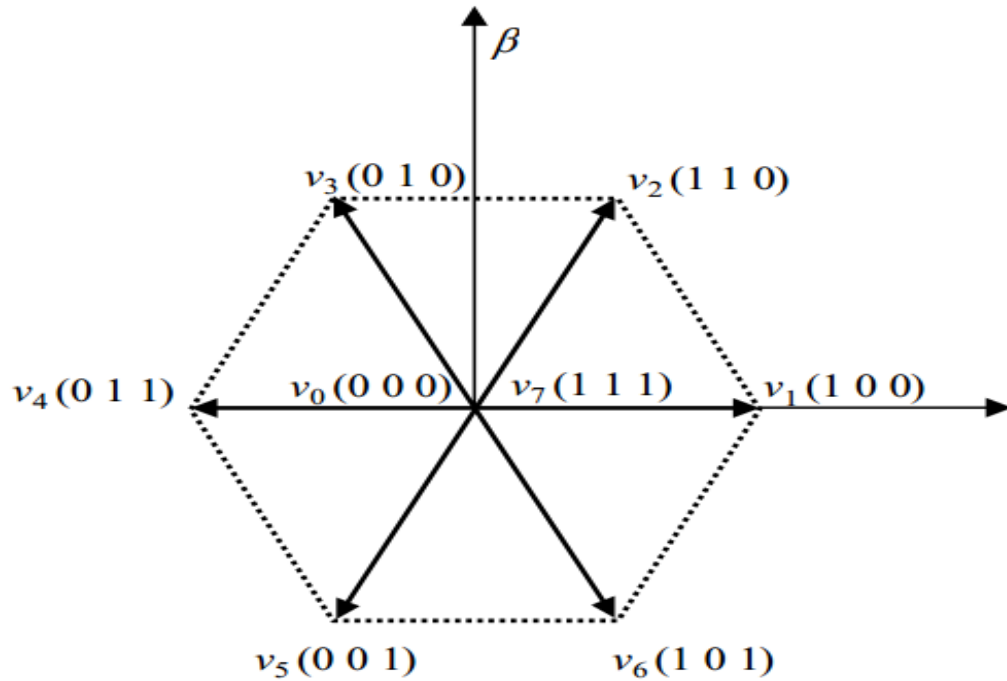
Puisque les grandeurs S_a , S_b et S_c peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), on a donc, huit configurations possibles pour les tensions de sortie du filtre actif (V_{fa} , V_{fb} , V_{fc}) référées au neutre n de la source, comme le montre le tableau II.1. Parmi elles, deux sont nulles. Dans ce tableau, $\vec{v_f}$ est la représentation vectorielle des tensions (v_{fa} , v_{fb} et v_{fc}) fournies par l'onduleur dans le repère orthogonal (α, β) [23, 24,25].

Tableau II.1 : Tensions en sortie de l'onduleur.

Vecteur	S_{a1}	S_{b1}	S_{c1}	v_{fa}	v_{fb}	v_{fc}
v_0	0	0	0	0	0	0
v_1	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
v_2	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
v_3	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
v_4	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
v_5	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
v_6	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
v_7	1	1	1	0	0	0

Dans le repère (α, β) , en considérant $\vec{v}_f$ le vecteur correspondant aux tensions de sortie du filtre actif, les 8 cas possibles de V_f sont donnés par la figure II.5 [26].

Le vecteur $\vec{v}_f$ représente la tension de référence que doit produire l'onduleur. Ceci signifie, que l'onduleur ne peut être capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur du polygone présenté dans la figure précédente [23].

**Figure II.5 :** Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

II.5 Structure de la PLL :

La PLL est un élément clef dans les nouvelles techniques de commande en électronique de puissance. Elle est utilisée comme un moyen pour récupérer les informations de la phase et de la fréquence. La forme de base de la PLL est présentée sur la figure II.6(a), contenant un détecteur de phase(PD), un filtre de la boucle(LF) et un oscillateur de tension contrôlée(VCO). Plusieurs techniques de PLL. ont été développées, la figure II.6(b) représente le synoptique détaillé de la PLL. classiques utilisés. Cette méthode détecte les paramètres de la composante fondamentale ($\hat{\theta}$, V_n) des tensions de sources données par l'équation (II.8) où m est la pulsation du terme fondamental de la tension et V_n sa valeur efficace [8]

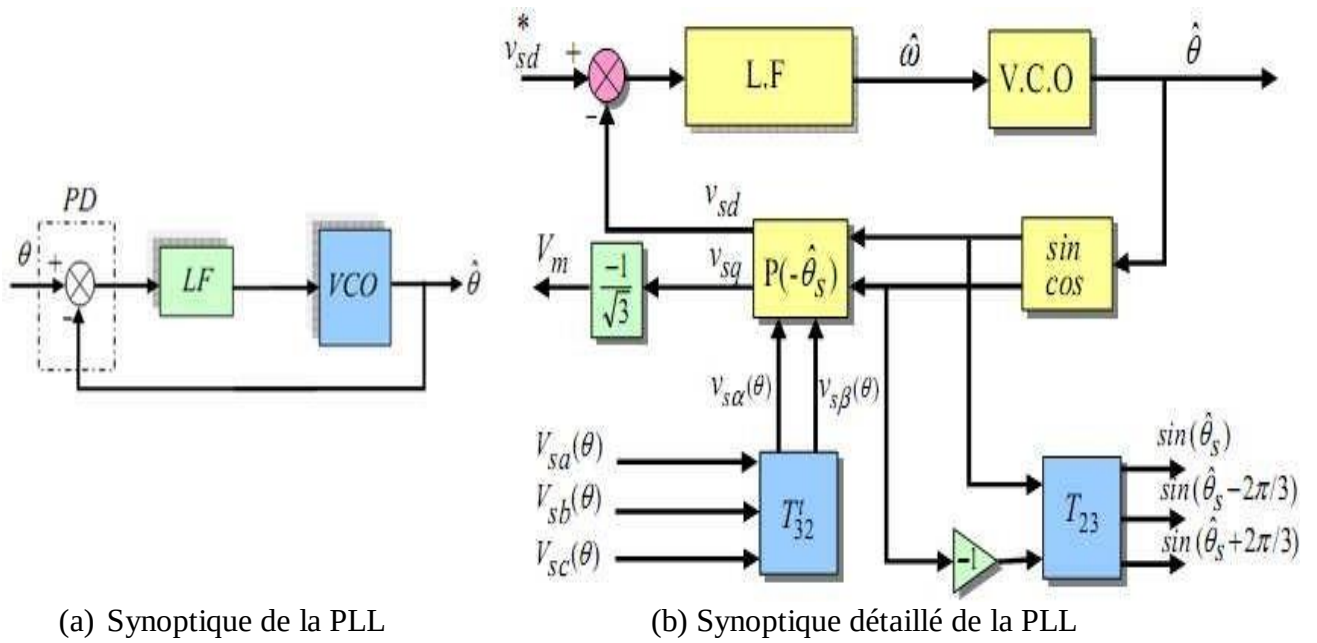


Figure II.6 : Synoptique de la P.L.L.

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta + \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix}; \quad \text{Avec } \theta = \omega t \quad (\text{II.7})$$

Les tensions simples $V_c(abc)(\theta)$, mesurées au point de raccordement, subissent en premier lieu la transformation de Concordia qui permet de passer d'une structure triphasée à la structure diphasée équivalente dans un repère de coordonnées (α, β) et qui s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha}(\theta) \\ v_{\beta}(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}V_m \cdot \sin \theta \\ -\sqrt{3}V_m \cdot \sin \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Ces grandeurs peuvent être obtenues dans le référentiel tournant synchrone en appliquant la transformation de Park suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

D'où on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{3}V_m \begin{bmatrix} \sin(\theta - \hat{\theta}) \\ -\cos(\theta - \hat{\theta}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

La PLL sera verrouillée lorsque l'angle $\hat{\theta}$ estimé sera égal à θ . Dans ce cas $V_{sd} = 0$, et $v_{sq} = -\sqrt{3}V_m$. Dans, il est possible de contrôler θ en régulant V_{sd} à Zéro. Le synoptique de la figure II.6. (b) peut être simplifié pour être similaire à celui de la figure II.6. (a) comme il apparaît sur le schéma de la figure II.7. la fonction de transfert en boucle fermée de ce système est donnée par :

$$\frac{\widehat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{\sqrt{3}V_m \cdot k_p \left(\frac{1+\tau_i s}{\tau_i s} \right) \cdot \frac{1}{s}}{1 + \sqrt{3}V_m \cdot k_p \left(\frac{1+\tau_i s}{\tau_i s} \right) \cdot \frac{1}{s}} \quad (\text{II.11})$$

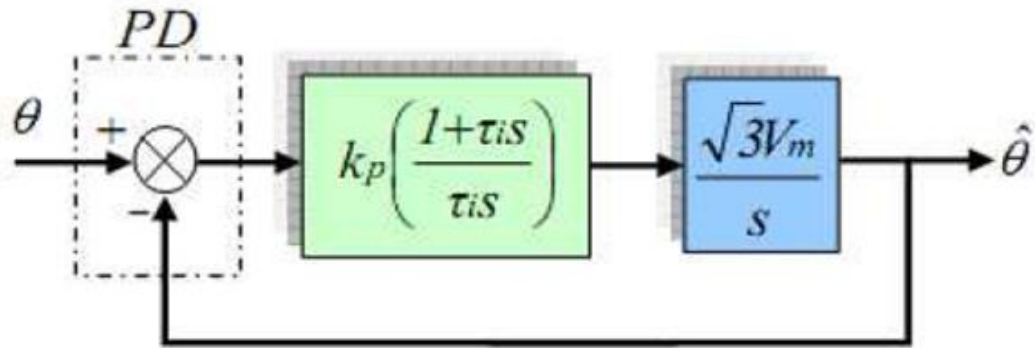


Figure II.7 : Schéma simplifié de la PLL.

La fonction de transfert trouvée peut s'identifier avec le système général du deuxième ordre donné par :

$$F(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{II.12})$$

Les paramètres du LF s'expriment comme suit :

$$k_p = \frac{2\xi\omega_n}{\sqrt{3}V_m} \quad \text{et} \quad \tau_i = \frac{2\xi}{\omega_n}$$

Afin de réaliser un bon compromis entre la stabilité et les performances dynamiques, les valeurs suivantes sont retenues :

$$k_p=1.07 \quad \tau_i=5.10^{-5}\text{s} \quad \xi=0.707 \quad \omega_n=2\pi f_n.$$

II.6 Contrôle de la Tension du Bus Continu V_{dc} :

Le contrôle du bus continu est une procédure indispensable pour la commande du SAPF. L'observation des fluctuations de la tension aux bornes des condensateurs donne des indications sur l'évolution des échanges d'énergie entre ces derniers et le réseau. Si le convertisseur est considéré sans pertes, le réseau fournit la puissance active utile pour la charge, ainsi la capacité de l'étage continu peut être considérée comme un réservoir pour la circulation des harmoniques. Alors, aucune puissance active n'est fournie par la capacité C_{dc} . En régime permanent, la puissance active fournie par la source doit être égale à la puissance demandée par la charge. Lorsqu'un déséquilibre de puissance active se produit dans les systèmes, le condensateur de stockage d'énergie doit fournir la différence de puissance entre le réseau et la charge. Il en résulte alors une variation de la tension continue aux bornes du condensateur C_{dc} [31] [32].

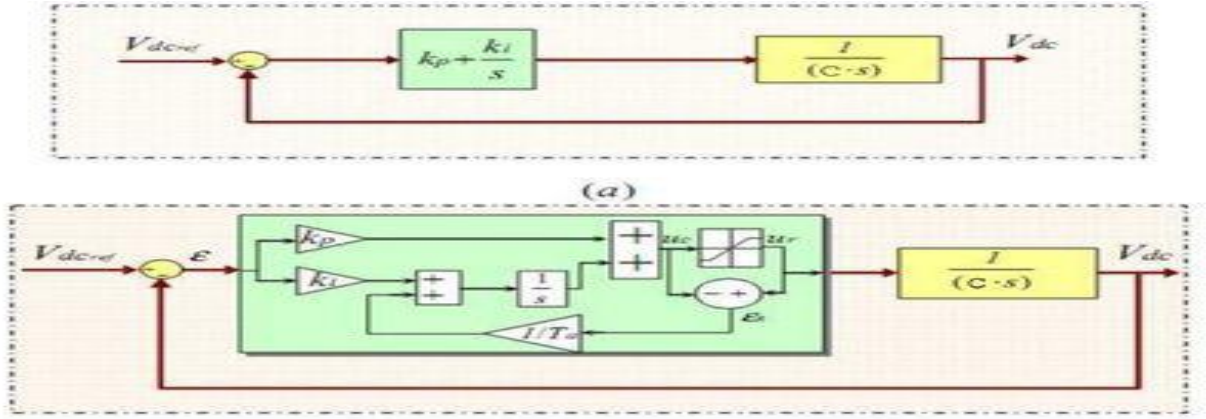
II.6.1 Régulateur de Type Proportionnel-Intégral (PI) :

Un régulateur du type Proportionnel-Intégral dont la fonction de transfert est symbolisée par $G_{PI}(s)$ est retenu comme correcteur pour la boucle externe. Alors, en éliminant la perturbation due au courant de charge, le synoptique de la figure précédente se simplifie comme indiqué à la figure II.8, en posant [27] :

A partir du schéma simplifié de la figure II.8.a, la fonction de transfert du système en boucle fermée s'écrit :

$$G_{V_{dc}(PI)}(s) = \frac{k_p + s.k_i}{C.s^2 + k_p s + k_i} \quad (II.13)$$

Cette fonction de transfert représente un système de deuxième ordre :



(a) schéma simplifié.

(b) schéma du PI avec un retour d'anti-emballement

Figure II.8 : Schémas de régulation de la tension du bus continu par un PI.

Donc

$$k_i = C \omega_n^2$$

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

II.7 Stratégies des Commandes du FAP :

II.7.1 Etude du Contrôle Direct de Puissance du FAP (DPC)

Le principe du contrôle direct a été proposé à la référence [31] et il a été développé plus tard dans de nombreuses applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par un tableau de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de références et les mesures.

La première application développée visait le contrôle d'une machine électrique et la structure de contrôle est connue sous la dénomination de Contrôle Direct de Couple (DTC). Par la suite, une technique similaire de commande en puissance (DPC) était proposée par [32][30] pour une application de contrôle des redresseurs connectés au réseau.

Dans ce cas, les grandeurs contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées. avec la DPC. Il n'y a pas de boucle de régulation en courant ni d'élément de modulation MLI, car les états de commutation de l'onduleur, pour chaque période d'échantillonnage, sont sélectionnés à partir

d'une table de commutations, basée sur l'erreur instantanée entre les valeurs de références et celles mesurées ou estimées des puissances active et réactive, et la position angulaire du vecteur de tension de source. Généralement avec cette stratégie de commande, la tension du bus continu est régulée pour un contrôle de la puissance active et le fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire est obtenu en imposant la puissance réactive à une valeur nulle [36].

II.7.2 Etat de l'Art de la Technique DPC :

L'idée de la DPC a été proposée par Ohnishi [35] [32]. Pour la première fois, il a utilisé les valeurs des puissances actives et réactive comme variables de commande au lieu des courants triphasés instantanés. Premièrement, il a établi une relation proportionnelle entre les valeurs des puissances instantanées et les courants exprimés dans le référentiel tournant (dq) pour un fonctionnement sinusoïdal équilibré. Cette méthode est basée sur la sélection de la vectrice tension à partir d'une table de commutation, relativement aux erreurs des puissances active et réactive, ainsi qu'à la position angulaire de la vectrice tension de source. Ainsi le choix de l'état optimum de commutation est effectué de sorte que l'erreur de la puissance active puisse être limitée dans une bande à hystérésis de largeur et de même pour l'erreur de la puissance réactive. Pour améliorer les performances, les auteurs ont proposé de diviser l'espace vectoriel en douze secteurs afin de déterminer ensuite la position du vecteur de la tension de source.

L'inconvénient majeur de la DPC réside dans sa fréquence de commutation variable qui dépend principalement de la fréquence d'échantillonnage, de la structure de table de commutation, des paramètres du système, des valeurs de référence des puissances active et réactive, des bandes d'hystérésis et finalement de l'état des interrupteurs de l'onduleur [33].

II.7.3 Stratégie du Contrôle Direct de Puissance du FAP ;

La stratégie de commande DPC appliquée au FAP est illustrée sur le synoptique de la figure 3.24. Elle consiste à sélectionner l'état approprié à partir d'une table de commutation basée sur les erreurs, qui sont limitées par une bande d'hystérésis, présentes dans les puissances active et réactive [13].

Deux aspects importants garantissent un fonctionnement viable du système :

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

II.7.4 Calcul des Puissances Instantanées :

Basée sur la mesure des tensions et courants de source, les puissances active et réactive instantanées peuvent être calculées par les expressions :

$$e_c(t) = v_{ca} \cdot i_{ca} + v_{cb} \cdot i_{cb} + v_{cc} \cdot i_{cc} \quad (\text{II.14})$$

$$q_c(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{ca} - v_{cb}) \cdot i_{ca} + (v_{cb} - v_{cc}) \cdot i_{cb} + (v_{cc} - v_{ca}) \cdot i_{cc}] \quad (\text{II.15})$$

Toutefois, le nombre des capteurs requis augmente le coût et réduit la fiabilité du système.

Par conséquent, afin d'estimer correctement la puissance et en même temps de réduire le nombre de capteurs de tension, Noguchi propose l'utilisation d'un estimateur du vecteur tension [32] [30].

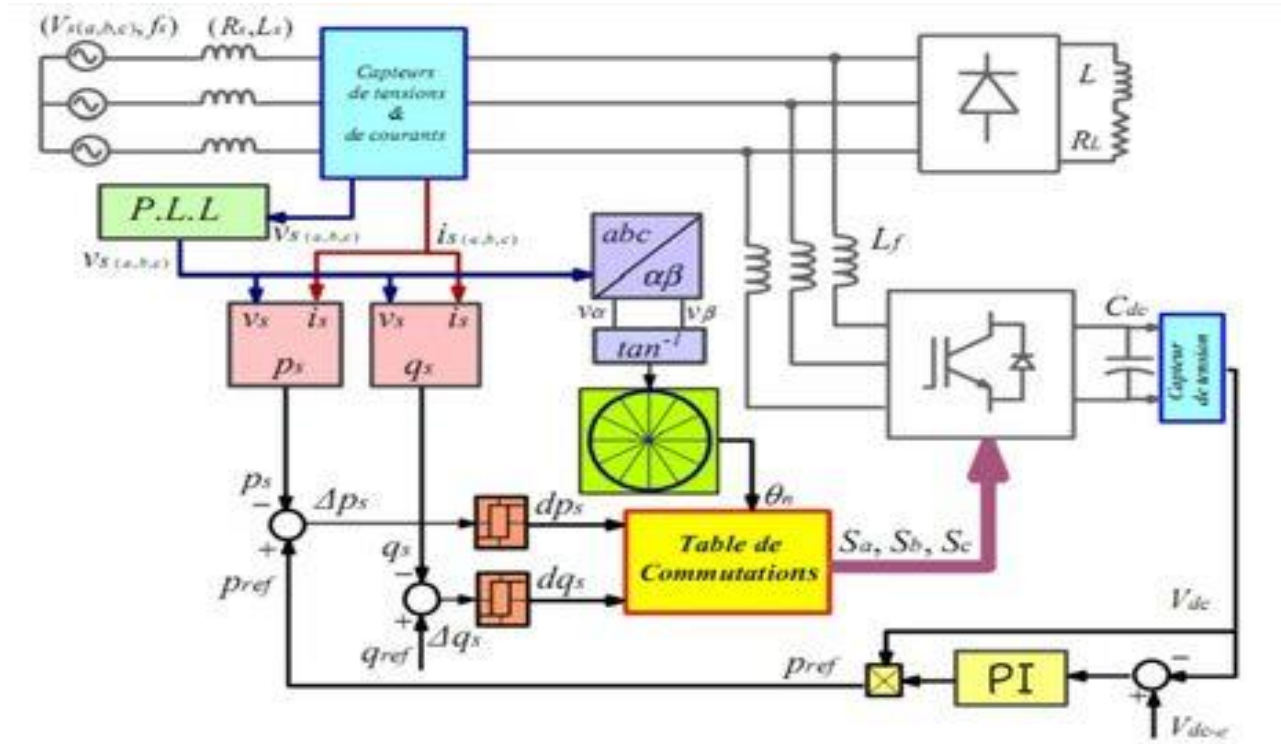


Figure II.9 : Synoptique de contrôle du FAP avec la commande DPC.

II.7.5 Contrôleur à Hystérésis :

L'idée principale de la commande directe de puissance est de maintenir les puissances active et réactive instantanées dans une bande désirée. Ce contrôle est basé sur deux comparateurs à hystérésis qui utilisent comme entrée les signaux d'erreurs entre les valeurs de références et estimées des

puissances actives et réactive. 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 (Δp_c ou Δq_c) est en croissance et atteint le niveau supérieur, le contrôleur à hystérésis change sa sortie à Figure. II.10.

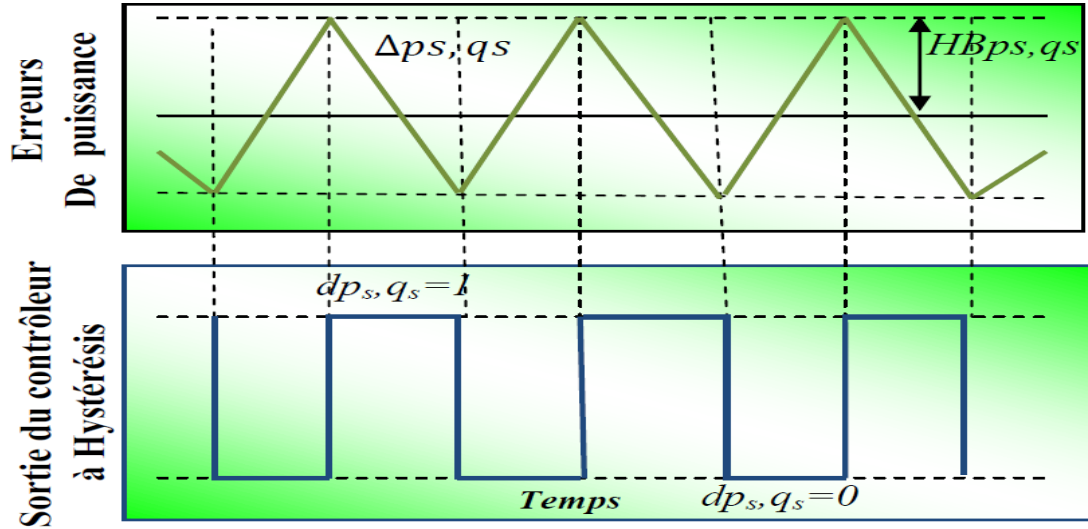


Figure II.10 : Comportement d'un contrôleur de puissance à hystérésis à deux niveaux.

Avec:

$$\Delta p_s = p_{ref} - p_f \quad (II.16)$$

$$\Delta q_s = q_{ref} - q_f$$

II.7.6 Choix du Secteur :

L'influence de chaque vecteur de sortie résultant du FAP sur les puissances active et réactive est très dépendante de la position réelle du vecteur de la tension de source. Ainsi, outre les signaux des deux contrôleurs à hystérésis, la table de commutation fonctionne selon la position du vecteur de la tension de source, qui tourne à la pulsation (ω), dans le plan complexe. Toutefois, au lieu d'introduire à la table de commutation la position exacte du vecteur de la tension, le bloc du choix de secteur nous informe dans quel domaine est localisé l'actuel vecteur de la tension de source.

Afin d'augmenter la précision et aussi pour éviter les problèmes rencontrés aux frontières de chaque vecteur de commande, le plan de l'espace vectoriel est divisé en 12 secteurs de 30° chacun la Figure. II.11, où le premier secteur est défini entre :

$$-\pi/3 < \theta_1 < 0$$

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

$$(n - 2) \pi/6 < \theta_n \leq (n - 1) \pi/6 \quad n = 1, 2, \dots, 12. \quad (\text{II.17})$$

Selon l'angle du vecteur de la tension de source référencé sur l'axe (α), le secteur où le vecteur est localisé sera sélectionné. L'angle est calculé en utilisant la fonction trigonométrique inverse, basée sur les composantes du vecteur de la tension dans le repère (α, β), indiquée par l'équation (II.19) :

$$\theta = \arctan \frac{v_\alpha}{v_\beta} \quad (\text{II.18})$$

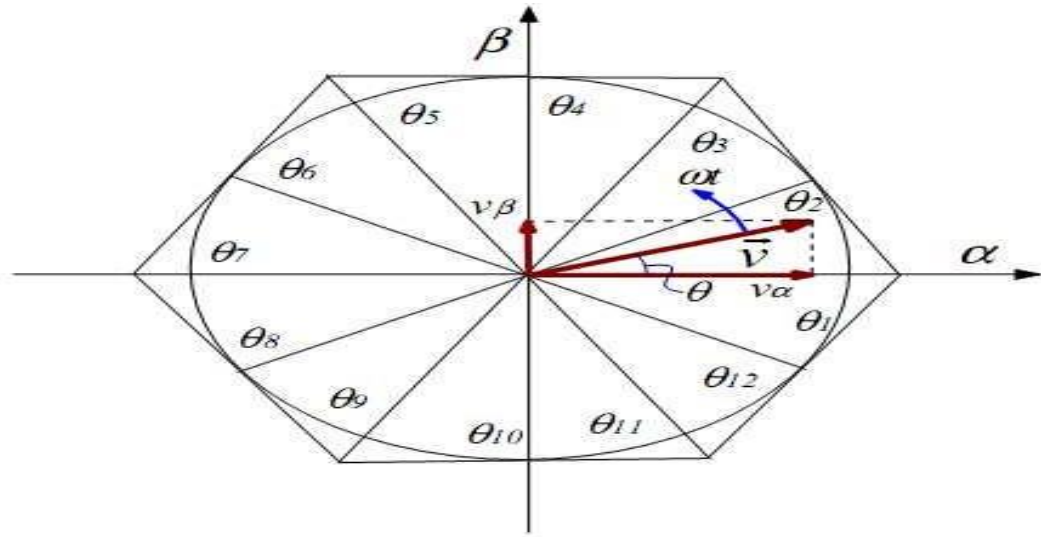


Figure II.11 : Représentation du vecteur de la tension dans le plan de l'espace vectoriel

(α, β), divisé en douze (12) secteurs.

II.7.7 Table de Commutation :

La table de commutation, désignée par classique dans le présent manuscrit, a été élaborée par l'initiateur DTC et présentée initialement dans [34,35] puis ultérieurement par M. Malinowski [17]. La table de commutation peut être considérée comme le cœur de la commande directe en puissance. Elle sélectionne un vecteur de tension de l'onduleur approprié pour permettre le déplacement des puissances active et réactive instantanées dans la direction désirée, en se basant aussi sur la position du vecteur de la source et des erreurs des puissances active et réactive.

La table de commutation classique est représentée par le Tableau II.2.

Tableau II.2 : Table de commutation pour la DPC classique.

d_p	d_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{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
$v_1(100), v_2(110), v_3(010), v_4(011), v_5(001), v_6(101), v_0(000), v_7(111).$													

II.8 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les différentes topologies et les éléments constitutifs d'un FAP triphasé à structure tension. Ce FAP permet de compenser les harmoniques de courant générés par des charges non-linéaires, connectées à un réseau électrique à trois fils. Nous avons ensuite successivement étudié la partie contrôle du FAP. De même, pour la partie puissance, nous avons étudié le dimensionnement de l'onduleur, de l'élément de stockage et du filtre de sortie.

Et à la fin de ce chapitre nous avons compris les principes de commande directe de puissance.

Chapitre III

Résultats de Simulation

III.1 Introduction :

Après avoir étudié dans le chapitre précédent Généralité sur la Qualité d'Energie Electrique, ainsi que Modélisation et Commande Directe de Puissance (DPC) du Filtre Actif Parallèle dans le chapitre précédent,

Nous allons présenter dans ce chapitre, la simulation de commande direct de puissance active parallèle par Matlab \ Simulink ® 2014.

III.2 Schéma Synoptique de l'Association Filtre – Réseau – Charge Polluante :

Le schéma de la figure III-1 illustre la structure complète de la commande directe de puissance du filtre actif parallèle par Matlab \ Simulink ® 2014

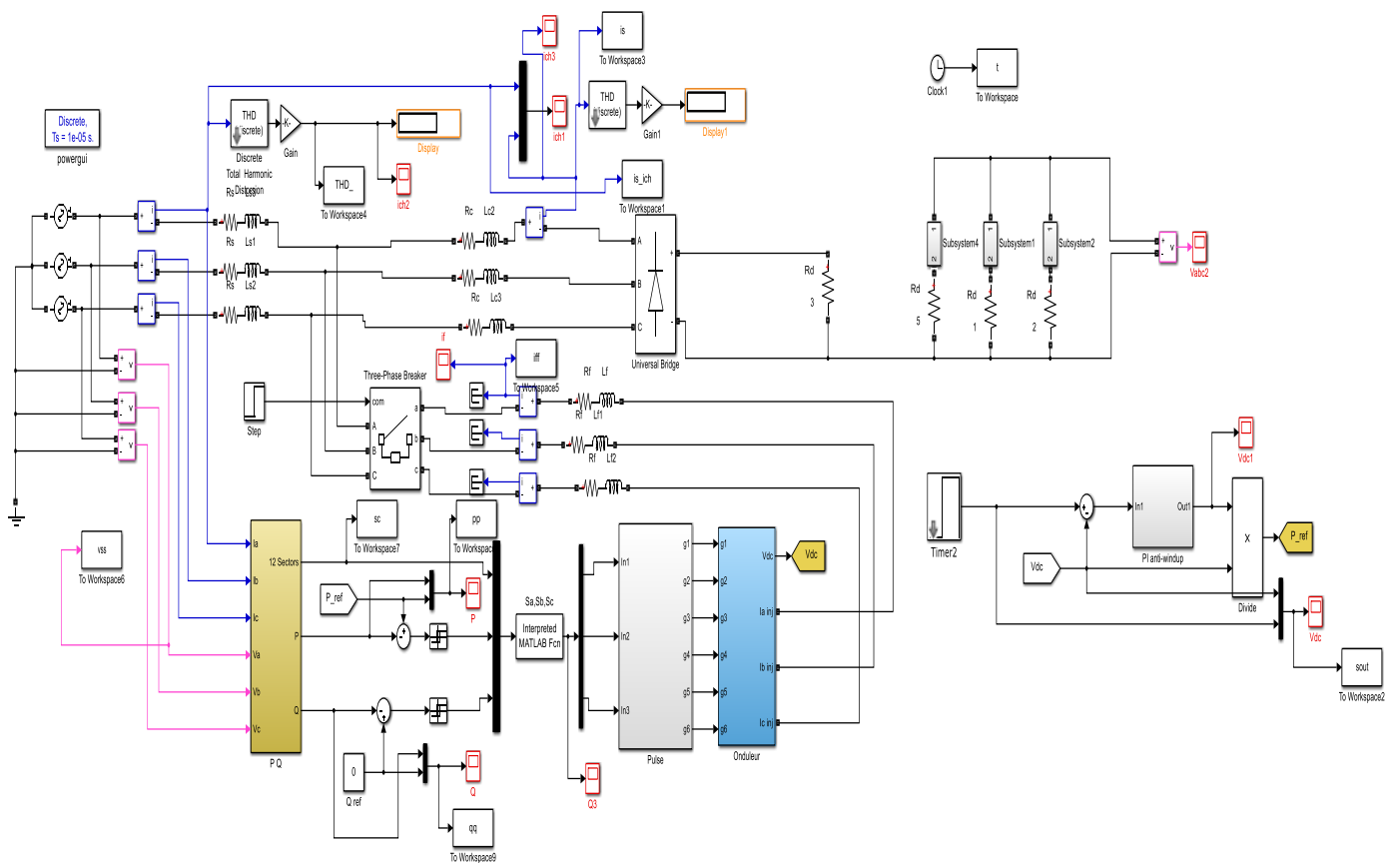


Figure.III.1 : Contrôle du FAP par la commande DPC

III.3 Résultats de Simulation de la DPC Appliquée au FAP

III.3.1 Paramètres de Simulation :

Le contrôle direct de puissance du FAP, à l'aide de la table de commutation classique, a été simulé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink TM, afin d'étudier ces performances. Les paramètres du circuit électrique ainsi que les données de la commande utilisés en simulation sont mentionnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.1 : Paramètres de simulations du FAP

<i>Partie du système</i>	<i>Désignations</i>	<i>Valeurs</i>
Réseau électrique	- Tension efficace	$V_s = 57 \text{ V}$
	- Fréquence	$f = 50 \text{ Hz}$
	- Impédance interne	$R_s = 0.45 \Omega$
		$L_s = 2.5 \text{ mH}$
Avant redresseur	Impédance	$R_L = 0.3 \Omega$
		$L_l = 1 \text{ mH}$
Après redresseur	Charge Résistive	$R_1 = 10 \Omega$
		$R_2 = 20 \Omega$
FAP	- Condensateur de stockage	$C = 1100 \mu\text{F}$
	- Filtre de couplage	$R_f = 0.2 \Omega$
		$L_f = 3 \text{ mH}$

III.4 Résultats des Simulations de Filtre Actif Parallèle par DPC :

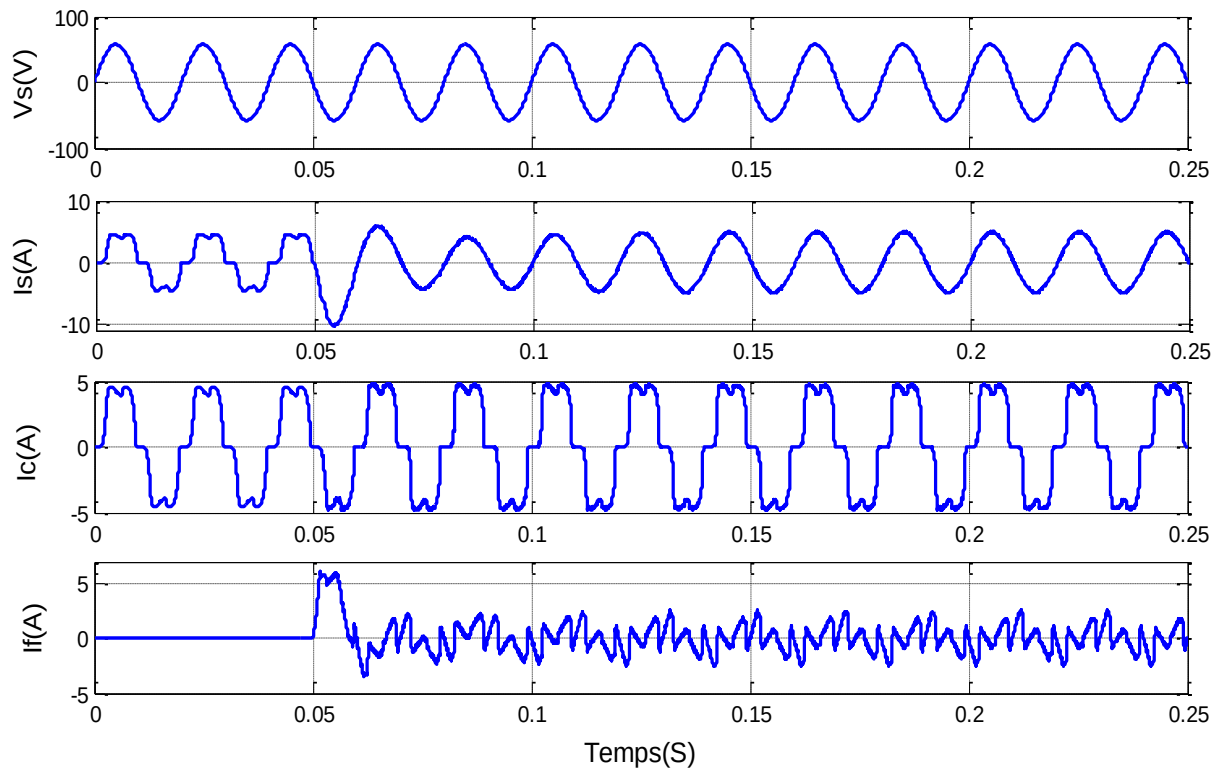


Figure.III.2 : Résultats de la simulation de la tension source (V_s), de la courante source (I_s), du courant de charge (I_c), du courant du filtre (I_f), du filtre activé à $t = 0,05$ s

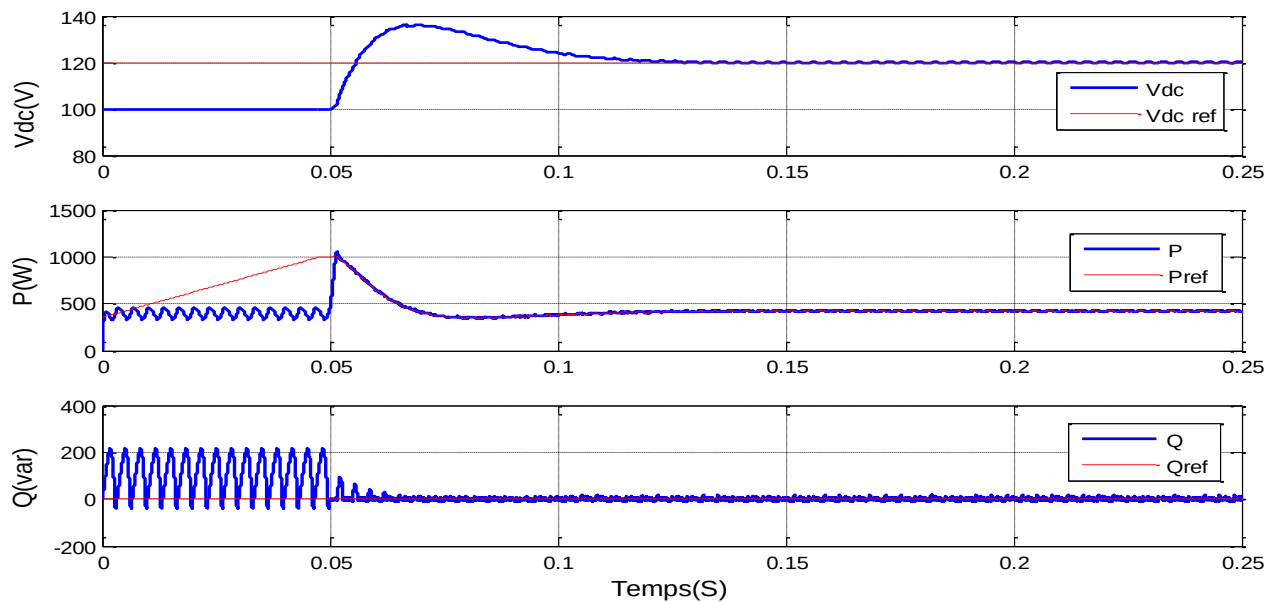


Figure.III.3 : Résultats de simulation de la tension du bus continu V_{dc} , la puissance active P , réactive q et leurs références avant et après la mise en service du FAP à $t = 0.05$ s.

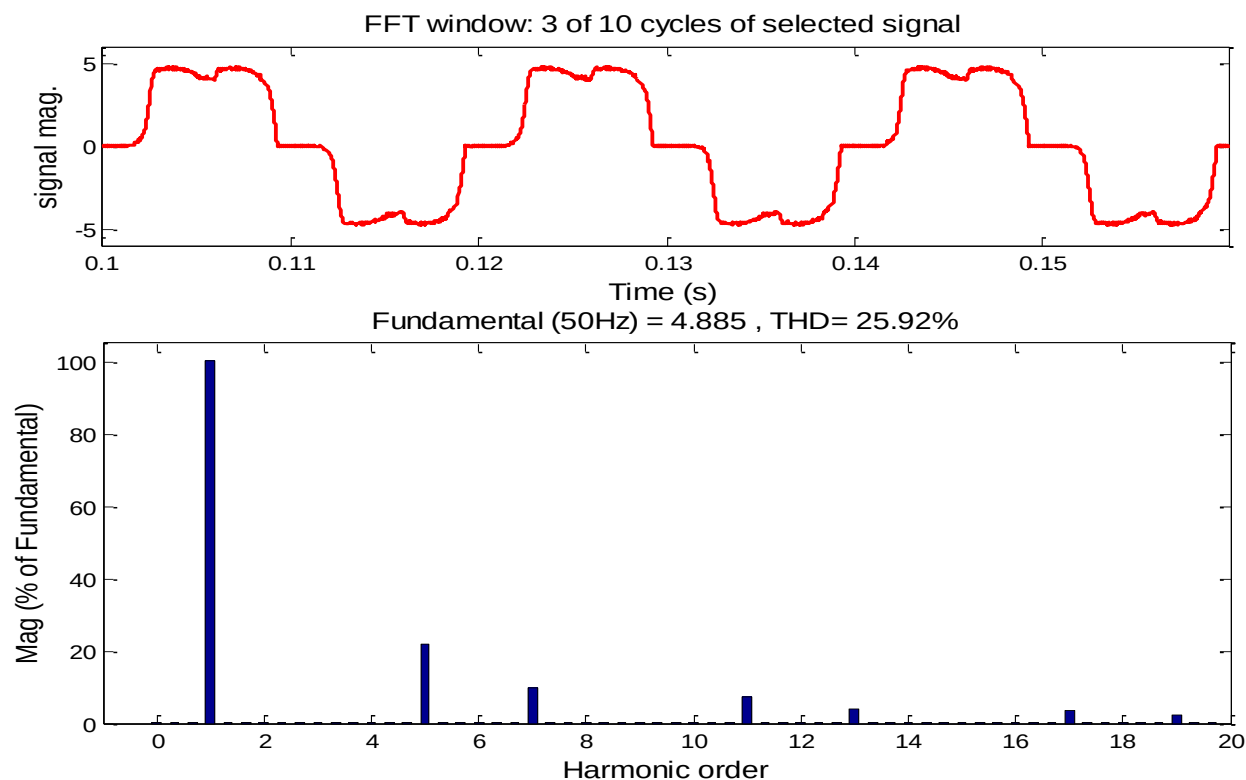


Figure.III.4 : Analyse FFT de la courante source avant filtrage.

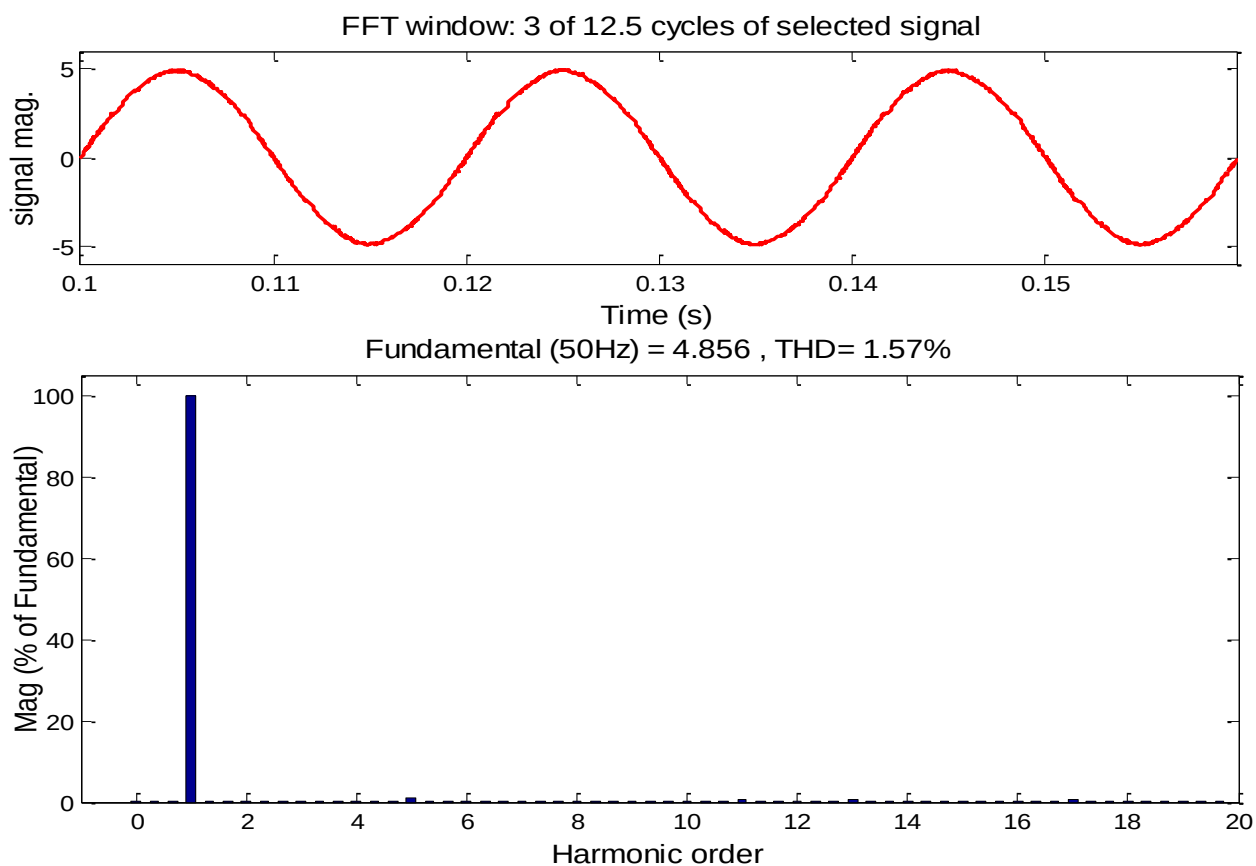


Figure.III.5 : Analyse FFT de la courante source après filtrage

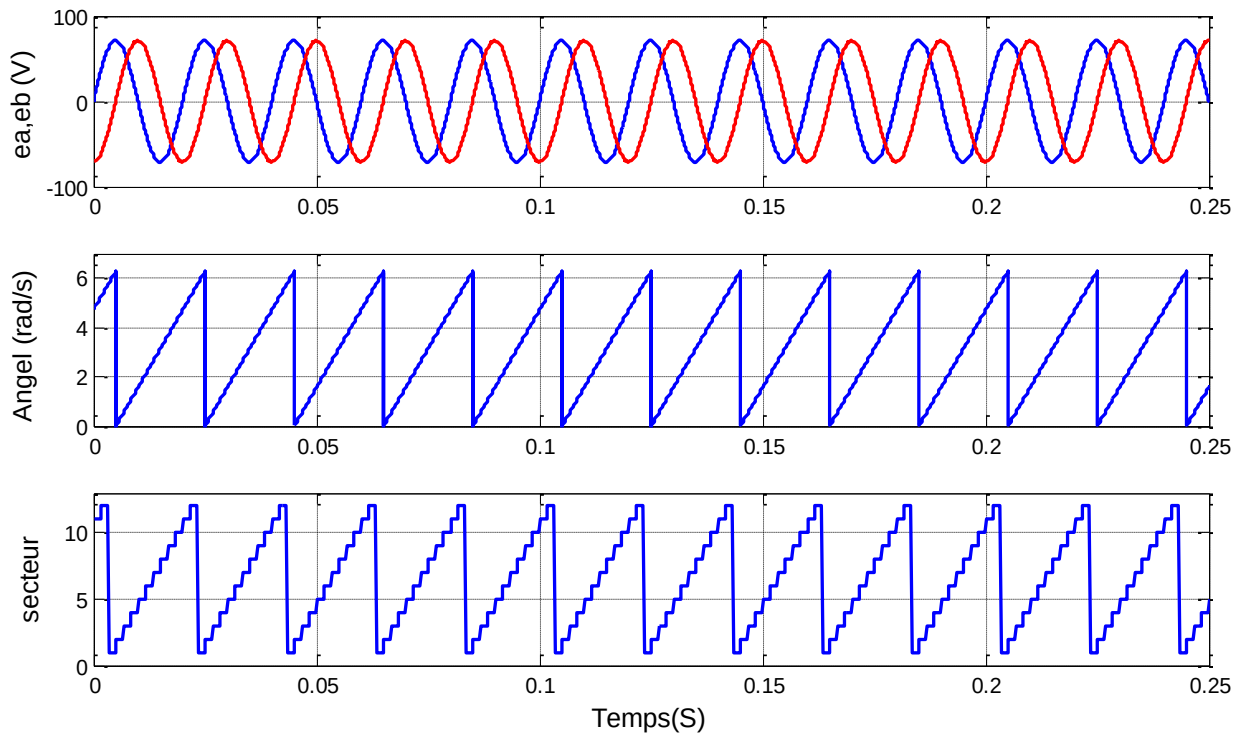


Figure.III.6 : Simulation de la tension source sur les coordonnées stationnaires ($e\alpha$, $e\beta$), l'angle de phase et les secteurs.

Les courbes représentées sur les Figures (III.2 et III.3), de haut en bas sont : tension de source V_s , courant de source I_s , courant de charge I_c , courant de filtre I_f , (pour la première phase), tension de bus continu V_{dc} , puissance active P et puissance réactive Q (Avec leurs références).

Les figures montrent qu'avant la connexion du FAP (avant $t = 0,05$ s), et en raison de la charge non linéaire, le courant de source (Fig. III.2) n'était pas sinusoïdal et la puissance réactive Q n'était pas nulle générée par la source (Fig. III.3).

Après le démarrage du FAP à $t = 0,05$ s, le courant de source devient presque sinusoïdal (Fig. III.2). La puissance active P est constante et suit de près sa valeur de référence (Fig. III.3).

La puissance réactive Q est égale à zéro en moyenne (fig. III.3), ce qui assure le fonctionnement du facteur de puissance unitaire.

La tension du bus continu (Fig. III.3) atteint sa référence ($V_{ref} = 120V$) en la tension du bus continu de l'onduleur est bien régulée à sa valeur de référence avec présente des légères d'ondulations autour de sa référence. Donc le régulateur de tension régule parfaitement la tension du bus continu.

La Figure III.4 et la figure III.5 montre l'analyse spectrale du courant source avant et après filtrage. Avant le filtrage, nous pouvons voir que la valeur du taux de distorsion harmonique était $THDi = 25,92\%$ et après filtrage, ce serait $THDi = 1,57\%$, ce qui indique la compatibilité avec IEEE 519-1992.

Par contre, la figure III.6 montre l'évolution de vecteur de tension source sur les axes α - β son angle Θ et sa représentation en coordonnées polaires.

III.4.1 Variation de charge :

Les courbes représentées sur les Figures III.7., de haut en bas sont : tension de source V_s , courant de source I_s , courant de charge I_c , courant de filtre I_f ,

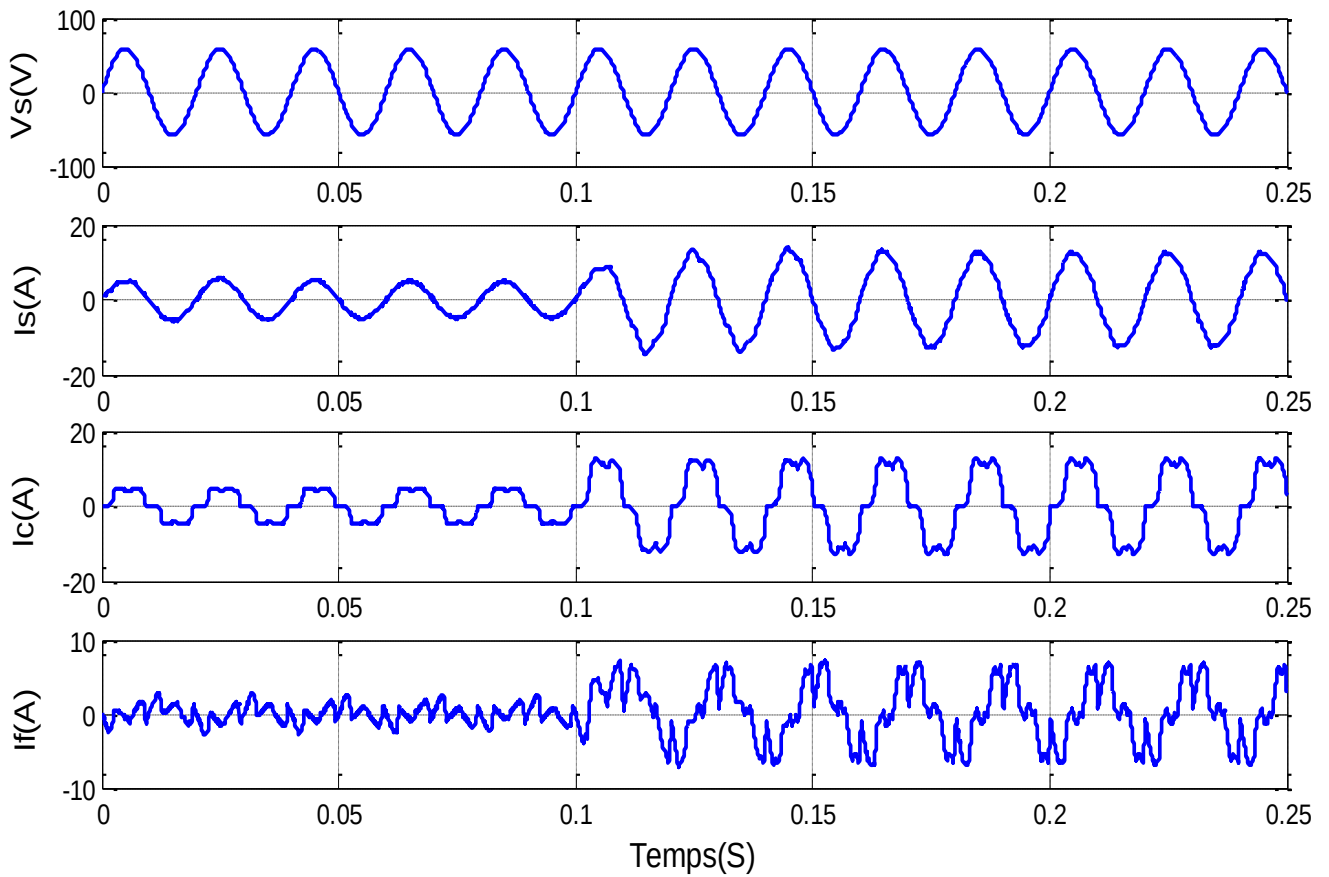


Figure III.7 : Résultats de la simulation de la tension source (V_s), de la courante source (I_s), du courant de charge (I_c), du courant du filtre (I_f), de la variation de pas de la charge à $t = 0.1$ s.

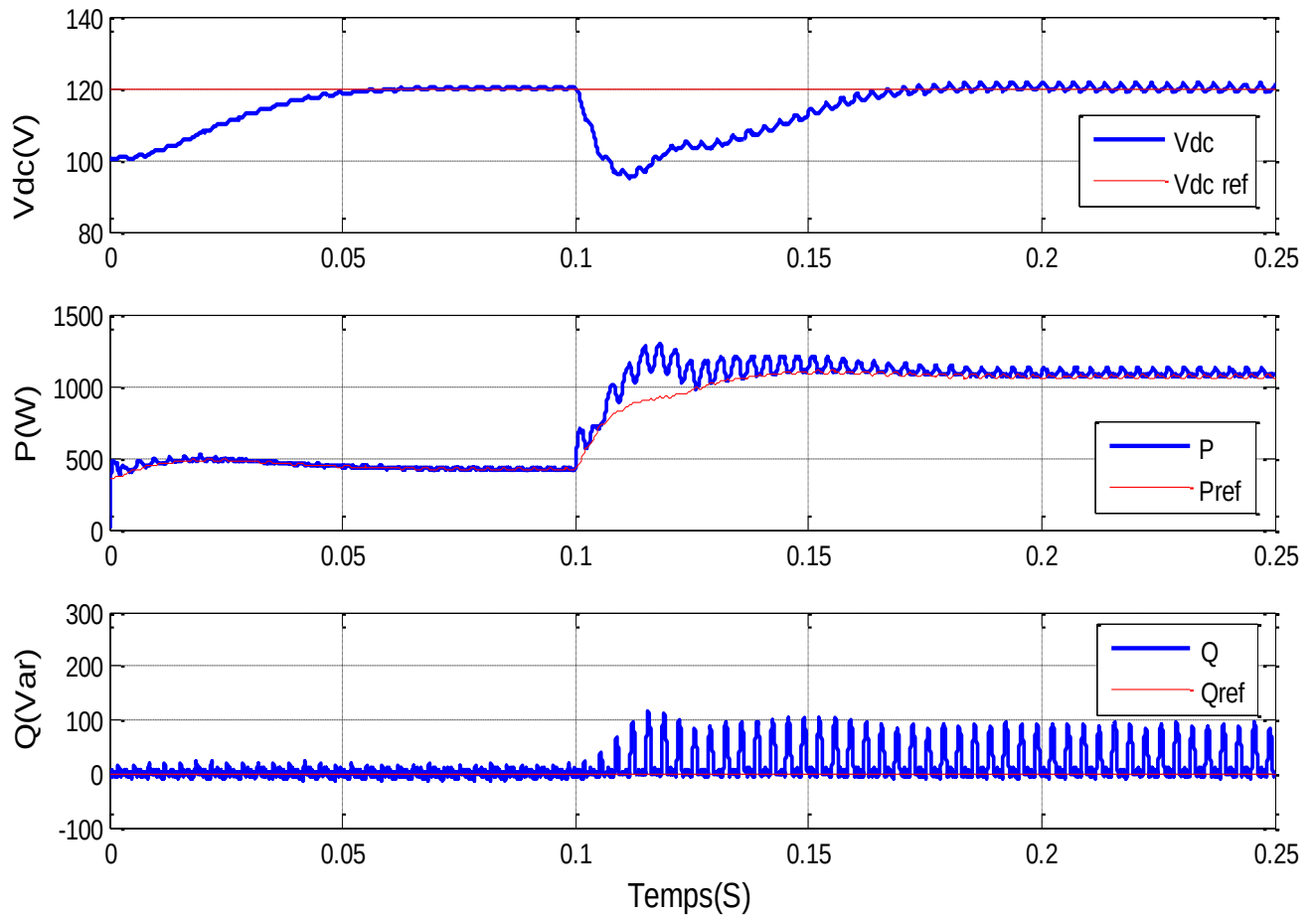


Figure III.8 : Résultats de simulation de la tension du bus continu V_{dc} , la puissance active P , réactive q et leurs références, variation de la charge à $t = 0.1s$.

La figure III.7 en outre, pour montrer les performances pendant l'état dynamique, le courant de charge est augmenté à $t = 0,1 s$ par une augmentation de la valeur de résistance de charge de 10 à 20 Ω (changement d'échelon de 50%).

La figure III.8 montre la réponse du FAP lors d'une variation de charge. Une petite augmentation de tension de la tension du bus continu est observée lorsque le courant de charge est augmenté. Cependant, l'état d'équilibre est atteint la tension du bus continu s'est stabilisée à sa tension de référence $V_{dcref} = 120V$.

En revanche, les courants de charge subissent une surtension tandis que les courants de charge conservent leur dynamique et leur forme sinusoïdale grâce au contrôleur. Il est à noter que cette différence de charge n'entraîne aucune perturbation de la tension source. De même, la figure III.8 montre le développement de la force active et réactive avec ses références lors d'une augmentation

de la puissance. L'énergie active nécessaire est fournie par la source à partir de $t = 0,1$ s. Comme la puissance réactive reste égale à zéro pour s'assurer que la puissance réactive est compensée.

III.4.2 Variation de V_{dc} :

Les courbes représentées sur les Figures III.9., de haut en bas sont : tension de source V_s , courant de source I_s , courant de charge I_c , courant de filtre I_f ,

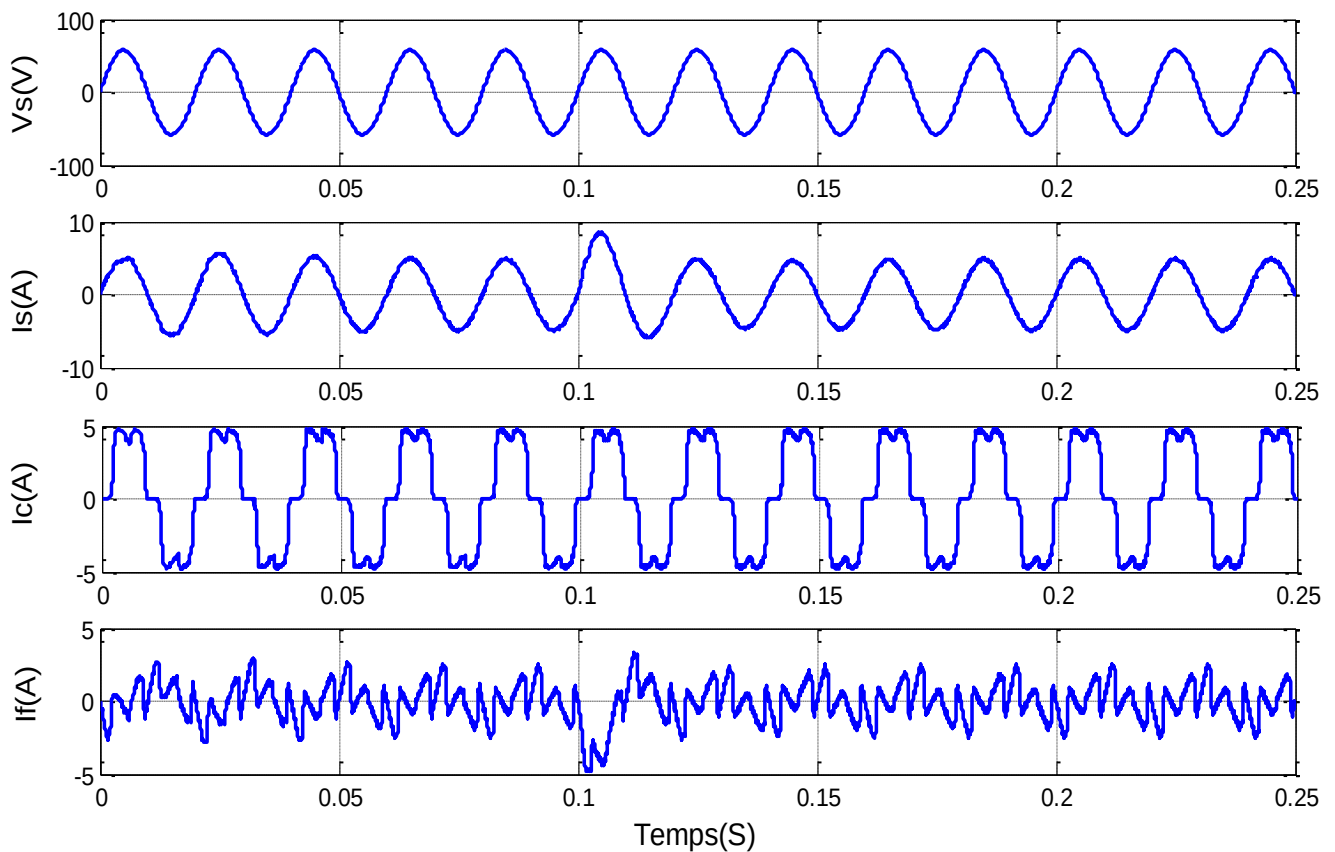


Figure III.9 : Résultats de la simulation de la tension source (V_s), de la courante source (I_s), du courant de charge (I_c), du courant du filtre (I_f), de la variation de pas de la charge à $t = 0,1$ s.

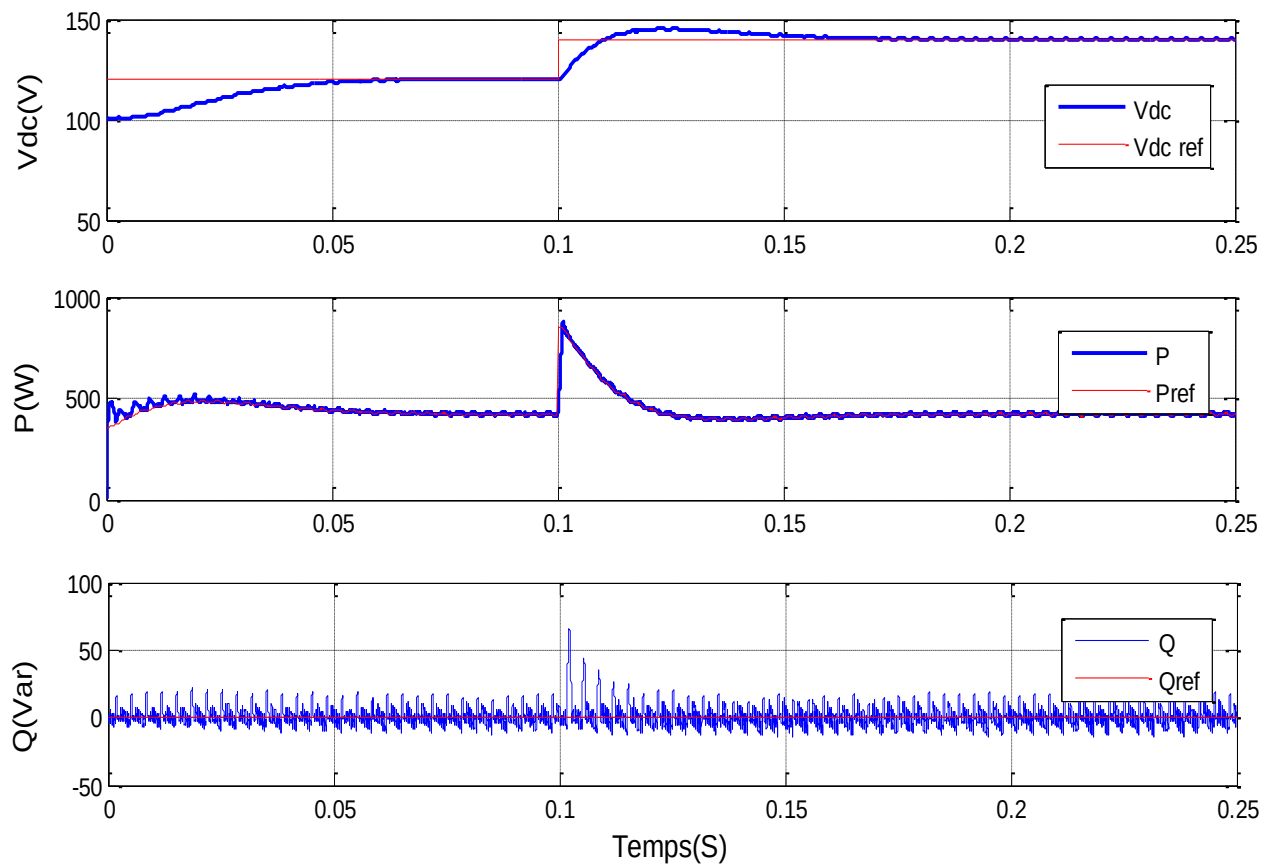


Figure III.10: Résultats de simulation de la tension du bus continu V_{dc} , la puissance active P , réactive q et leurs références, variation de la charge à $t = 0,1$ s.

Sur la figure III.10 à l'instant $t = 0,1$ s, en augmentant la valeur de $V_{dc\ ref}$ (de 120 à 140), on remarque une augmentation de puissance P (W) puis on revient à la valeur normale.

III.5 Conclusion:

Dans ce chapitre, pour contribuer à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux électriques de distribution, nous proposons une configuration de la commande directe de puissance appliquée au filtre actif parallèle.

À la fin de ce chapitre, nous obtenons des résultats de simulation de la commande directe de puissance d'un filtre actif parallèle en utilisant MATLAB / Simulink

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de recherche de nouvelles solutions modernes, à base d'électronique de puissance, de dépollution harmonique du réseau électrique, plus particulièrement celui de distribution. Il est consacré à la réduction de l'injection de courants harmoniques dans le réseau, caractérisant les ponts redresseurs à diodes ou à thyristors largement exploités dans les secteurs industriels et domestiques. Ces convertisseurs, de nature non linéaire, représentent la principale source d'harmoniques affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ils peuvent ainsi prélever des courants distordus sur le réseau dont le taux d'harmonique (*THD*) dépasse grandement les limites contractuelles en vigueur. Afin de lutter contre la pollution harmonique provoquée par ces convertisseurs et limiter leur propagation dans le réseau, il est apparu nécessaire de développer dans le domaine industriel et sur le plan domestique des dispositifs curatifs tels que les filtres actifs d'une part et d'autre part de concevoir des convertisseurs statiques non polluants dans un cadre préventif.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles, et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante. Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

Le contrôle direct de puissance (DPC), en plus de sa simplicité une meilleure maîtrise des puissances active et réactive instantanées est obtenue mais les taux de distorsion du courant et de la tension s'avèrent légèrement supérieurs aux techniques précédentes. A ce propos, une piste de travail est en cours d'évaluation, elle concerne l'optimisation de la table de commutation afin de gérer de façon plus précise l'évolution des puissances instantanées.

Bibliographiques

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] HEGUIG Laroussi et ZEGHDI Khalifa : " Commande Directe de Puissance d'un Filtre Actif Parallèle en Conditions non Idéales" mémoire de master Université d'El-Oued ,2019
- [2] Kamel DJAZIA : "Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus "Thèse de doctorat UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF 1 , 2015
- [3] D. Ould Abdeslam : " Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension " thèse de doctorat ; université de haute Alsace UFR des sciences et techniques, 2005.
- [4] L. BENCHAITA Etude, par : "simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif Parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle - commande " Thèse de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.
- [5] HEBAIBIA Samira et DAKHLI Loubna : "Modélisation et Simulation d'un Filtre Actif Parallèle à sept Niveaux à Commande MLI " Mémoire de master Université LARBI TEBESSI – TEBESSA ,2016
- [6] M. ShafieeKoor : "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs Actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [7] L. MORAN et J. DIXON: " Power Electronics Handbook ",Academic Press, Chapter 39 pp.1-36 ,2007.
- [8] L. Benchaita : "Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle - commande", Thèse de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.
- [9] M. ShafieeKoor : "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [10] CHEBABHI Rabie & BOUDRAF Mustapha : " Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles " Mémoire d'ingénieur d'état. Université de M'sila, 2011.

- [11] ABDELATIF Med Elhadi : " Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique ", Mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.
- [12] Cour master II : "Principes de Compensation des harmoniques".
- [13] S .BOUGUERRA et I. BOURENNANE : "filtrage actifs parallèles des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive ". Mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de m'sila, 2007.
- [14] Nadhir MESBAHI : " Contribution à l'étude des performances des onduleurs multi niveaux sur les réseaux de distribution ", Thèse Doctorat. Université Annaba 2014.
- [15] A. Med Elhadi : " Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique ", Mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.
- [16] R. Chebabhi & M. Boudraf : " Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles "mémoire d'ingénieur d'état. Université de M'sila, 2011.
- [17] H. Bakhi : "Commande d'un filtre actif triphasé shunt par logique floue : " mémoire de Master. Université de M'sila, 2015.
- [18] H. Djeghloud : "Filtrage actif de puissance", Thèse de Doctorat, Université de Constantine ,2007.
- [19] S. Bouguerra& I. BOURENNANE : " Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive", Mémoire d'ingénieur. Université de M'sila, 2007.
- [20] A.V. Jouanne "Assessment of voltage unbalance ", IEEE Transactions on power delivery, pp.782-790, Vol.16, No.4, October 2001.
- [21] M. A. E. Alali : " Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension", Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg I, France, (2002).
- [22] Miao-Xin Wang, Filtrage actif de puissance : "Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
- [23] M.A. Alali : "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension", Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Septembre2002.

- [24] S. Karimi : "Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage " FPGA in the loop": Application au filtre actif parallèle ", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Janvier, 2009.
- [25] A. Gaillard : "Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Avril 2010.
- [26] N. Mesbahi : "Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution", Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.
- [27] A. Chaoui, J.P. Gaubert, F. Krim, L. Rambault: "IP controlled three-phase shunt active filter for power improvement quality ", Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Paris, France, Nov. 2006.
- [28] C.Y. Hsu, H.Y. Wu, "New single-phase active power filter with reduced energy storage capacitor", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 143, no. 1, pp. 25-30, Jan. 1996.
- [29] A. Chaoui, "Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires", Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Décembre 2010.
- [30] I.Takahashi and M. Nunokawa: "Prediction control for a cycloconverter of a Power distortion compensation system ", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 25, no. 2, pp. 348-355, Mar. /Apr. 1989.
- [31] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, I.Takahashi "Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors", IEEE Trans. on Industrial Application, vol. 34, no. 3, pp. 473-479, May/Jun. 1998.
- [32] T. Ohnishi, "Three phase PWM converter/inverter by means of instantaneous active and reactive power control ", Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Kobe, Japan, Nov.1991, vol. 1, pp. 819-8241.
- [33] A. Lopez de Heredia Bermeo : "Commandes avancées des systèmes dédiées à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension". Thèse doctorat 2006, Institut National Polytechnique de Grenoble
- [34] T.Noguchi, H.Tomiki, S.Kondo, Takahashi: "Direct Power Control of PWM converter without power-source voltage sensors". IEEE Trans. onIndustrial Application, vol 34, p. 473-479, 1998.

- [35] M. Malinowski, M. P. Kazmierkowski, S. Hansen, f. Blaabjerg, G. D. Maeques: "Virtual flux based direct power control of three phase PWM rectifiers". IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 37, no. 4, pp. 1019-1027, Jul. /Aug. 2001.
- [36] A.Bouafia : "Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs a MLI", Thèse de doctorat de l'Université de Sétif, Algerie, (2010)
- [37] A.Chaoui "Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires", Thèse de doctorat de l'Université de Sétif, Algerie, (2010)
- [38] K.Djazia, F.Krim, A.Chaoui,M.Sarra: "Active Power Filtering Using ZDPC Method Un Der Unbalanced and Distorted Grid Voltage Conditions, Energies" 2015, 8, 1584-1605