

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : ELECTRONIQUE

Spécialité : électronique industrielle

Par

- **DOUKARI Zakaria**
- **LARBAOUI Mohammed**

Intitulé

Commande d'un Filtre Actif Parallèle triphasé

Soutenu le : 15/09/2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Dr. BENTOUHAMI L</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. BOUKEZATA B</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. TALBI Billel</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH de nous avoir prêté de la santé et de la volonté pour mener à terme cette mémoire du MASTER.

Nous profitons cette occasion pour exprimer nos sincère gratitude à mon encadreur : Dr Boualem BOUKEZATA, pour ses précieux conseils, son encouragement, ses discussions techniques novatrices et pour nous fournir toutes les facilités nécessaires tout au long de ce travail. Cela n'aurait pas été possible sans sa motivation et son soutien sans fin.

Nous remercions tous les membres du personnel enseignant et administratif de département d'électronique université BBA.

Nous tenons également à remercier vivement les membres de jury : Dr. BENTOUHAMI, Dr. TALBI.

Nous exprimons nos plus grandes admirations envers nos familles pour les bénédictions, les sacrifices, les encouragements et le soutien moral qu'ils nous ont apporté tout au long de notre carrière.

Enfin, nous remercions tous nos collègues de cette formation MCIL, dont le soutien direct ou indirect qui nous ont aidés dans la réalisation de notre mémoire de fin d'étude et qui ont été très utiles pour fournir tout le soutien scientifique et personnel.

Du fond du cœur, nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à mener ce travail.

Dédicaces

*Nous dédions ce travail à toute
personne ayant contribué à
l'élaboration de ce modeste mémoire
par leur soutien et leurs
encouragements, notamment :*

Nos parents, porte du paradis.

Nos frères et sœurs.

Nos professeurs et enseignants.

Nos amis et proches.

والحمد والشكر لله رب العالمين

Résumé

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Ce dernier, enregistre un accroissement des perturbations à cause de l'augmentation des charges non linéaires en nombre et genre. Les solutions classiques sont avérées insuffisantes. En promouvant certains des nouveaux composants rapides de l'électronique énergétique, des solutions modernes et efficaces ont émergé, et le travail présenté dans cette mémoire aborde une solution moderne de contrôle de la pollution harmonique qui est le filtre parallèle actif. Dans cette thèse, nous présentons l'étude et la simulation du compensateur actif parallèle à deux niveaux. Les deux paramètres qui nécessitent un réglage précis pour une meilleure compensation sont la tension d'alimentation de l'onduleur (filtre actif) et le courant ou la tension harmonique. Après un rappel des origines, et des effets de la pollution harmonique sur les réseaux électriques, les différentes solutions de dépollution du réseau électrique nous étudions la structure du filtre actif parallèle de puissance, la commande du filtre actif à base de l'onduleur a été ensuite étudiée, à savoir les méthodes d'identification des courants harmoniques de référence: dans ce cas on utilise la méthode de la contrôle directe de puissance DPC, la commande hystérésis pour l'onduleur et un régulateur proportionnelle ou régulateur de la logique floue pour régulation du bus continue. Puis, nous allons valider par des simulations sous l'environnement Simulink/Matlab. Les résultats obtenus par simulation montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle.

Abstract

Electrical energy, mainly produced and distributed in the form of three-phase sinusoidal voltages, makes it possible to supply the electrical power necessary for the various loads on the electrical network. The latter records and increase in disturbances due to the increase in nonlinear loads in number and type. Conventional solutions have proven insufficient. By promoting some of the new fast components of energy electronics, modern and efficient solutions have emerged, and the work presented in this dissertation addresses a modern harmonic pollution control solution which is the filter. Active parallel. In this thesis, we present the study and the simulation of the two-level parallel active compensator. The two parameters that require fine tuning for best compensation are the inverter supply voltage (active filter) and the harmonic current or voltage. After a reminder of the origins, and the effects of harmonic pollution on the electrical networks, the various solutions for depolluting the electrical network, we study the structure of the active parallel power filter, the control of the active filter based on the inverter has been then studied, namely the methods of identification of the reference harmonic currents: in this case we used the method of direct power control DPC, hysteresis control for the inverter and a proportional regulator or fuzzy logic regulator for regulation of the bus continues. Then, we will validate by simulations under the Simulink/Matlab environment. The results obtained by simulation show the efficiency and good performance of the parallel active filter.

الملخص

توفر الطاقة الكهربائية ، التي يتم إنتاجها وتوزيعها بشكل أساسي على شكل جهد جيبي ثلاثي الطور ، الطاقة الكهربائية اللازمة للأحمال المختلفة على الشبكة الكهربائية. هذا الأخير يسجل زيادة في الاضطرابات بسبب الزيادة في الأحمال غير الخطية في العدد والنوع. لقد ثبت أن الحلول التقليدية غير كافية. من خلال الترويج لبعض المكونات الجديدة السريعة للإلكترونيات الطاقة ، ظهرت حلول حديثة وفعالة ، ويتناول العمل المقدم في هذه الأطروحة حلاً جديداً للتحكم في التلوث التوافقي وهو المرشح الموازي النشط. في هذه الرسالة ، نقدم دراسة ومحاكاة المعوض النشط المتوازي ذي المستويين. المعلمتان اللتان تتطلبان ضبطاً دقيقاً لتعويض أفضل هما جهد مصدر تغذية العاكس (مرشح نشط) والتيار أو الجهد التوافقي. بعد التذكير بالأصول وتأثيرات التلوث التوافقي على الشبكات الكهربائية ، الحلول المختلفة لتنظيف الشبكة الكهربائية ؛ قمنا بدراسة بنية مرشح القدرة النشط المتوازي ، ثم تمت دراسة التحكم في المرشح النشط القائم على العاكس ، والطرق المستعملة لتحديد التيارات التوافقية المرجعية: في هذه الدراسة استخدمنا طريقة التحكم المباشر في القدرة DPC ، التحكم في التخلفية للعاكس والمنظم النسبي أو المنظم المنطق الضبابي لتنظيم الجهد المستمر. بعد ذلك ، سوف نتحقق من الصحة عن طريق عمليات المحاكاة في بيئة Simulink / Matlab تظهر النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة كفاءة وأداء المرشح النشط المتوازي.

Table des matières

Introduction générale	1
I. Généralité sur les harmoniques	2
I.1 Introduction.....	2
I.2 Qualité de l'énergie électrique	3
I.3 Problématique des harmoniques	4
I.3.1 Origine des harmoniques	4
I.3.2 Caractérisation des harmoniques.....	6
I.3.3 Conséquences néfastes des harmoniques.....	11
I.4 Les solutions de dépollution des réseaux électriques	13
I.5 Filtrage.....	13
I.5.1 Avantage des filtres harmoniques	13
I.5.2 Filtrage passif d'harmoniques (méthodes traditionnelles)	14
I.5.3 Filtrage actif des harmoniques (méthodes modernes).....	19
I.6 Filtre actif parallèle (FAP).....	21
I.6.1 Principe de filtrage actif parallèle	21
I.6.2 Différents types du filtre actif parallèle	22
I.6.3 La commande à hystérésis	23
I.7 La commande PDPC	24
I.7.1 Commande directe de puissance prédictive (P-DPC) avec sélection du vecteur de commande optimal	25
I.7.2 Prédiction des références des puissances instantanées	27
I.7.3 Principe de sélection du vecteur de commande optimal.....	28
I.8 Conclusion	30

II.	Introduction	31
II.1	Commande indirect du courant	31
II.1.1	Fermeture du SAPF et analyse en régime permanent	31
II.1.2	Variation de la charge non linéaire	36
II.2	Commande direct de la puissance prédictive.....	38
II.2.1	Fermeture du filtre et analyse en régime permanent.....	38
II.2.2	Variation de la charge non linéaire	42
II.3	Conclusion	44
	Conclusion générale.....	45
	Bibliographie.....	46

Liste des figures

Figure I-1 : Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.....	5
Figure I-2 : Forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé.	6
Figure I-3 : Raccordement d'inductances anti-harmonique.	15
Figure I-4 : Filtre passif résonant.	16
Figure I-5 : Filtre passif amorti de 2 ^{ème} ordre.	17
Figure I-6 : Autres types de filtre passif amorti.	17
Figure I-7 : Schéma de principe généralisé d'un filtre actif.....	20
Figure I-8 : Subdivision des FA selon la configuration et les connexions.	21
Figure I-9 : Schéma de principe du filtrage actif.....	22
Figure I-10 : Schéma bloc de la commande à hystérésis numérique sous MATLAB Simulink.....	23
Figure I-11: Configuration du système étudié avec la commande P-DPC.	24
Figure I-12 : schéma circuit de l'onduleur multifonctionnel.....	25
Figure I-13 : schéma de l'IP avec un retour d'anti-emballement.	29
Figure II-1 : Schéma descriptif de la commande indirecte du courant avec la commande à hysteresis.....	31
Figure II-2 : Evolution du système avec le contrôle hystérésis par la technique d'identification des courants indirecte.	33
Figure II-3 : Zoom des courants du système de filtrage.....	35
Figure II-4 : Forme d'onde du courant de source (avant et après le filtrage) et son spectre associé.....	36
Figure II-5 : Evolution du système avec le contrôle hystérésis par la technique d'identification des courants indirecte sous la variation de la charge non linéaire.	37
Figure II-6 : Schéma descriptif de la commande directe de puissance prédictive.....	38
Figure II-7 : Evolution du système avec la commande directe de puissance prédictive.....	40
Figure II-8 : Zoom des courants du système de filtrage.....	41
Figure II-9 : Forme d'onde du courant de source et son spectre associé.....	42
Figure II-10 : Evolution du système avec la commande directe de puissance prédictive sous la variation de la charge non linéaire.....	43

Acronymes et abréviations

f	Fréquence
fh	Fréquence de la composante harmonique de rang h
f1	Fréquence de la composante fondamentale
THD	Taux de Distorsion Harmonique
D	Puissance Déformante
P	Puissance active
Q	Puissance reactive
S	Puissance apparente
FP	Facteur de puissance
If	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
I1h	Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
V1	Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h
Vh	Valeur efficace de la tension du fondamental
P	indice de pulsation
L	Inductance
C	Capacité
R	Résistance
MLI	modulation de largeurs d'impulsions
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre Actif Série
FP	Filtre passif
FA	Filtre actif
Rs	Résistance du réseau côté source (Ω)
Lc	Inductance côté source (H)
Lf	Inductance de filter
Rch	Résistance de charge

Rf	La résistance de filter
fr	La fréquence de résonance du filtre
fmax	La fréquence maximale de commutation
fp	La fréquence de la porteuse
Vs	La tension de réseau
VDC	La tension continue
W	Pulsation
E	Tension instantanée de phase du réseau
sa, b, c	États de commutation des interrupteurs du convertisseur de tension
Vref	La tension de reference
Vtria	la tension de la porteuse triangulaire
Em	Tension de phase maximale du réseau
M	L'indice de modulation
r	Le coefficient de réglage ou le taux de modulation
Vm	L'amplitude de la tension de référence
Upm	L'amplitude de la porteuse
sk	la valeur efficace du courant fondamental
Δi	Les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le domaine
PLL	Phase locked loop
PI	Régulateur proportionnel intégral
DPC	Direct power control
P-DPC	Predictive Direct power control
Rc	Résistance coûté de charge (Ω)

Introduction générale

L' 'évolution technologique importante dans le domaine de l'électronique de puissance a impliqué une utilisation accrue des dispositifs d'électronique de puissance modernes dans diverses applications, comme la commande électrique des moteurs, les alimentations de secours de puissance, le chauffage par induction électrique, les applications dédiées à la traction électrique, la compensation des harmoniques, ...etc

Cependant, la multiplication de charges non linéaires, notamment les redresseurs entraînent une dégradation significative de la qualité de l'énergie. Ainsi le réseau d'interconnexion est dit pollué par la génération de composantes harmoniques.

Ils sont aussi la cause des perturbations au niveau des consommateurs et d'interférences dans les réseaux de communication de proximité. Pour faire face à tous ces problèmes, les filtres constituent une solution importante.

Dans ce cadre, que ce projet de fin d'étude à été tracé et réalisé. Il est présenté en deux chapitres :

Le premier chapitre fera l'objectif de trois parties : La première partie traitera d'une manière générale les perturbations électriques et les harmoniques, ainsi que les problèmes de la qualité d'énergie, les solutions.....

La deuxième partie de ce chapitre, abordera les types de solution, classique (filtrage passif) et moderne (filtrage actif) et ses principes de fonctionnement, les avantages, les inconvénients, ainsi que le filtre actif parallèle (principe, différent type.)

La troisième partie de ce chapitre, consiste l'étude théorique d'un filtre actif parallèle triphasé par la méthode indirecte du courant avec la commande par hystérésis. Puis, la commande prédictive de puissance et évaluer les performances de notre système.

Le deuxième Chapitre entièrement consacré à la simulation numérique du fonctionnement du filtre actif parallèle à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

I. Généralité sur les harmoniques

I.1 Introduction

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive. La circulation de ces grandeurs perturbées va également provoquer des harmoniques de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique.

Plusieurs solutions de dépollution harmonique dans les réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles sont les filtres actifs.

Dans la première partie de ce chapitre nous allons présenter d'une manière générale les perturbations électriques et leur influence sur le réseau. Nous focalisons sur les perturbations harmoniques, leurs causes, leurs conséquences et les normes imposées.

Pour faire face aux perturbations harmoniques générées par les charges non-linéaires, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation de filtre passif. Ce type de solution va être abordé à la deuxième partie de ce chapitre. Le principe de fonctionnement ainsi que les avantages, les inconvénients et les solutions de filtre passifs seront présentés.

Dans la troisième partie de ce chapitre, nous allons étudier le filtre actif parallèle avec une structure d'un onduleur de tension en vue d'éliminer les courants harmoniques. Nous présentons son principe de fonctionnement, ces différents types et ces différents constituants. Les résultats de simulations d'un filtre actif parallèle à trois fils seront présentés

I.2 Qualité de l'énergie électrique

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 [1].

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 [2].

Dans ce qui suit nous nous restreindrons à la présentation des perturbations provoquées par les harmoniques ainsi que leurs conséquences néfastes sur le réseau électrique.

I.3 Problématique des harmoniques

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue. Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et donc des tensions, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques [3].

Un récepteur d'énergie est considéré par le réseau électrique comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou des courants déséquilibrés ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque l'impédance de celui-ci n'est pas négligeable. Le troisième réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques [4].

Les harmoniques de courant, une fois injectés par des charges non linéaires, se propagent à travers le réseau électrique en affectant la forme d'onde des tensions aux différents points du réseau. Cette propagation n'est limitée que par les bifurcations (points de division des courants) et les impédances du réseau qui dépendent généralement de la fréquence des courants harmoniques. La présence des harmoniques de courant se révèle essentiellement à travers leurs effets sur la tension du réseau [3].

I.3.1 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 [2].

En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent [1]. Nous pouvons également observer des sous-harmoniques ou des inter-

harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale. La figure 1.1 illustre un exemple de forme d'onde d'une tension distordue contenant, en plus du terme fondamental de fréquence 50Hz, trois harmoniques de rang impair 5, 7 et 11.

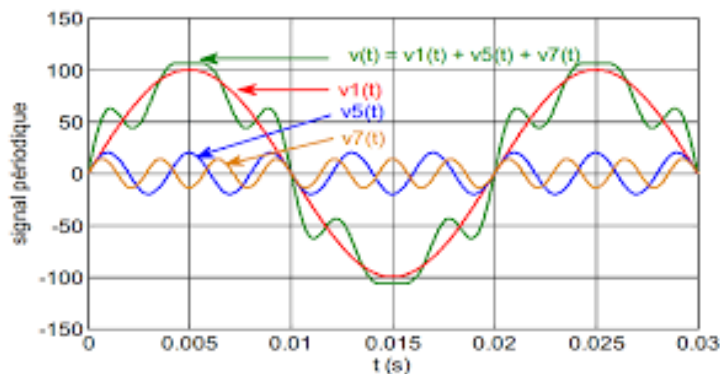


Figure I-1 : Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.

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.3.1.1 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 0.48 0.485 0.49 0.495 0.5 -120 -90 -60 -30 0 30 60 90 120 $v(t)$ $v_1(t)$ $v_5(t)$ $v_7(t)$ $v_{11}(t)$ Temps[s] La Pollution Harmonique due aux Convertisseurs Statiques : Causes et Remèdes 9 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 [2].

I.3.1.2 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 [2]. A titre d'exemple, la figure 1.2 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.

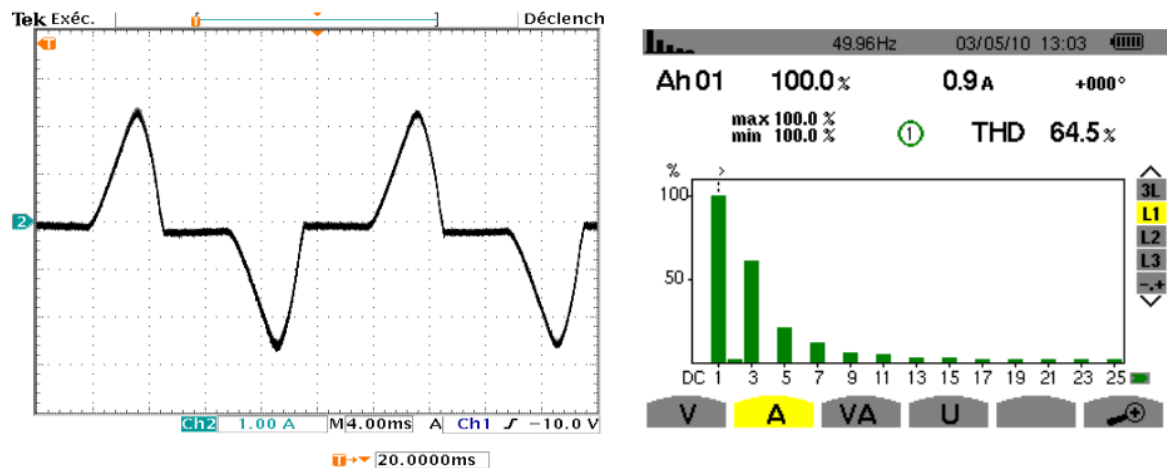


Figure I-2 : Forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé.

I.3.2 Caractérisation des harmoniques

Tout signal $y(t)$ déformé et périodique de période 'T' peut se décomposer en une somme d'ondes sinusoïdales et d'une composante continue éventuelle grâce à la décomposition en série proposée par le mathématicien Français Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) [3]. Cette décomposition s'écrit sous les formes suivantes :

$$y(t) = Y_0 + \sqrt{2}(Y_1 \cdot \sin(\omega t - \varphi_1) + Y_2 \cdot \sin(2\omega t - \varphi_2) + \dots + Y_h \cdot \sin(h \cdot \omega t - \varphi_h)) \quad (1.1)$$

Qui peut s'écrire sous forme de somme :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h \cdot \omega t - \phi_h) \quad (1.2)$$

Avec :

- ✓ Y_0 : Valeur moyenne ou composante continue du signal $y(t)$.
- ✓ h : Range de l'harmonique.
- ✓ Y_h : Valeur efficace de l'harmonique au range h .
- ✓ ω : Pulsation fondamentale ($2\pi \cdot f_1 = 2\pi / T$).
- ✓ ϕ : Phase de l'harmonique au range h .

Dans l'écriture de l'équation 1.1, il est possible d'identifier le terme fondamentale, correspondant au range 1, qui est une composante sinusoïdale de fréquence égale à f_1 , généralement 50 Hz ou 60 Hz. Puis des composantes harmoniques sinusoïdales de rang h , de fréquences multiples de celle du fondamental. Le rang harmonique est donc le rapport entre la fréquence du signal harmonique et du fondamental. En règle générale, une distinction est opérée entre les harmoniques de rangs pairs (2, 4, 6, 8...etc.) et les harmoniques de rangs impairs (3, 5, 7, 9 ...etc.) plus répandus et influents dans les réseaux industriels. Dans l'écriture de l'équation 1.1, il est possible d'identifier le terme fondamental, correspondant au rang 1, qui est une composante sinusoïdale de fréquence égale à f_1 , généralement 50 Hz ou 60 Hz. Puis des composantes harmoniques sinusoïdales de rang h , de fréquences multiples de celle du fondamental. Le rang harmonique est donc le rapport entre la fréquence du signal harmonique et du fondamental. En règle générale, une distinction est opérée entre les harmoniques de rangs pairs (2, 4, 6, 8...etc.) et les harmoniques de rangs impairs (3, 5, 7, 9 ...etc.) plus répandus et influents dans les réseaux industriels.

I.3.2.1 Expression de la valeur efficace

La valeur efficace vraie (TRMS values: True Root Mean Square values) conditionne les échauffements. Pour une grandeur périodique non sinusoïdale, son expression est :

$$Y_{\text{trms}} = \sqrt{Y_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} (Y_h)^2} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_h^2} \quad (1.3)$$

Cette définition est valable aussi bien pour les tensions que pour les courants. Il est à noter que pour une grandeur purement sinusoïdale, la valeur efficace correspond à sa valeur maximale divisée par la racine carrée de deux.

1.3.2.2 Taux de distorsion harmonique THD (%)

Le taux individuel d'harmonique est défini comme le rapport (*en %*) de l'amplitude de l'harmonique au rang h ramenée à celle du fondamental:

$$T_{\text{aux}(h)} = 100 \frac{Y_{h,\text{trms}}}{Y_{1,\text{trms}}} (\%) \quad (1.4)$$

La notion la plus couramment usitée est le taux global de distorsion harmonique THD (Total Harmonic Distorsion) pour caractériser le taux de déformation d'une onde électrique [2 Col]. C'est le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental seul (norme IEC 61000-2-2):

$$\text{THD} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Y_{h,\text{trms}}^2}}{Y_{1,\text{trms}}} (\%) \quad (1.5)$$

Il est possible, de façon moins usuelle, de définir le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle de la grandeur déformée :

$$\text{THD} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Y_{h,\text{trms}}^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} Y_{h,\text{trms}}^2}} (\%) \quad (1.6)$$

Dans la plupart des applications, il suffit de considérer les harmoniques entre le rang 2 et 25, même si pour la norme EN 50160 l'analyse des données doit s'effectuer jusqu'au rang 50 [6] [8].

I.3.2.3 Expression des puissances mises en jeux

Pour une charge non linéaire, alimentée par une source de tension $v(t)$ et parcourue par un courant $i(t)$, dont les expressions s'écrivent respectivement :

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h \cdot \omega t)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h \cdot \omega t - \varphi_h) \quad (1.7)$$

Est le siège d'une puissance instantanée :

$$p(t) = m \cdot v(t) \cdot i(t) \quad (1.8)$$

Avec :

✓ m : nombre de phase

Dans ce cas, le calcul de la puissance instantanée comporte des produits de fonctions sinusoïdales de fréquences différentes. Par contre, seules les composantes de même fréquence contribuent à l'élaboration de la puissance moyenne ou puissance active P effectivement consommée et exprimée en Watt (W) :

$$P = m \cdot \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h \quad (1.9)$$

L'expression de la puissance réactive Q est définie comme la somme pondérée des réactions associées à chaque rang harmonique, à la différence de la puissance active. Elle s'exprime en volt Ampère Réactif (VAR) :

$$Q = m \cdot \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h \quad (1.10)$$

En ce qui concerne la puissance apparente S , elle se calcule à l'aide du produit des valeurs efficaces de la tension et du courant et n'est plus la résultante de $\sqrt{P^2+Q^2}$ comme en régime purement sinusoïdal. Son unité est le Volt Ampère (VA) :

$$S = m \cdot V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} = m \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (1.11)$$

La contribution des produits des rangs harmoniques engendre une puissance déformante 'D', exprimée en Volt Ampère Déformant (VAD) et peut s'écrire sous la forme:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.12)$$

Le facteur de puissance F est égal au rapport de la puissance active sur la puissance apparente. Il caractérise le dimensionnement d'un système électrique puisqu'il représente la puissance utile consommée par rapport à la puissance apparente au niveau de la source [7].

$$F = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (1.13)$$

Le cas particulier, où la source de tension est considérée comme parfaitement sinusoïdale (réseau de distribution idéal) conduit à une simplification des écritures. En effet, la tension $v(t)$ s'écrit :

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t)$$

D'où les nouvelles expressions des puissances :

$$\begin{aligned} P &= m \cdot V \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \\ Q &= m \cdot V \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \end{aligned} \quad (1.14)$$

Avec :

- ✓ $\cos \varphi_1$ qui est le facteur de déplacement fondamental à la source. En ce qui concerne le facteur de puissance il devient :

$$F = \frac{P}{S} = \frac{I_1 \cdot \cos \varphi_1}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (1.15)$$

Ce qui peut s'écrire aussi sous la forme :

$$F = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (1.16)$$

I.3.3 Conséquences néfastes des harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiés, on distingue deux sortes d'effets possibles [9] :

- **les effets quasi-instantanés :**

Concernent certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation,...etc. La présence des harmoniques sur le réseau provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur crête de l'onde.

- **les effets à terme :**

Se rapportent essentiellement aux machines tournantes, aux transformateurs et aux condensateurs, ce qui se manifeste par des échauffements supplémentaires et l'augmentation du niveau sonore. Il en découle la destruction de matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.

La liste suivante donne une idée de l'impact des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent qui font partie intégrante du réseau électrique, tels que les.

- **Alternateurs :**

Pertes supplémentaires dans les enroulements statiques et dans les amortisseurs liées à l'augmentation de la valeur efficace du courant absorbé. Ces pertes provoquent un échauffement supplémentaire et réduisent également le rendement de ces machines.

- **câbles électriques :**

Pertes Joule supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques homopolaires et corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation de courants harmoniques pairs associés à une composante continue [3]. La présence des harmoniques dans le réseau diminue aussi la capacité de transport en puissance active des lignes.

- **Transformateurs :**

Ils sont les constituants les plus directement affectés par les courants harmoniques. Ces derniers produisent des pertes additionnelles dans les enroulements. Ces pertes ne sont pas seulement dues à l'effet Joule pelliculaire, mais aussi à des courants induits dans les bobinages, le noyau et les pièces métalliques par les composantes à hautes fréquences des champs de fuite [5].

- **Moteurs à courant alternatif :**

La déformation de la forme d'onde de la tension du réseau, due à l'interaction entre les courants harmoniques et l'impédance équivalente du réseau, influe sur le fonctionnement des machines électriques à courant alternatif en général et sur celui des moteurs asynchrones en particulier (pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements et pulsation du couple) [2].

- **Condensateurs :**

Ils sont aussi très affectés par les courants harmoniques. Les condensateurs branchés en parallèle sur les réseaux pour la compensation de la puissance réactive (correction du facteur de puissance) ont des impédances d'autant plus faibles que la fréquence est élevée. Les courants harmoniques se superposent au courant fondamental et causent des pertes supplémentaires qui peuvent excéder la capacité thermique des condensateurs et réduire considérablement leur durée de vie. De plus, des phénomènes de résonance peuvent subvenir et soumettre les condensateurs à des surtensions, lesquelles sont susceptibles de les dégrader, voire de perforer leur isolation [1].

- **Équipements à base d'électronique de puissance :**

Dysfonctionnement lié à la déformation de la tension qui peut créer des faux passages par zéro (perte de synchronisation).

- **Ordinateurs :**

Troubles fonctionnels liés à la distorsion de la tension du réseau.

- **Réseaux de télécommunication :**

Génération de bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication. Dans des cas particuliers, surtout lors de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable [3].

I.4 Les solutions de dépollution des réseaux électriques

La distorsion harmonique dans les systèmes de distribution de puissance peut être supprimée par le biais de trois approches de base :

1. Filtre Passif.
2. Filtre Actif de puissance.
3. Filtre Hybride de puissance.

I.5 Filtrage

I.5.1 Avantage des filtres harmoniques

Les transformateurs et augmenter leur capacité du réseau en KVA.-Réduire les pertes par effets Joules, économie d'énergie en KWH.

S'aligner aux normes internationales pour la distorsion du courant ($THD-I < 10\%$) et la distorsion de la tension ($THD-V < 5\%$).

Réduire la puissance réactive en KVAR.

Améliorer le facteur de puissance PF en le portant à des valeurs proches de 1.

Protéger complètement les charges traitées.

Supprimer les transitoires causée par les batteries de condensateurs automatiques et par le changement de la charge.

Améliorer les capacités du variateur de vitesse à supporter les hausses et les chutes de tension. 99% d'efficacité (Consommation négligeable).

La section suivante traite les propriétés générales des différentes approches d'atténuation des distorsions harmoniques. Les avantages et les inconvénients de ces approches sont aussi présentés dans cette section.

I.5.2 Filtrage passif d'harmoniques (méthodes traditionnelles)

L'installation des filtres passifs vise à réduire les tensions et les courants harmoniques dans les réseaux à des niveaux acceptables, d'autre part, elle vise à fournir tout ou une partie de la puissance réactive consommée. Il faut donc concevoir un filtre minimum; autrement dit un filtre qui supprime adéquatement les harmoniques à un coût minimal et qui fournit de la puissance réactive (pas nécessairement toute la puissance requise). Dans ce chapitre nous allons aborder le filtrage passif des courants harmoniques. En effet, nous allons présenter, le principe de filtrage passif, les types des filtres passifs, les avantages et les inconvénients des filtres passifs [10].

I.5.2.1 Principe de filtrage passif

Le filtrage passif est basé sur l'utilisation de circuits électriques RLC (résistance, inductance, capacité) dit filtre passif, dont le principe est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dévier les courants et à éliminer les tensions harmoniques. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. Donc avant le choix des éléments constituant le filtre passif et leur dimensionnement, une connaissance précise des rangs harmoniques qui devront être filtrés et des atténuations requises est nécessaire car plusieurs types de filtres passifs sont utilisés pour différentes dépollutions à réaliser [11][13].

I.5.2.2 Types des filtres passifs

a- Inductance anti-harmonique :

Cette première solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée.

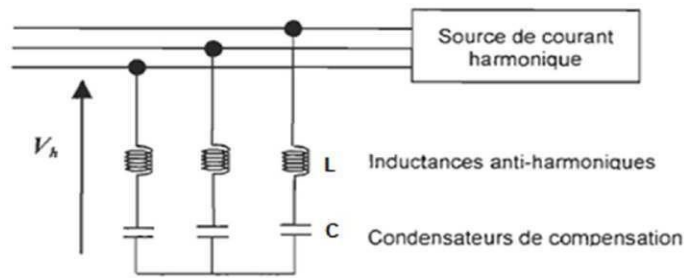


Figure I-3 : Raccordement d'inductances anti-harmonique.

Ce type de filtre a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques. Il a en outre pour effet de réduire les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Il permet souvent de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau, vues du point d'injection au voisinage de la fréquence d'accord et donc les tensions harmoniques sur le réseau.

La fréquence de résonance du filtre est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.17)$$

La fréquence d'anti-résonance \$f_{ar}\$ est obtenue lorsque l'impédance équivalente à \$L\$ en parallèle à \$C\$ tend vers l'infini :

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L + L_{cc})C}} \quad (1.18)$$

Pour éviter que ce filtre présente une résonance parallèle (anti-résonance) avec l'inductance du réseau sur lequel ils sont raccordés, on les accorde sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique. A noter aussi que l'installation d'inductances anti-harmoniques accroît la tension permanente à la fréquence fondamentale aux bornes des condensateurs qui doivent donc être dimensionnés en conséquence [14].

b- Filtre passif résonant :

Un filtre passif résonant est un circuit RLC en série, accordé à la fréquence d'une harmonique généralement d'un rang inférieur. Le principe des filtres résonnants est de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique d'un rang

déterminé. On installe très souvent plusieurs filtres résonants en parallèle, correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer [12].

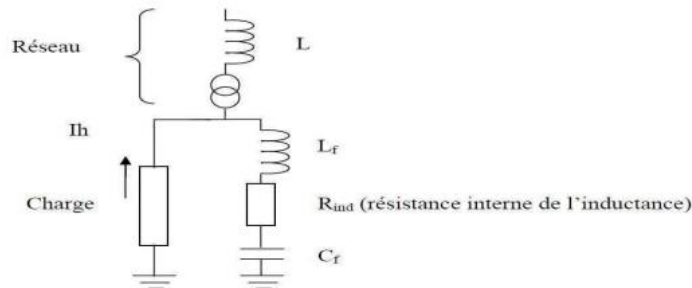


Figure I-4 : Filtre passif résonant.

L'impédance du filtre passif résonant est donnée par l'expression suivante :

$$Z = R + \frac{LC\omega^2 - 1}{C\omega} \quad (1.19)$$

La fréquence de résonance du filtre est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.20)$$

A la fréquence de résonance l'impédance du filtre est réduite à $Z = R$ [15].

La fréquence d'anti-résonance f_{ar} est obtenue lorsque l'impédance équivalente à L et C en parallèle tend vers l'infini :

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L + L_{cc})C}} \quad (1.21)$$

L'inductance du shunt possède par nature une résistance R (résistance de la bobine). On définit alors le facteur de qualité :

$$Q = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{RC\omega_0} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.22)$$

c- Filtre passif amorti :

Le filtre passif amorti est un circuit RLC constitué par la mise en série d'une capacité avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une résistance dite résistance d'amortissement et d'une inductance.

On utilise les filtres amortis pour filtrer simultanément des harmoniques du rang supérieur, et non une harmonique d'un rang particulier. Il est recommandé lorsque les performances demandées ne sont trop élevées. On l'appelle aussi un filtre passe haut [12].

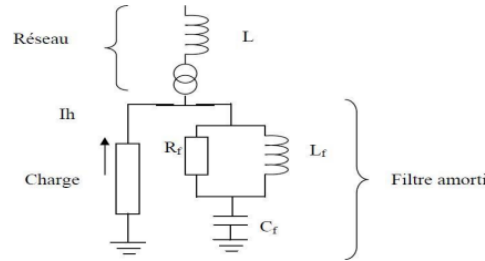


Figure I-5 : Filtre passif amorti de 2ème ordre.

Après quelques calculs, on montre que la fréquence de résonance de ce filtre est :

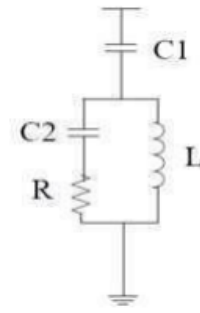
$$f_r = \frac{1 + qQ_f}{2\pi q \sqrt{LC_f(Q^2 - 1)}} \quad (1.23)$$

Q_f : est le facteur de qualité du filtre :

$$Q_f = \frac{1 \sqrt{L_f}}{r_f C_f} \quad (1.24)$$



- (A) : filtre amorti de 1er ordre



- (B) : filtre amorti de 3ème ordre

Figure I-6 : Autres types de filtre passif amorti.

Le filtre amorti est moins sensible aux variations de ses éléments qu'un filtre résonant. L'utilisation des filtres amortis rend nécessaire le filtrage des rangs harmoniques inférieurs à f_r . D'ailleurs lors du choix des filtres, très souvent plusieurs filtres résonants pour les rangs harmoniques inférieurs et un filtre amorti sont utilisés, tous montés en parallèle avec la charge polluante.

I.5.2.3 Avantages et inconvénients des filtres passifs

a- Avantages des filtres passifs :

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance.

Les filtres amortis offrent plusieurs avantages : - Leurs performances sont moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence, aux tolérances des composants, etc. - Ils présentent une faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquences harmoniques. - L'usage de multiples filtres résonants peut provoquer des résonances parallèles entre les filtres et l'admittance du réseau. Dans ce cas, l'usage d'un ou de plusieurs filtres amortis est préférable [16].

b- Inconvénients des filtres passifs :

- La présence sur un même réseau de deux filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, mais en pratique légèrement différent, provoque entre eux la circulation de courants harmoniques très importants qui provoque rapidement leur destruction. Ce cas se rencontre facilement en raison du fait que la fréquence d'accord varie lentement avec le vieillissement des éléments du filtre. Il faut absolument éviter de raccorder des filtres harmoniques de même rang sur un même réseau.
- La mise en parallèle d'un filtre anti-harmonique et d'une batterie de condensateurs provoque une contrainte pouvant amener la destruction des condensateurs.
- Lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants.
- L'implantation de filtres passifs sur un réseau nécessite une étude poussée et précise. En outre, il n'est pas toujours possible de connaître tous les paramètres du réseau, nécessaire à l'étude, lorsqu'il est de grande dimension.

- L'amortissement de la résonance dans les systèmes de puissance par les filtres passifs peut introduire des résonances additionnelles indésirables pouvant conduire à la destruction de ces filtres.
- Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre, - Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance ou de la capacité ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble.
- Les pertes dans la résistance sont généralement élevées.
- Le filtre de premier ordre n'est pas très utilisé, car il exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale. Le filtre de second ordre fournit de meilleures performances de filtrage, mais avec des pertes plus élevées à la fréquence fondamentale que le filtre de troisième ordre [15] [16].

I.5.3 Filtrage actif des harmoniques (méthodes modernes)

Des progrès remarquables dans l'électronique de puissance ont suscité l'intérêt de FA pour l'atténuation de la distorsion harmonique [17]. Le principe de base du FA est d'utiliser les technologies de l'électronique de puissance pour produire des composantes de courants spécifiques qui annulent les composantes des courants harmoniques causées par la charge non linéaire. La figure 1.6 présente les fonctionnalités d'un système typique du FA et leurs connexions. Les informations concernant les courants harmoniques et d'autres variables du système sont transmises à l'estimateur de signal de référence de courant/tension de compensation.

Le signal de référence de compensation de l'estimateur pilote le contrôleur du système global. Ce dernier transmet l'information au générateur de signal assurant le déclenchement de l'interface de puissance. La sortie du générateur de signal de déclenchement commande le circuit de puissance par l'intermédiaire d'une interface appropriée dédiée aux semi-conducteurs de puissance. Enfin, le circuit de puissance dans le diagramme généralisé peut être connecté en parallèle, en série ou en série/parallèle dans des configurations qui sont en fonction de l'inductance/transformateur d'interface utilisée.

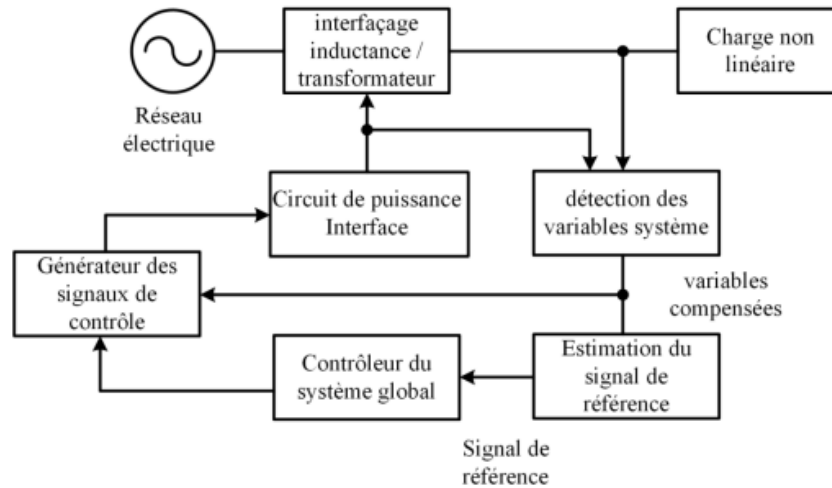


Figure I-7 : Schéma de principe généralisé d'un filtre actif.

Les filtres actifs ont un certain nombre d'avantages par rapport aux filtres passifs. Tout d'abord, ils peuvent supprimer non seulement les harmoniques de courant d'alimentation, mais aussi les courants réactifs. En outre, contrairement aux filtres passifs, ils ne causent pas de résonances nuisibles avec le système de distribution de puissance. Par conséquent, les performances du FA sont indépendantes des propriétés du système de distribution de puissance [18].

D'autre part, les FA ont aussi quelques inconvénients. Le filtrage actif est une technologie relativement récente, pratiquement moins de quatre décennies. Il est encore nécessaire de poursuivre la recherche et le développement pour bien valider cette technologie. Une caractéristique défavorable mais indissociable du FA est la nécessité d'une commutation rapide du convertisseur lors de l'injection des courants compensateurs dans le circuit de puissance du FA. Il en résulte un bruit de fréquence élevée qui peut provoquer une interférence électromagnétique (EMI), dans les systèmes de distribution de puissance.

Le FA peut être relié dans plusieurs configurations du circuit électrique comme il est illustré dans le schéma synoptique représenté sur la figure 1.7. En général, ils sont divisés en trois configurations principales : FAP parallèle, FAS série et FAH hybride.

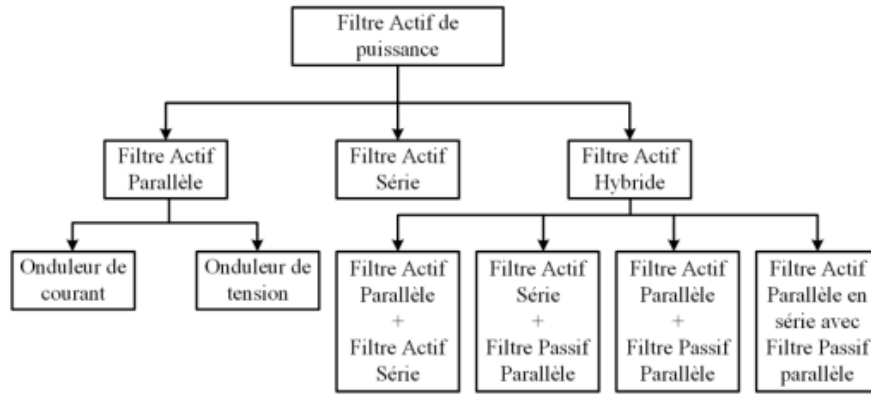


Figure I-8 : Subdivision des FA selon la configuration et les connexions.

I.6 Filtre actif parallèle (FAP)

Afin de réduire les harmoniques au niveau du réseau électrique, nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle, par les avantages qu'il représente, tel que l'adaptation aux variations de la charge polluante. Le filtre actif parallèle est un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions, il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux et en opposition de phase à ceux absorbés par la charge polluante. Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant.

Dans ce chapitre nous étudierons la structure générale, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement du filtre actif parallèle [17] [19].

I.6.1 Principe de filtrage actif parallèle

Le filtre actif parallèle (FAP) est un onduleur de tension (ou de courant) qui se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants ifs absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal. Le principe de base du FAP est montré sur la figure I.9.

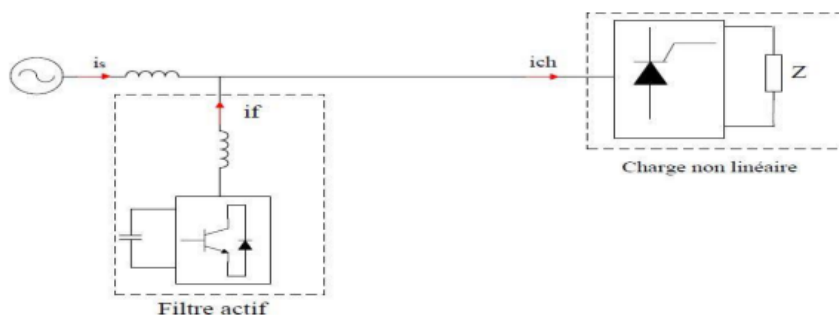


Figure I-9 : Schéma de principe du filtrage actif.

I.6.2 Différents types du filtre actif parallèle

Ces filtres sont proposés comme des solutions modernes et efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs. Parmi toutes les solutions modernes, les filtres actifs peuvent être monophasés, triphasés à trois fils ou triphasé à quatre fils. Ils peuvent aussi être hybrides (passif + actif). On trouve aussi les configurations associant les filtres parallèles avec des filtres série.

Deux raisons principales ont conduit à concevoir les nouvelles structures de filtrage moderne. 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.

En effet, les méthodes dites "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénients. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui a permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la forme d'onde de la phase du courant d'entrée.

I.6.3 La commande à hystérésis

Dans cette section, nous présenterons la méthode de commande classique connue sous l'intitulé : commande à hystérésis. Il est bien connu que cette méthode possède des propriétés intéressantes qui font d'elle l'une des plus utilisées. Parmi celles-ci, on peut mentionner sa simplicité d'implémentation, sa réponse rapide, le fait de limiter la déviation maximale du courant et une certaine insensibilité aux variations paramétriques. Néanmoins, elle présente quelques désavantages qui limitent son usage dans des applications demandant une haute performance, comme par exemple son incapacité de fixer la fréquence de commutation, l'utilisation arbitraire du vecteur zéro et les excursions des courants qui peuvent atteindre jusqu'au double de la bande d'hystérésis [12].

I.6.3.1 La commande à hystérésis numérique

Le schéma de commande à hystérésis numérique est illustré sur la figure I.10. Après acquisition des signaux des tensions, des courants de la source et celle du bus continue, respectivement (v_s (a,c), i_s (a,b, c), V_{dc}), ces derniers, après le passage au travers des CANs vont être exploités par l'algorithme de commande entièrement numérique implanté sur la carte DS1104. Ainsi, à partir du régulateur IP5 et des sinusoïdes unitaires issues de la P.L.L, nous obtenons les trois références de courants. Les courants de la source vont être comparés à ces dernières via des comparateurs à hystérésis à bande fixe, afin de générer les signaux de commande numériques à partir du port Digital I/O situé sur le connecteur de la carte DS1104 [12].

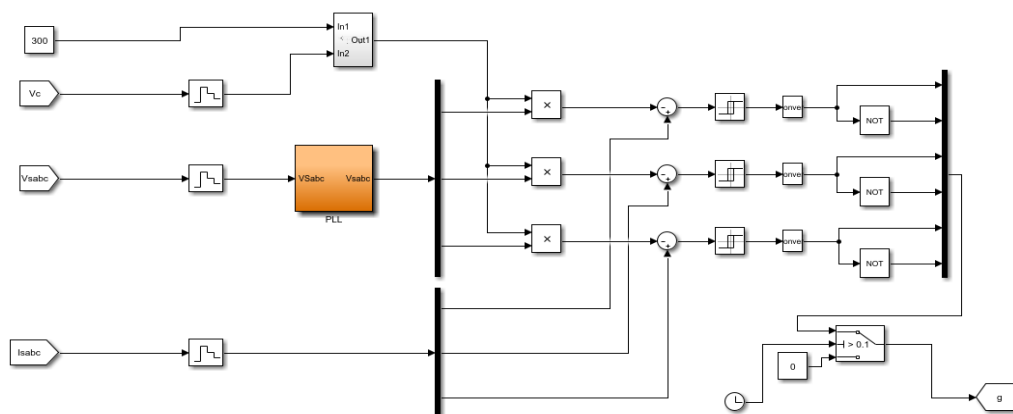


Figure I-10 : Schéma bloc de la commande à hystérésis numérique sous MATLAB Simulink.

I.7 La commande PDPC

Afin d'aboutir à une table de commutation assurant un contrôle simultané des puissances active et réactive, durant tous les secteurs, il est indispensable d'étudier les variations provoquées par l'application de chacun des vecteurs de commande sur ces dernières, et cela au cours d'une période complète de la tension du réseau. Les vecteurs de commande sélectionnés dans la nouvelle table de commutation doivent assurer la restriction de l'erreur de suivi de référence des deux puissances active et réactive, simultanément. Afin d'aboutir à une table de commutation assurant un contrôle simultané des puissances active et réactive, durant tous les secteurs, il est indispensable d'étudier les variations provoquées par l'application de chacun des vecteurs de commande sur ces dernières, et cela au cours d'une période complète de la tension du réseau. Les vecteurs de commande sélectionnés dans la nouvelle table de commutation doivent assurer la restriction de l'erreur de suivi de référence des deux puissances active et réactive, simultanément [22].

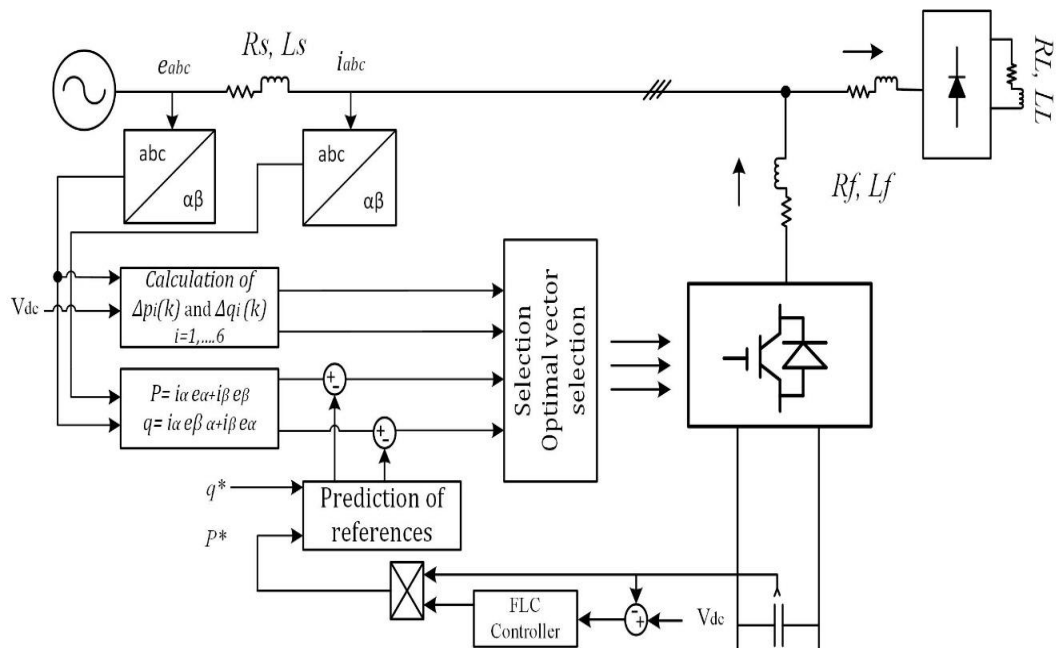


Figure I-11: Configuration du système étudié avec la commande P-DPC.

I.7.1 Commande directe de puissance prédictive (P-DPC) avec sélection du vecteur de commande optimal

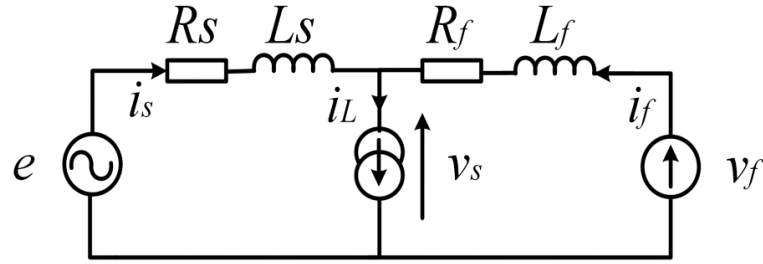


Figure I-12 : schéma circuit de l'onduleur multifonctionnel.

D'après la Figure I-12, en négligeant l'effet des résistances de source et de filtre, les équations électriques sont données comme suit :

$$e - v_s = L_s \frac{di_s}{dt} \quad (1.25)$$

$$v_f - v_s = L_f \frac{di_f}{dt} \quad (1.26)$$

$$i_s + i_f = i_l \quad (1.27)$$

Le but du SAPF est d'obtenir un courant de source sinusoïdal i_s en utilisant la relation (1.27). Supposons que le courant de charge non linéaire peut être écrit comme la somme de la composante de courant fondamentale ($i_l(f)$) et des harmoniques de courant ($i_l(h)$) comme suit :

$$i_l = i_{l,f} + i_{l,h} = i_s + i_f \quad (1.28)$$

Où $i_l(f)$ et $i_l(h)$ sont les courants fondamentaux et harmoniques générés par la charge non linéaire. Alors, par manipulation dans (1.28) la formule suivante peut être obtenue :

$$i_{l,f} - i_s = -(i_{l,h} - i_f) \Rightarrow \Delta i_s = -\Delta i_f \quad (1.29)$$

Nous montrons à partir de l'équation (1.29) que la variation du courant de la source est égale à la variation du courant du filtre avec un signe négatif. Ainsi, à partir de l'approximation de ($\Delta i = di$) pour une faible variation de courant l'équation (1.29) peut s'écrire :

$$\mathbf{di}_s = -\mathbf{di}_f \quad (1.30)$$

En soustrayant (1.26) de (1.25) et en substituant (1.30) dans l'équation résultat, nous obtiendrons l'équation suivante :

$$\mathbf{v}_f - \mathbf{e} = (\mathbf{L}_f + \mathbf{L}_s) \frac{d\mathbf{i}_f}{dt} \quad (1.31)$$

L'équation finale décrivant le SAPF est donnée comme suit :

$$\mathbf{v}_f - \mathbf{e} = \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}_f}{dt} \quad (1.32)$$

Où : $\mathbf{L} = \mathbf{L}_f + \mathbf{L}_s$

Dans le référentiel α - β stationnaire et avec un système triphasé équilibré, la dynamique des courants tirés par un onduleur multifonctionnel, est donnée comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{f\alpha}}{dt} = \frac{1}{L} (\mathbf{e}_\alpha - \mathbf{v}_\alpha) \\ \frac{di_{f\beta}}{dt} = \frac{1}{L} (\mathbf{e}_\beta - \mathbf{v}_\beta) \end{cases} \quad (1.33)$$

A partir de cette équation, une discrétisation du premier ordre, sur une période de commutation T_s , les composantes du vecteur courant en fin de période de commutation sont données par l'équation suivante :

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{i}_\alpha = \mathbf{i}_\alpha(\mathbf{k} + 1) - \mathbf{i}_\alpha(\mathbf{k}) = \frac{T_s}{L} (\mathbf{e}_\alpha(\mathbf{k}) - \mathbf{v}_\alpha(\mathbf{k})) \\ \Delta \mathbf{i}_\beta = \mathbf{i}_\beta(\mathbf{k} + 1) - \mathbf{i}_\beta(\mathbf{k}) = \frac{T_s}{L} (\mathbf{e}_\beta(\mathbf{k}) - \mathbf{v}_\beta(\mathbf{k})) \end{cases}$$

Dans le référentiel stationnaire α - β et pour un système triphasé équilibré, les puissances active et réactive instantanées sont définies comme suit :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_\alpha & \mathbf{e}_\beta \\ \mathbf{e}_\beta & -\mathbf{e}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_\alpha \\ \mathbf{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (1.34)$$

Si la période d'échantillonnage T_s est supposée petite devant la période de la tension d'alimentation, les composantes de $\mathbf{e}_{\alpha\beta}$ sont supposées constantes sur la période de commutation ($\mathbf{e}_{\alpha\beta}(\mathbf{k}+1) = \mathbf{e}_{\alpha\beta}(\mathbf{k})$). Il en résulte que la variation des puissances active et réactive entre deux instants d'échantillonnage successifs peut s'exprimer comme suit :

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{p} = \mathbf{e}_\alpha(\mathbf{k}) \cdot \Delta \mathbf{i}_\alpha + \mathbf{e}_\beta(\mathbf{k}) \cdot \Delta \mathbf{i}_\beta \\ \Delta \mathbf{q} = \mathbf{e}_\beta(\mathbf{k}) \cdot \Delta \mathbf{i}_\alpha + \mathbf{e}_\alpha(\mathbf{k}) \cdot \Delta \mathbf{i}_\beta \end{cases} \quad (1.35)$$

Seules sept variations possibles peuvent être réalisées sur les puissances active et réactive, en appliquant chacun des sept vecteurs de commande pendant une période de commutation. Puissances réactives. Ces variations, nommées $\Delta p_i(k)$ et $\Delta q_i(k)$, s'expriment par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{p}_i = \frac{T_s}{L} \|\mathbf{e}_{\alpha\beta}\|^2 - \frac{T_s}{L} \|\mathbf{e}_{\alpha\beta}\| \cdot [\mathbf{cos}(\theta) \mathbf{v}_{\alpha i} + \mathbf{sin}(\theta) \mathbf{v}_{\beta i}] \\ \Delta \mathbf{q}_i = \frac{T_s}{L} \|\mathbf{e}_{\alpha\beta}\| \cdot [\mathbf{cos}(\theta) \mathbf{v}_{\beta i} - \mathbf{sin}(\theta) \mathbf{v}_{\alpha i}] \end{cases} \quad \mathbf{i} = 0, 1, \dots, 6 \quad (1.36)$$

En grandeurs normalisées ces variations sont exprimées par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \overline{\Delta \mathbf{p}}_i = \frac{\Delta \mathbf{p}_i}{\frac{T_s}{L} \|\mathbf{e}_{\alpha\beta}\| \cdot \|\mathbf{v}_{\alpha\beta}\|} = \frac{\|\mathbf{e}_{\alpha\beta}\|}{\|\mathbf{v}_{\alpha\beta}\|} - [\mathbf{cos}(\theta) \bar{\mathbf{v}}_{\alpha i} + \mathbf{sin}(\theta) \bar{\mathbf{v}}_{\beta i}] \\ \overline{\Delta \mathbf{q}}_i = \frac{\Delta \mathbf{q}_i}{\frac{T_s}{L} \|\mathbf{e}_{\alpha\beta}\| \cdot \|\mathbf{v}_{\alpha\beta}\|} = \mathbf{cos}(\theta) \bar{\mathbf{v}}_{\beta i} - \mathbf{sin}(\theta) \bar{\mathbf{v}}_{\alpha i} \end{cases} \quad \mathbf{i} = 0, 1, \dots, 6 \quad (1.37)$$

Les variations souhaitées, $\Delta p_i(k)$ et $\Delta q(k)^*$, indiquées par l'équation (1.37), peuvent également être écrites en quantités normalisées en utilisant comme suit :

$$\begin{cases} \overline{\Delta \mathbf{p}}_i^*(\mathbf{k}) = \frac{\Delta \mathbf{p}_i^*(\mathbf{k})}{\frac{T_s}{L} \|\mathbf{e}_{\alpha\beta}\| \cdot \|\mathbf{v}_{\alpha\beta}\|} \\ \overline{\Delta \mathbf{q}}_i^*(\mathbf{k}) = \frac{\Delta \mathbf{q}_i^*(\mathbf{k})}{\frac{T_s}{L} \|\mathbf{e}_{\alpha\beta}\| \cdot \|\mathbf{v}_{\alpha\beta}\|} \end{cases} \quad (1.38)$$

I.7.2 Prédiction des références des puissances instantanées

Le P-DPC nécessite la prédiction des références de puissance active et réactive instantanées au temps d'échantillonnage suivant $p^*(k+1)$ et $q^*(k+1)$. La puissance réactive de référence est fréquemment imposée nulle pour un fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire. L'estimation de la référence de cette puissance au temps d'échantillonnage suivant $(k+1)$ est donnée par l'équation suivante :

$$\mathbf{q}^*(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{q}^*(\mathbf{k}) \quad (1.39)$$

La commande de puissance active $p^*(k)$ est fournie par le contrôleur de tension de bus continu FLC externe. Si l'erreur de poursuite de la tension du bus continu est supposée constante sur deux périodes d'échantillonnage successives, la commande de puissance active instantanée à l'instant d'échantillonnage suivant $(k + 1)$ peut être estimée à l'aide d'une extrapolation linéaire. La référence de puissance active à l'instant d'échantillonnage suivant peut être estimée à l'aide de l'expression ci-dessous :

$$\mathbf{p}^*(\mathbf{k} + \mathbf{1}) = \mathbf{2} \mathbf{p}^*(\mathbf{k}) - \mathbf{p}^*(\mathbf{k} - \mathbf{1}) \quad (1.40)$$

I.7.3 Principe de sélection du vecteur de commande optimal

Cette approche prédictive est basée sur l'application d'une commande unique à chaque période de commutation, ce qui est similaire à la DPC utilisant une table de commutation prédéfinie, sauf que le vecteur de commande appliqué cette fois est optimal. Sauf que le vecteur de contrôle appliqué est optimal.

Elle correspond à la variation la plus adéquate parmi les sept variations possibles décrites par l'équation (1.37).

Une fois la variation souhaitée $[\Delta p_i^*(k), \Delta q_i^*(k)]$ calculée et normalisée, le vecteur de commande optimal à appliquer pendant la période de commutation $[kT_s (k+1) T_s]$, correspond au point de variation $(\bar{\Delta}_{p_i}, \bar{\Delta}_{q_i})$. le plus proche du point de variation souhaité. Ensuite, la fonction de performance à optimiser consiste à rechercher la plus petite distance entre le point $(\bar{\Delta}_{p_i}^*(k), \bar{\Delta}_{q_i}^*(k))$ et les points $(\bar{\Delta}_{p_i}, \bar{\Delta}_{q_i})$. Elle est formulée par l'équation objective suivante :

$$\mathbf{f}(\mathbf{i}) = \min \left(\sqrt{[\bar{\Delta}_{p_i}^*(\mathbf{k}) - \Delta_{p_i}]^2 + [\bar{\Delta}_{q_i}^*(\mathbf{k}) - \Delta_{q_i}]^2} \right) \quad \mathbf{i} = \mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{3} \dots \mathbf{6}$$

I.7.3.1 Synthèse du correcteur Intégral-Proportionnel (IP)

En se basant sur la même démarche effectuée dans le paragraphe précédent et en choisissant cette fois ci un régulateur de type IP, le schéma fonctionnel de la régulation de la tension du bus continu est donné sur la figure I-13.

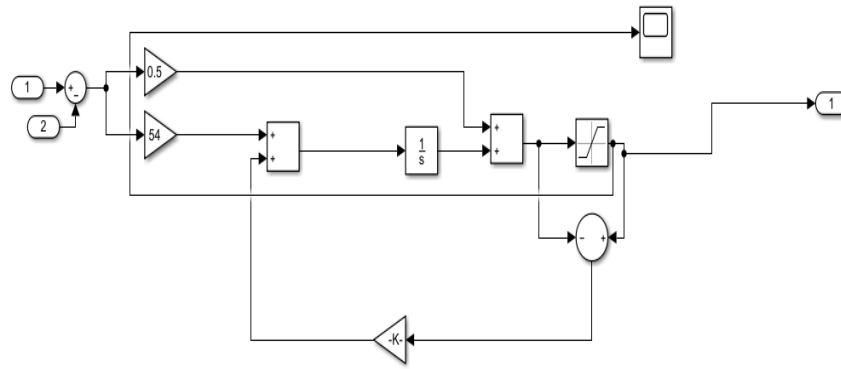


Figure I-13 : schéma de l'IP avec un retour d'anti-emballement.

$$G_{V_{dc}(IP)} = \frac{V_{dc}}{V_{dc_{ref}}} = \frac{k_p \cdot k_i / k}{s^2 + k_p / k \cdot s + k_p \cdot k_i / k} \quad (1.41)$$

On constate, contrairement au régulateur PI, que le régulateur IP présente l'avantage de ne pas générer de zéros supplémentaires dans la fonction de transfert en boucle fermée (un zéro lent pourrait diminuer les performances dynamiques du système). La relation entre V_{dc} et $V_{dc_{ref}}$ est une fonction de transfert de deuxième ordre de la forme suivante :

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc_{ref}}} = \frac{k_p \cdot k_i / k}{s^2 + k_p / k \cdot s + k_p \cdot k_i / k} = \frac{\omega_t^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_t \cdot s + \omega_t^2} \quad (1.42)$$

A partir de cette dernière équation, les coefficients k_i et k_p sont identifiés :

$$\rightarrow \begin{cases} k_i = \frac{\omega_t}{2 \cdot \xi} \\ k_p = 2 \cdot \xi \cdot \omega_t \cdot k \end{cases} \quad (1.43)$$

Par placement de pôle avec $\xi = 0.707$ et $\omega_n = 2\pi \cdot f_c = 24.3\pi$ on déduit $k_p = 0.336$ et $k_i = 53.989$

I.8 Conclusion

Les filtres linéaires sont caractérisés, dans le domaine spatial, par leur réponse impulsion.

Dans ce chapitre, les principales sources de perturbations harmoniques sont les convertisseurs statiques de puissance, afin d'éviter d'éventuels des Fonctionnements ou dégradations des équipements, il est nécessaire de les dimensionner en conséquence. Si le niveau des harmoniques est trop élevé, La mise en place de filtrages harmoniques est toujours envisageable.

Dans tous les cas, le choix des matériels, (lignes, transformateurs, filtres.....) d'une nouvelle installation passe obligatoirement par la connaissance a priori du niveau des harmoniques produites par les convertisseurs, dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, la puissance réactive et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

II. Introduction

Afin de valider l'étude théorique et évaluer les performances de notre système, ce chapitre est entièrement consacré à la simulation numérique du fonctionnement du filtre actif parallèle à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. On commence par la méthode indirecte du courant avec la commande par hystérésis. Puis ; la commande prédictive de puissance.

II.1 Commande indirect du courant

Le schéma global de la commande est décrit par la figure ci-dessous :

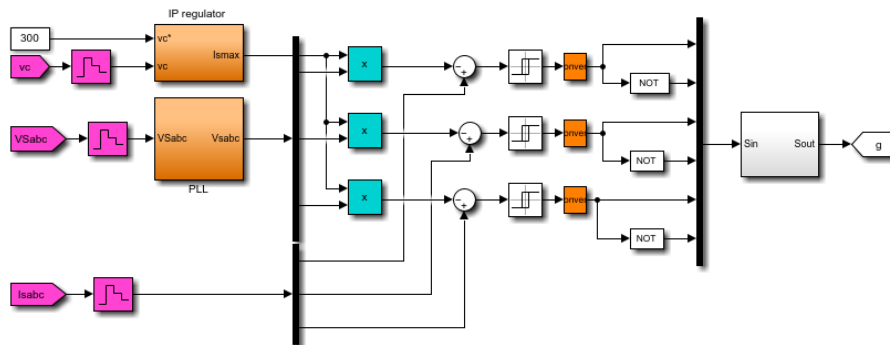
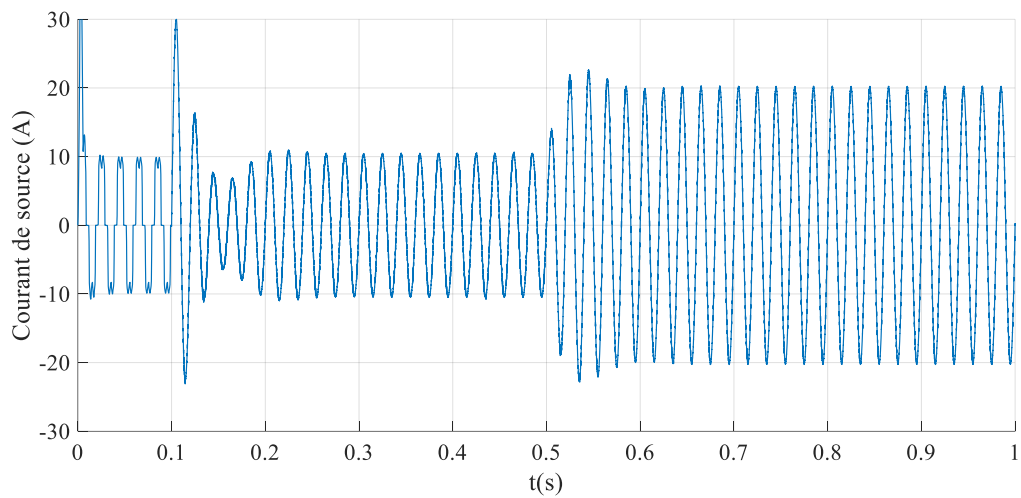


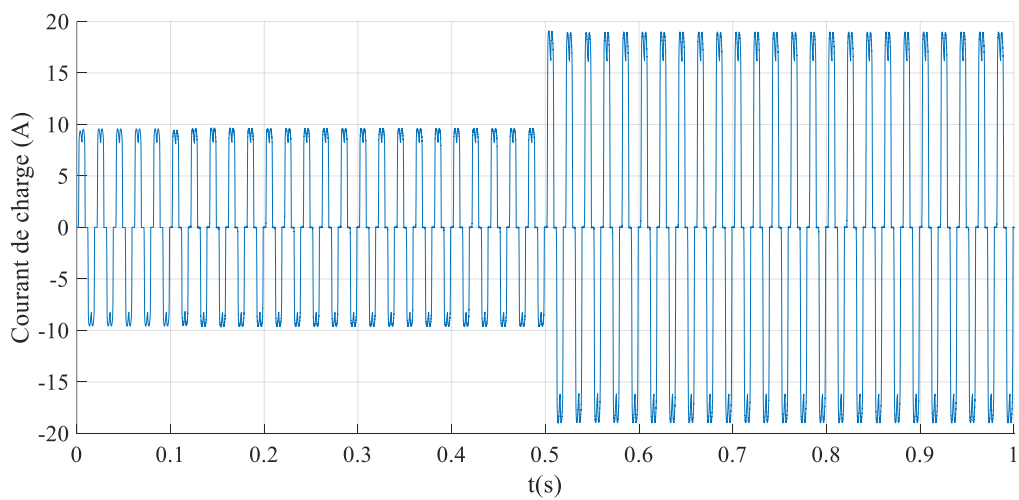
Figure II-1 : Schéma descriptif de la commande indirecte du courant avec la commande à hysteresis.

II.1.1 Fermeture du SAPF et analyse en régime permanent

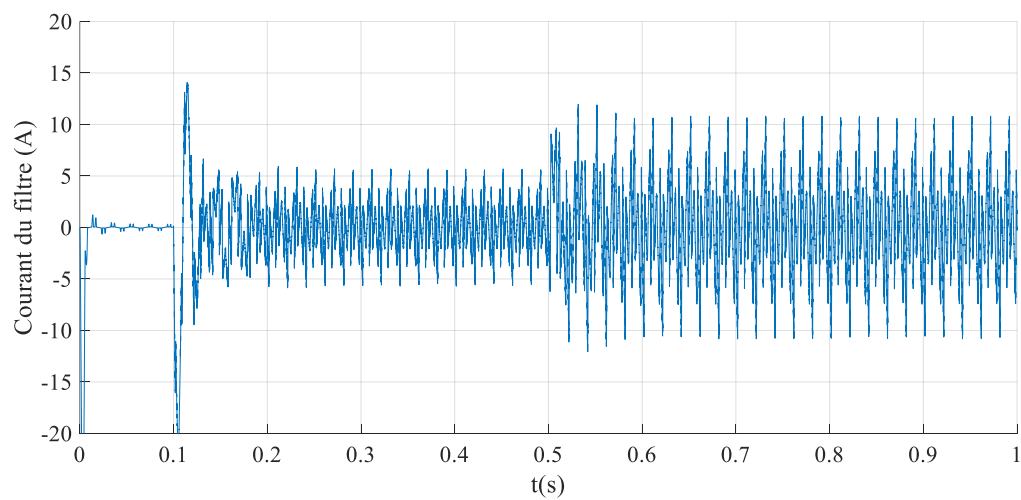
Initialement le système fonctionne sans FAP, les courants de source sont identiques à ceux de la charge non linéaire caractérisés par un spectre contenant que des harmoniques d'ordre impair (non multiples de trois) et un $THDi = 27.28\%$ présenté par la figure II.2, le filtre ne produit aucun courant de compensation et le bus continu est pré-chargé à sa valeur initiale ($V_{dc} = 192.3\text{ V}$). à l'instant 0.1s le filtre est activé ; on voit bien que le courant de source devient sinusoïdale avec un THD de 3.08 (figure II-3 b et figure II-4 b). La tension du bus continu rejoint sa valeur souhaitée 300v comme il est montré sur la figure II-2 c. à l'instant 0.5s une variation de la charge a été effectuée. Sa description sera donnée par la suite.



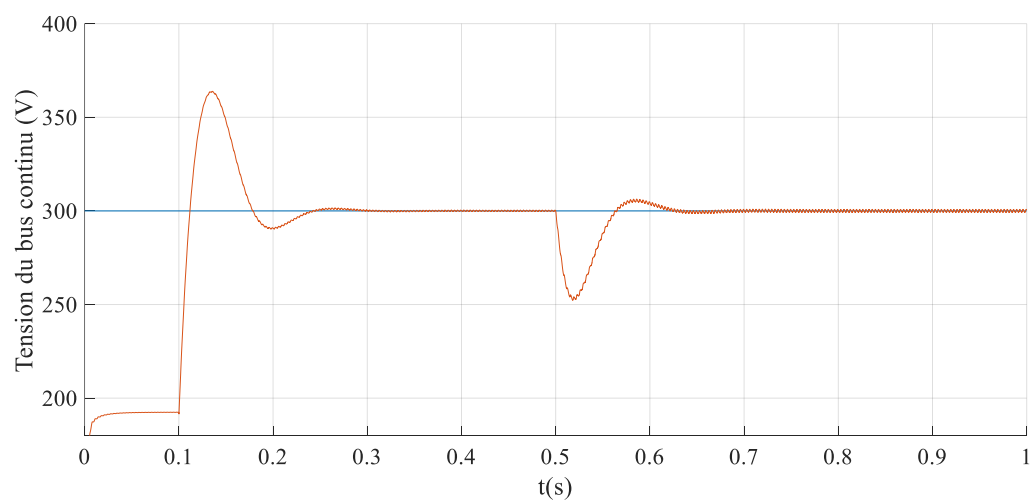
(a) Courant de source



(b) Courant de charge

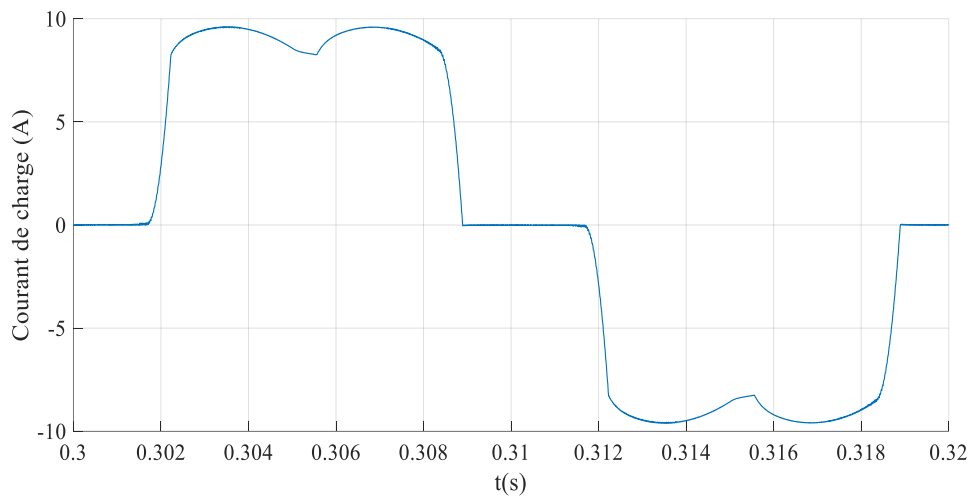


(c) Courant du filtre

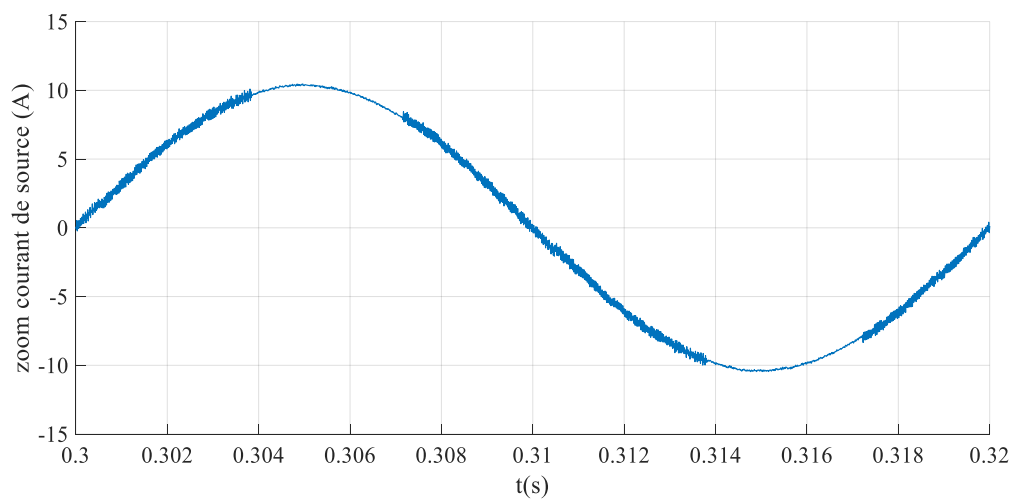


(d) Tension du bus continu

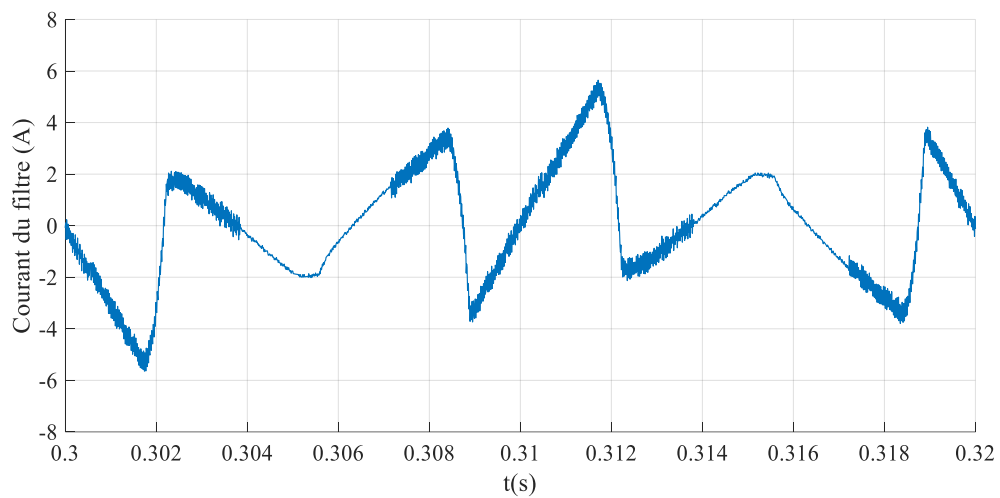
Figure II-2 : Evolution du système avec le contrôle hystérésis par la technique d'identification des courants indirecte.



(a)

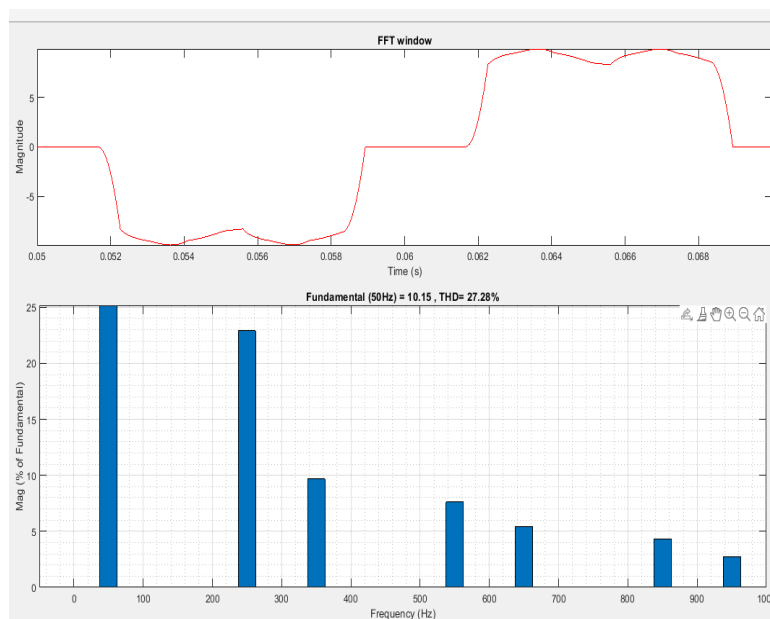


(b)

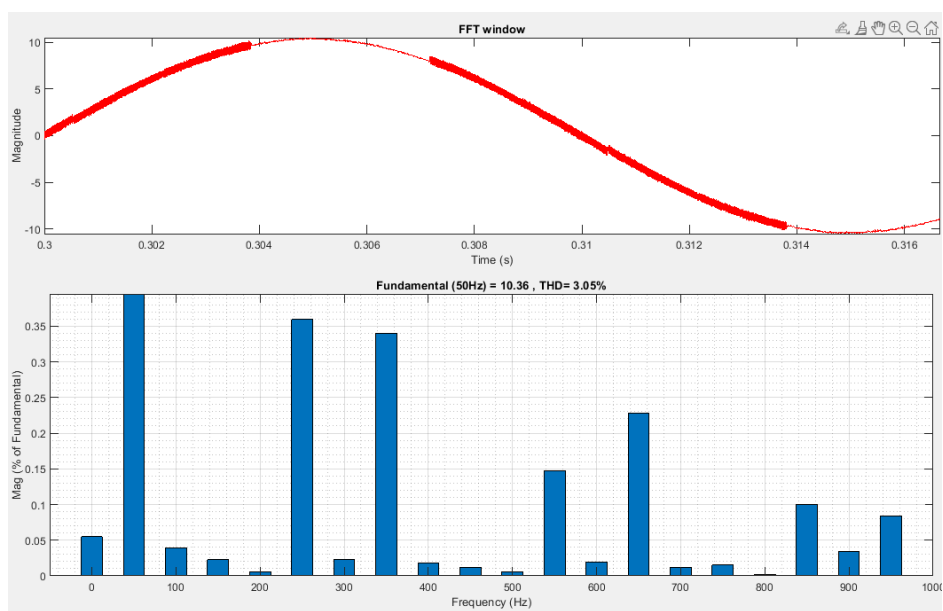


(c)

Figure II-3 : Zoom des courants du système de filtrage.



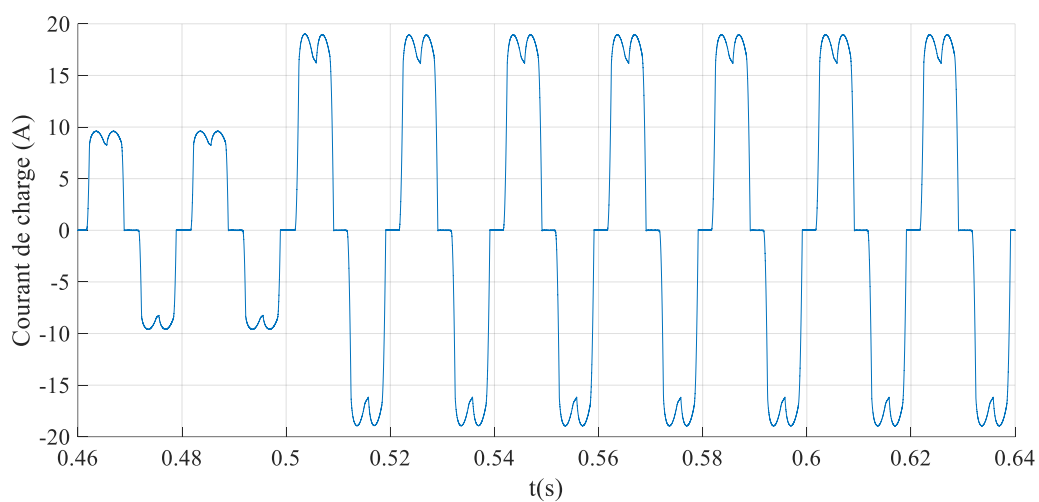
(a)



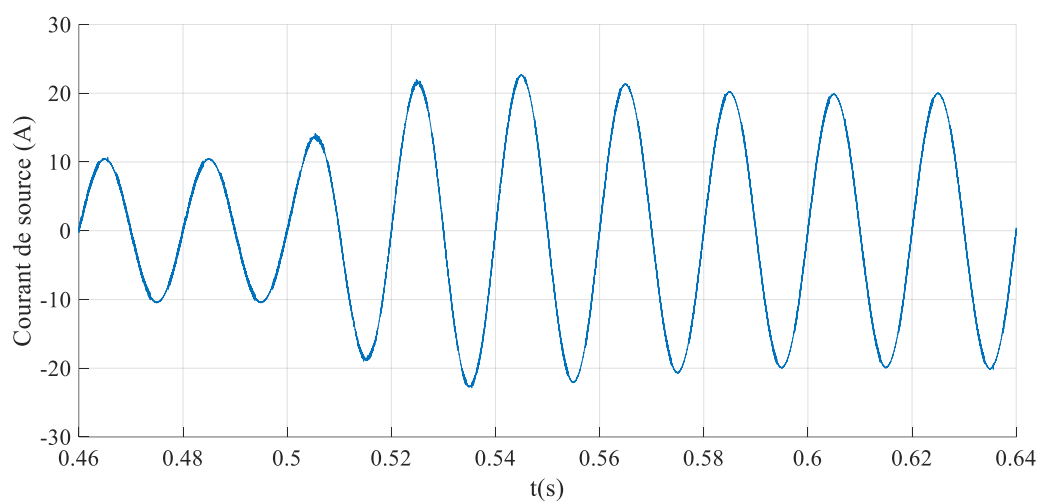
(b)

Figure II-4 : Forme d'onde du courant de source (avant et après le filtrage) et son spectre associé.

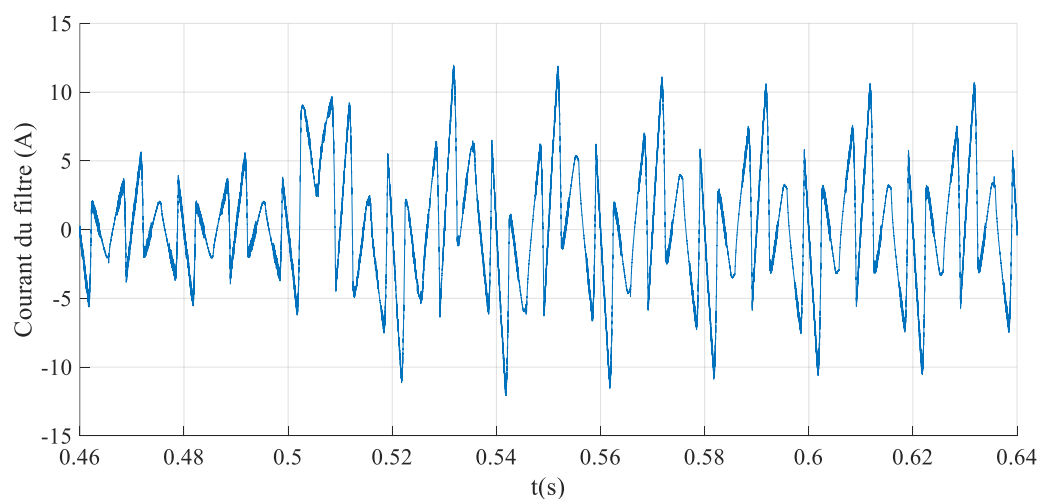
II.1.2 Variation de la charge non linéaire



(a)



(b)



(c)

Figure II-5 : Evolution du système avec le contrôle hystérésis par la technique d'identification des courants indirecte sous la variation de la charge non linéaire.

La figure II-5 montre l'évolution des courants pendant la variation de la charge, ce qui provoque une diminution de la tension vdc (figure II-4 d) à l'instant 0.5s et après l'intervention du correcteur, la tension vdc rejoint sa valeur souhaitée 300v après 0.12s. Le courant de source reste sinusoïdal avec un facteur de puissance unitaire.

II.2 Commande direct de la puissance prédictive

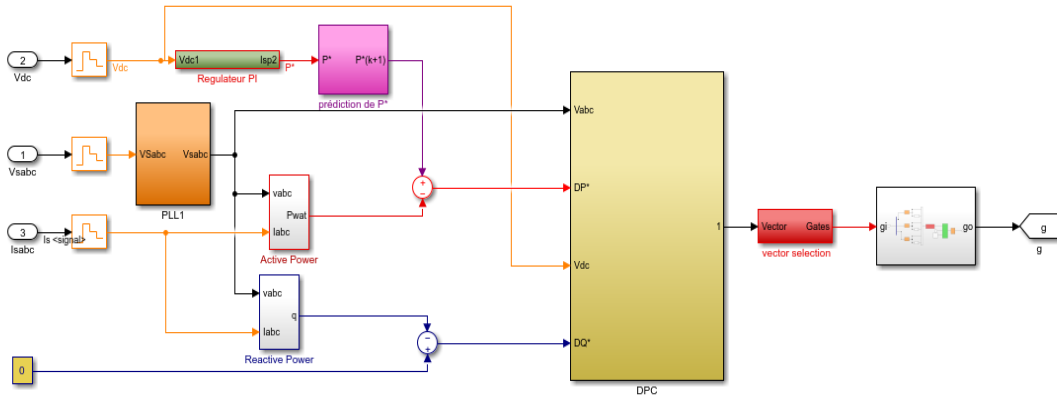
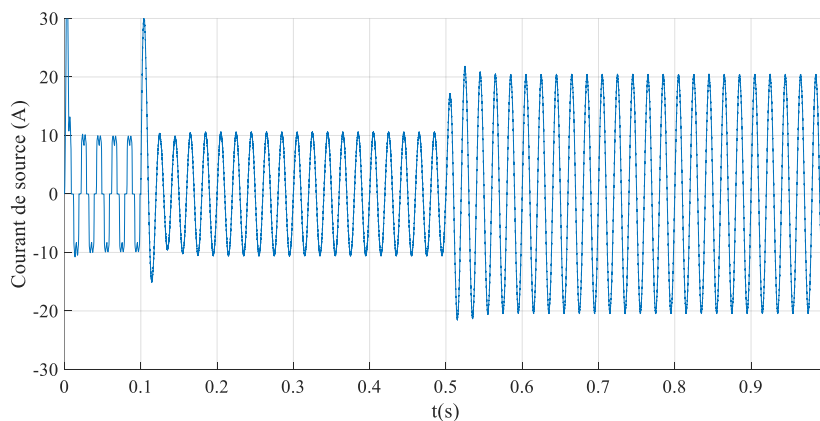


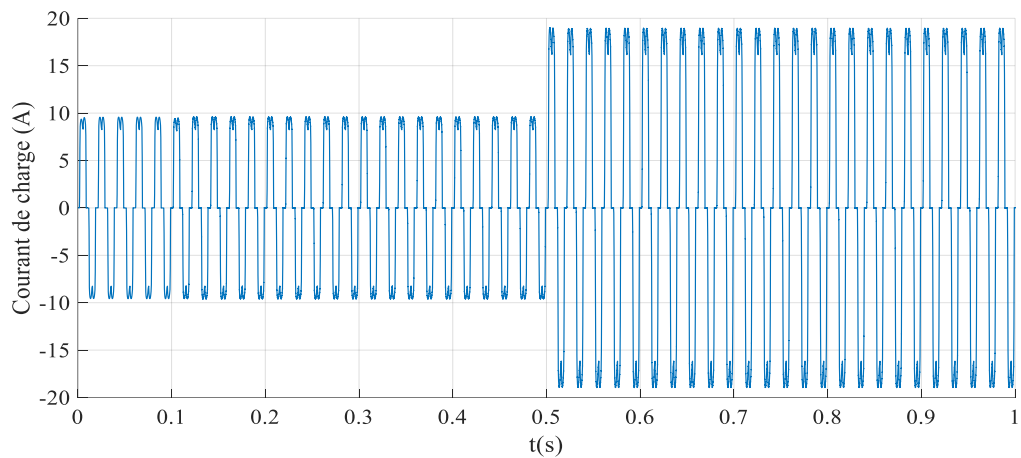
Figure II-6 : Schéma descriptif de la commande directe de puissance prédictive.

II.2.1 Fermeture du filtre et analyse en régime permanent

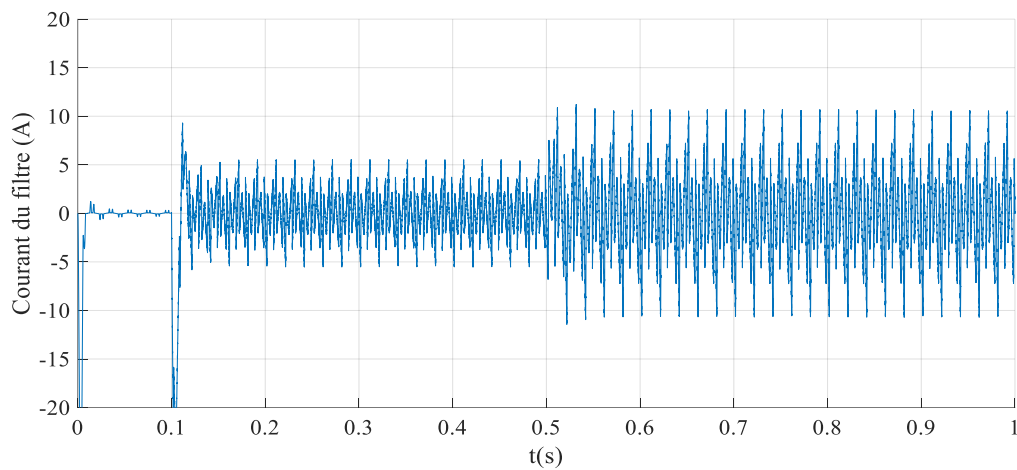
Après la mise en service du FAP à l’instant $t = 0.1s$, nous pouvons constater que les courants de source (FigII.7.a), deviennent sinusoïdal et présente ainsi un taux de distorsion de $THDi = 1.68\%$ et est en phase avec les tensions de source. En ce qui concerne la tension du bus continu, préalablement chargé, elle se stabilise vers sa référence après un transitoire de $t = 0.05s$. Cette technique de commande permet d’obtenir une meilleure qualité d’énergie comparativement à la technique précédente.



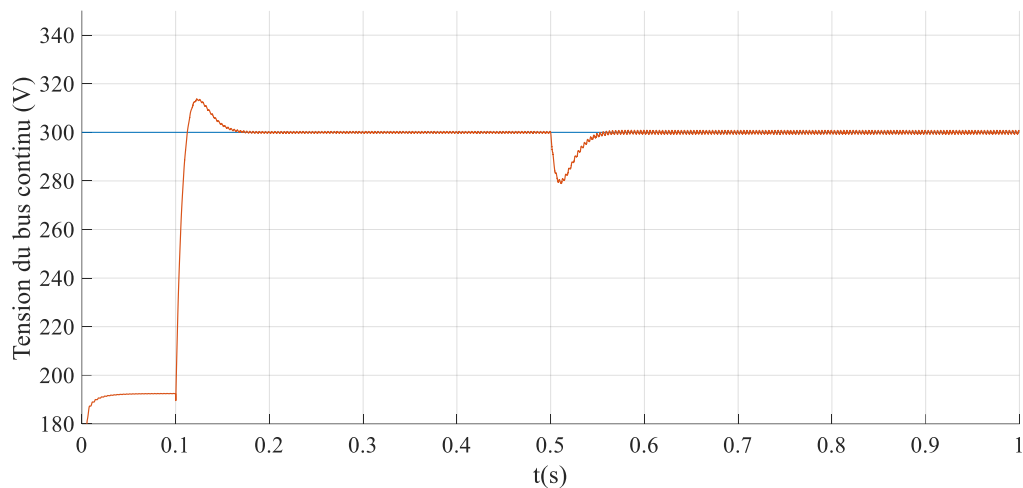
(a)



(b)

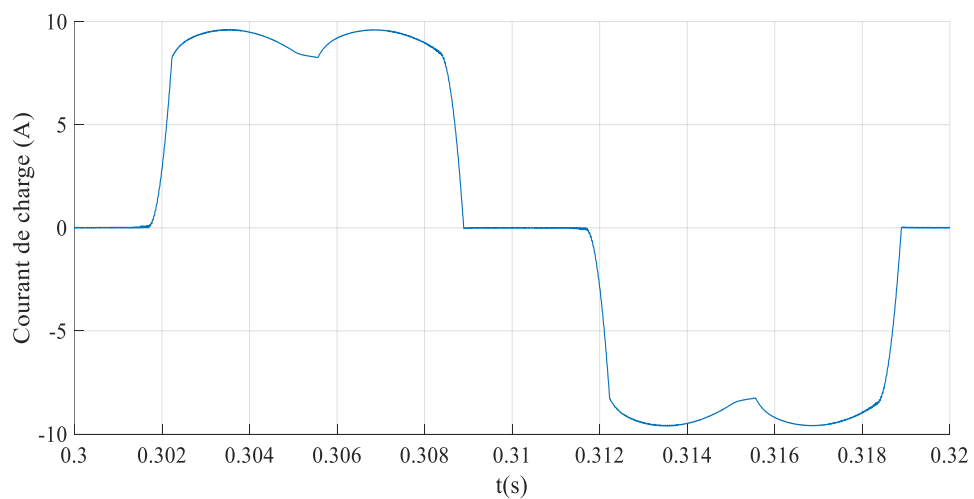


(c)

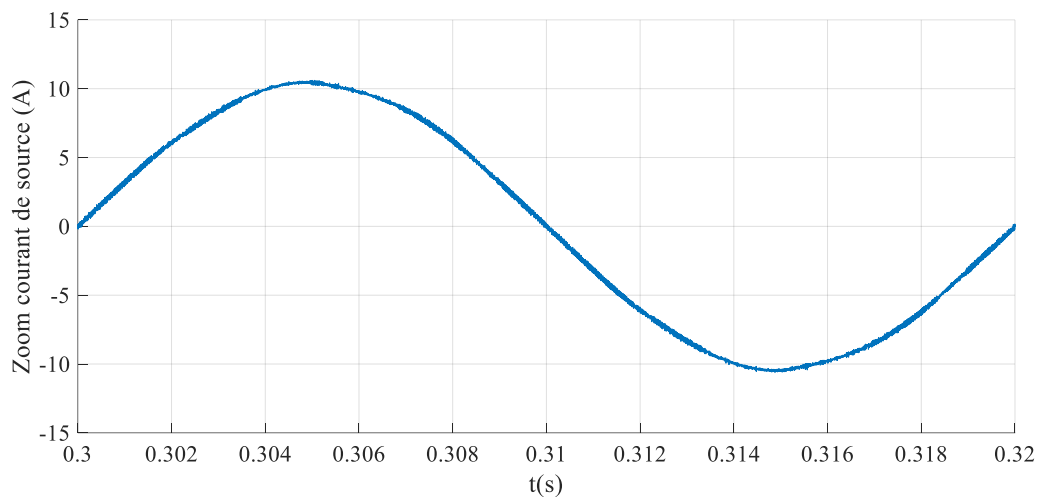


(c)

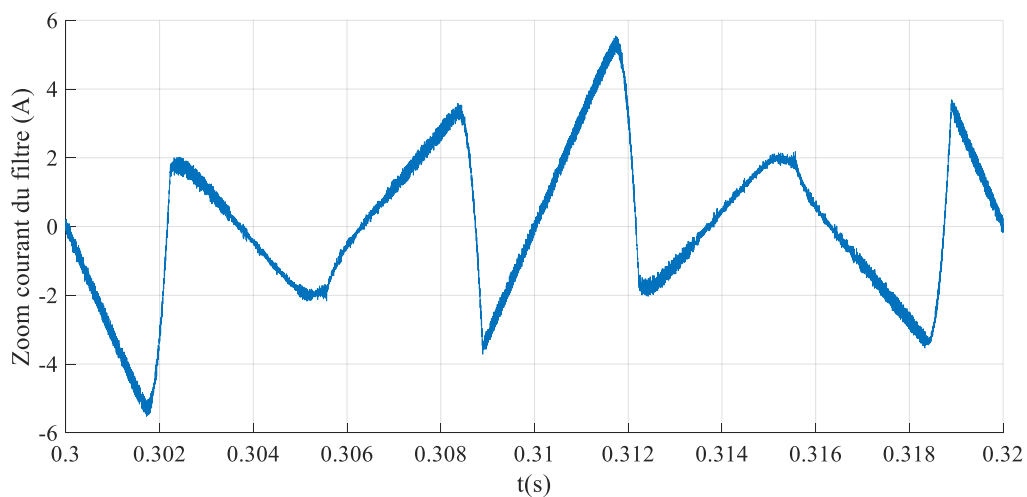
Figure II-7 : Evolution du système avec la commande directe de puissance prédictive.



(a)



(b)



(c)

Figure II-8 : Zoom des courants du système de filtrage.

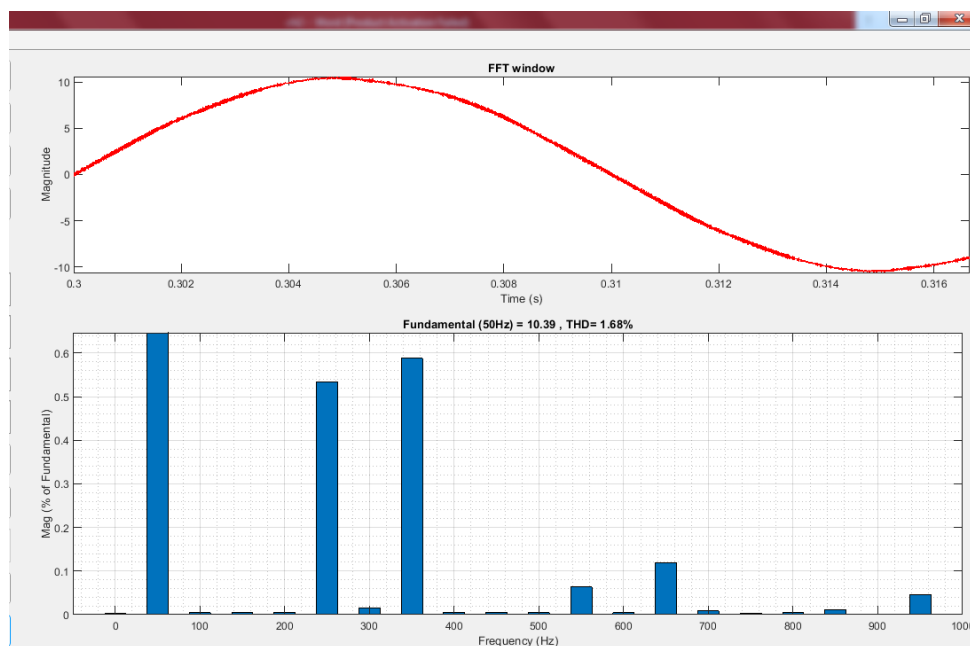
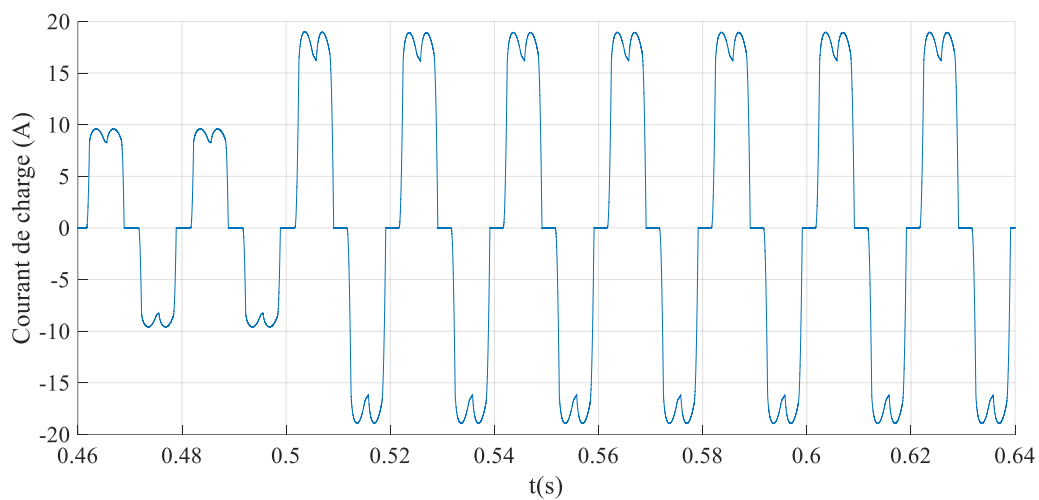


Figure II-9 : Forme d'onde du courant de source et son spectre associé.

II.2.2 Variation de la charge non linéaire



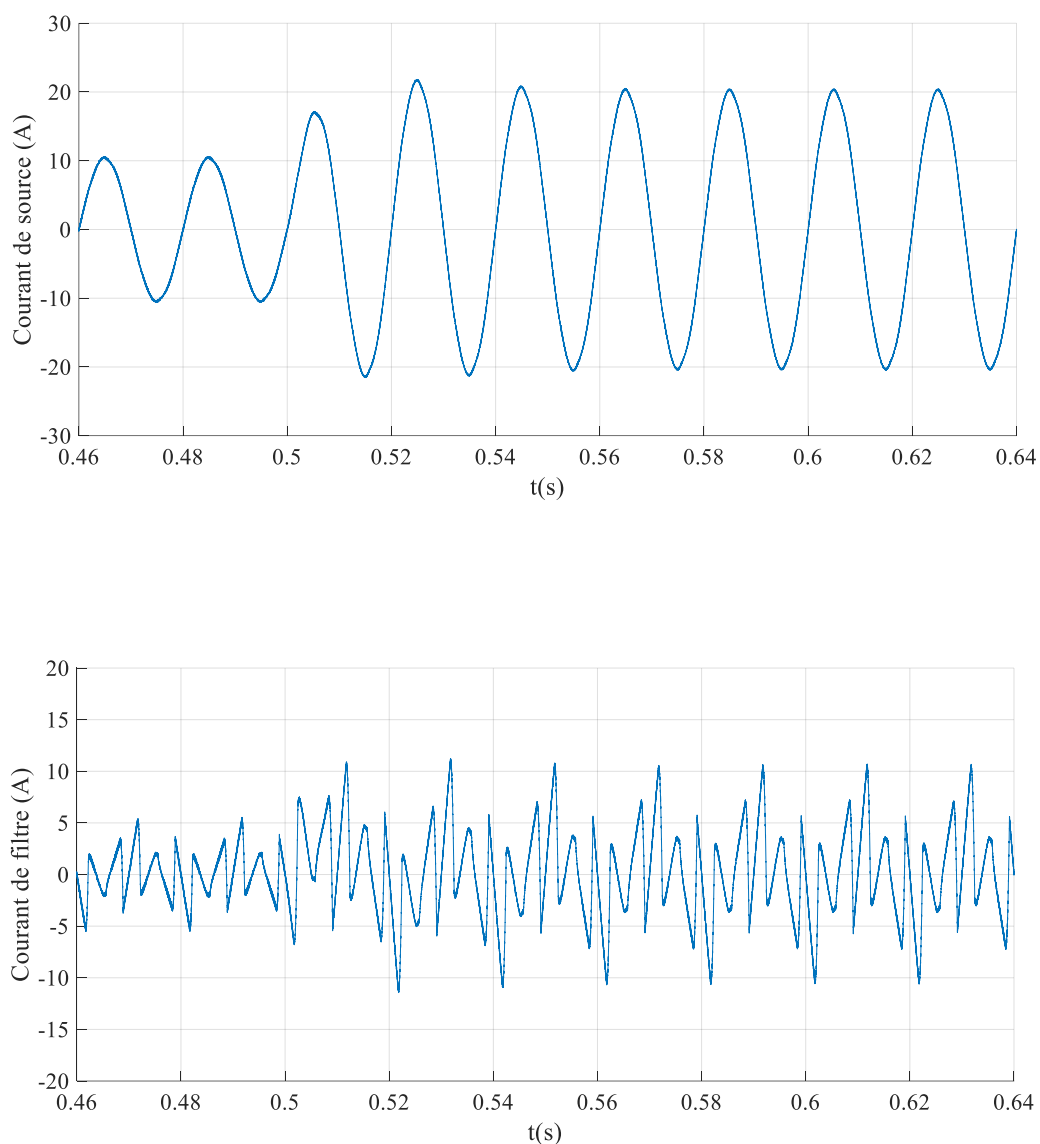


Figure II-10 : Evolution du système avec la commande directe de puissance prédictive sous la variation de la charge non linéaire.

L'évolution dynamique du système, montre l'efficacité de la commande prédictive vis-à-vis la variation de la charge. Nous voyons bien que la qualité d'énergie reste optimale et les courants du système suivent leurs trajectoires désirées.

II.3 Conclusion

Après avoir étudié les différentes techniques de contrôles nous avons présenté dans ce chapitre leurs simulations sous Matlab-Simulink, selon les étapes:

♣ Étape 1: où on montrera l'allure du courant dans la source avant application de toute opération de filtrage et son spectre harmonique contenant les informations sur le THDi :

♣ Étape 2: consacrée à la simulation de la commande indirecte du courant avec régulation PI du bus continu et la commande hystérésis.

♣ Étape 3: consacrée à la simulation de la commande directe de puissance prédictive avec régulation PI du bus continu.

♣ Étape 4: synthétise les résultats obtenus par une étude comparative entre les différentes techniques de contrôles.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons exposé le problème des harmoniques et des perturbations affectant la tension du réseau et dégradant ainsi la qualité de l'énergie électrique. Après avoir recensé les origines et les conséquences néfastes des harmoniques sur les différents éléments constitutifs du réseau et sur les récepteurs raccordés à un réseau pollué, nous avons mis l'accent sur les harmoniques produits par les convertisseurs statiques, insistant sur les harmoniques générés par les redresseurs (pont de diodes). Puis, nous avons présenté les différents moyens, traditionnels et modernes, de réduction des harmoniques.

Nous avons présenté les solutions traditionnelles et modernes de dépollution. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. Ainsi que, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution des charges polluantes.

Nouvellement, 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.

Le filtre actif parallèle (FAP) peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques et la puissance réactive.

Nous avons étudié un filtre actif parallèle triphasé par la méthode indirecte du courant avec la commande par hystérésis. Puis avec la commande prédictive de puissance et nous avons présenté leurs simulations sous Matlab-Simulink.

Bibliographie

[1] M. Shafiee Khor : "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.

[2] 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.

[3] S. Nia Ahmed : "Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Lorraine, 1996.

[4] A. Lopez De Heredia Bermeo : "Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la puissance basse tension à la montée en tension", Thèse de docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Grenoble, 1996.

[5] G. Olivier : "Electrotechnique", Presse Internationale Polytechnique, 2ème édition, 1999.

[6] E. BETTEGA, J. N. FIORINA, «Harmoniques: convertisseurs propres et compensateurs actifs», CT n° 183, Jan 2000.

[7] M. Magraoui, "Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle," Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Université du Québec, 2007.

[8] OMEIRI AMAR, "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant" Thèse de doctorat, Faculté des sciences de l'ingénieur Département d'électrotechnique, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.

[9] : Z. Laid, B.-S. Salem, « Etude et réalisation d'un onduleur monophasé utilisant la technique PWM à base " MOSFET" », Mémoire d'ingénieur de l'Université de Biskra, 2004.

[10] Z. A. Memon, M. A. Uquaili, and M. A. L. I. Unar, "Harmonics Mitigation of 130 Références Industrial Power System Using Passive Filters," vol. 31, no. 2, pp. 355–360, 2012.

[11] J. C. Das, "Passive Filters-Potentialities and Limitations," Pulp Pap. Ind. Tech. Conf. 2003. Conf. Rec. 2003 Annu. Charleston, SC, USA, pp. 187–197, 2003.

[12] Abdelmadjid CHAOUI "filtrage actif triphase pour charges non lineaires", l'université de setif, école doctorale des sciences pour l'ingénieur spécialité : génie électrique.

[13] KEBIRI SAMIA << modélisation et simulation d un filtre actif multi niveaux >> thèse magistrale, université mouloud Mammeri, tizi_ ouzou, 2009.

[14] Boucif Abdelmalek «Filtrage actif d'un réseau Électrique», Mémoire de Fin d'Etudes Université Mohamed Khider Biskra, 2013 / 2014.

[15] « Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique », mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.

[16] Mohamed Alaa Eddin Alali. « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension (Automatisation des systèmes de puissance électrique) », Thèse de Doctorat de l'université Louis Pasteur-Strasbourg, 2002.

[17] H. Akagi, "New trends in active filters for power conditioning," Ind. Appl. IEEE Trans., vol. 32, no. 6, pp. 1312–1322, 1996.

[18] L. S. Czarnecki, "An overview of methods of harmonic suppression in distribution systems," Power Eng. Soc. Summer Meet. 2000. IEEE, vol. 2, no. c, pp. 800–805 vol. 2, 2000.

[19] P. Jintakosonwit, H. Fujita, and H. Akagi, "Control and performance of a fully-digitalcontrolled shunt active filter for installation on a power distribution system," IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, no. 1, pp. 132–140, 2002.

[20] S. BEN ALI et S. BOUHANAK «Etude et Simulation d'un Filtre Active Parallèle à Quatre Fils». Mémoire de magister, Université echahid hama lakhder d'el-oued , 2015.

[21] Y. PAL et A. SWARUP. « A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement », Conférence on Power System Technology and IEEE Power India Conférence (POWERCON), p. 1-8, 2008.

[22] BOUAFIA ABDELOUAHAB « techniques de commande predictive et floue pour les systemes d'electronique de puissance: application aux redresseurs a mli». these de doctorat en sciences, universite ferhat abbas - setif ufas (algerie), 2010.

