



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de la Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Électrique
Spécialité : Machines Electriques

Thème

**Commande Directe de
Puissance Prédictive d'un
Filtre Actif Parallèle Triphasé**

Réalisé par :

Assila Mohammed Salah

Encadré par :

Dr. MESBAHI Nadhir

Soutenu en Juin 2019

Résumé

L'utilisation des équipements à charges non linéaire, absorbent des courants harmoniques et consomment la puissance réactive. Ces équipements contribuent considérablement à la détérioration de la qualité de l'énergie électrique. Alors, pour surmonter à cette situation, les filtres actifs parallèles sont à ce jour, les solutions les plus adéquates pour la dépollution tant au niveau de la production que de la distribution. Le travail de recherche présenté dans ce document est consacré à la commande directe de puissance prédictive pour le filtre actif parallèle pour l'amélioration de la qualité de l'énergie d'un réseau électrique basse tension. La validation des études menées à été réalisée par des simulations numériques à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. A cet effet, de très bonnes performances ont été observées pour la commande proposée.

Mots clés : Pollution harmonique, qualité de l'énergie, filtre actif parallèle, commande directe de puissance prédictive.



REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé 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. MESBAHI Nadhir pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

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

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département d'Electrotechnique qui a contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Liste des Tableaux

Tableau II.1	Tensions de sortie de l'onduleur	19
Tableau III.1	Paramètres de simulation d'un filtre actif parallèle	31

Liste des Figures

Fig. I.1	Forme du courant absorbé par quelques charges non-linéaires	9
Fig. I.2	Filtre actif parallèle	13
Fig. I.3	Filtre actif série	14
Fig. I.4	Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	14
Fig. II.1	Circuit de puissance du filtre actif parallèle	17
Fig. II.2	Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur	20
Fig. II.3	Philosophie de la commande prédictive	23
Fig. II.4	Stratégie de commande prédictive	23
Fig. III.1	Configuration de la commande directe de puissance prédictive	27
Fig. III.2	Résultats de simulation en régime permanent	32
Fig. III.3	Analyse spectrale de courant de source après la mise en service du filtre actif parallèle	33
Fig. III.4	Allures des puissances instantanées en régime permanent	33

Fig. III.6	Résultats de simulation en régime dynamique	34
Fig. III.7.	Allures des puissances instantanées en régime dynamique	35
Fig. III.8.	Courant et tension en phase (côté source en régime dynamique)	35
Fig. III.9.	Résultats de simulation lors de la variation de la charge non linéaire	36

Liste des Symboles et Notations

Liste des Symboles

h	Rang de l'harmonique
p	Puissance active
q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
D	Puissance déformante
R	Résistance
I	Courant
e_{sa}, e_{sb}, e_{sc}	Tensions instantanées simples du réseau
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Tensions instantanées au point de couplage
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants débités par le réseau
R_f	Résistance du filtre de sortie
L_f	Inductance du filtre de sortie
V_{dc}	Tension continue du bus continu
S_{ki}	Fonction de commutation
i_{α}, i_{β}	Courant de charge selon les axes (α, β)
$i_{ref\alpha}, i_{ref\beta}$	Courants de référence
$\tilde{p}, \tilde{q}$	Composantes alternatives de p et q

Liste des Notations

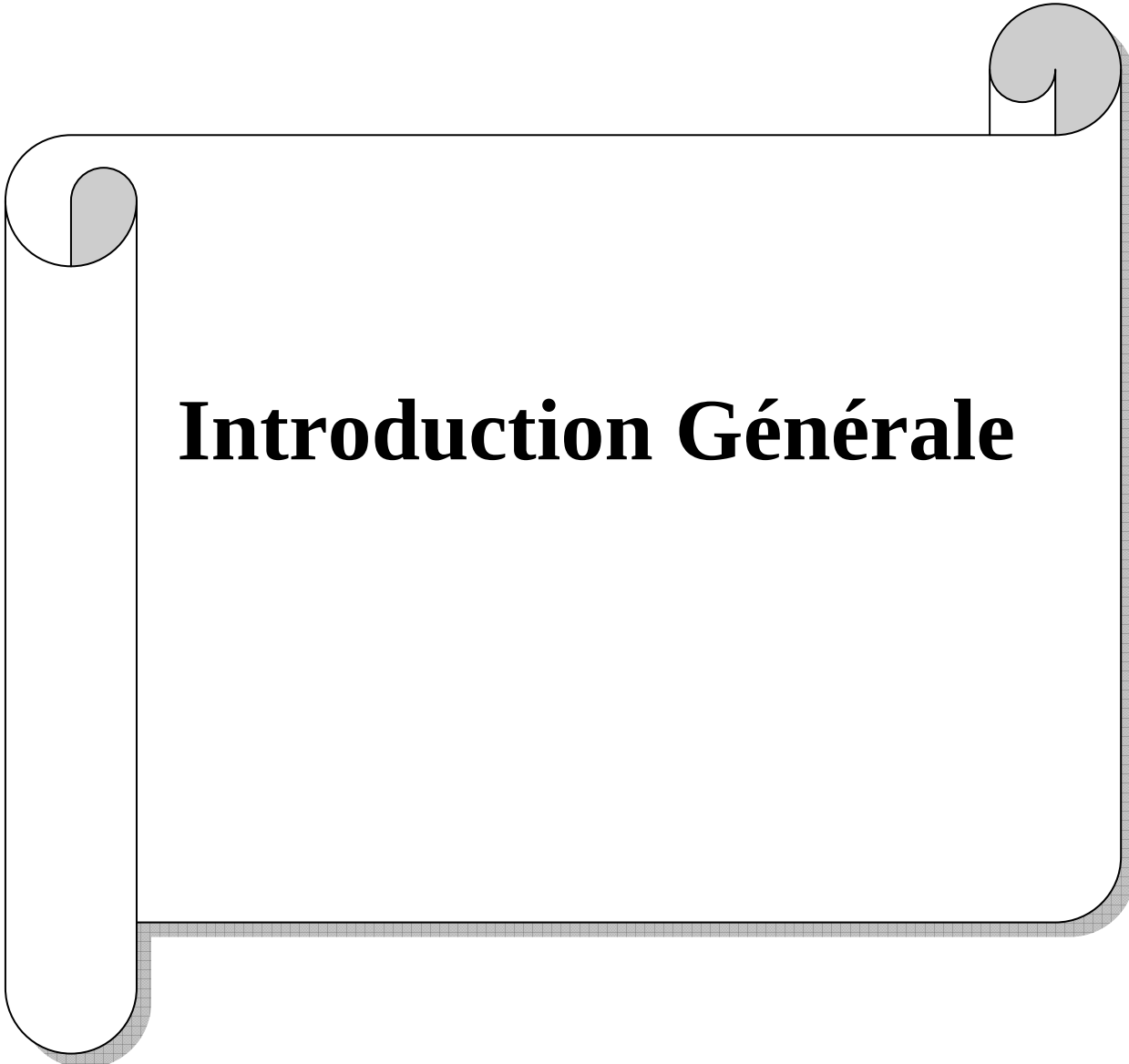
THD	Total Harmonic Distortion
CEI	La Commission Electrotechnique Internationale
EDF	Electricité De France
FP	Facteur de Puissance
FPB	Filtre Passe-Bas
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
UPFC	Unified Power Quality Conditioner

IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor

Sommaire

Introduction Générale	2
Chapitre I Les Perturbations Electriques	4
I.1 Introduction	5
I.2 Qualité de l'énergie électrique	5
I.2.1 Qualité de la tension	5
I.2.1.1 Amplitude	5
I.2.1.2 Fréquence	6
I.2.1.3 Forme d'onde	6
I.2.1.4 Symétrie	6
I.2.2 Qualité du courant	6
I.3 Classification des perturbations électriques	7
I.4 Définition de la pollution harmonique	8
I.4.1 Origines des harmoniques	8
I.4.2 Facteur de puissance	10
I.4.3 Taux de distorsion harmonique THD	10
I.4.4 Principales sources polluantes	10
I.4.5 Conséquences de la pollution harmonique	10
I.4.6 Causes de la production des harmoniques	11
I.4.7 Effets indésirables de la pollution harmonique	11
I.5 Solutions traditionnelles de dépollution	11
I.5.1 Avantages et inconvénients des filtres passifs	12
I.6 Solutions modernes de dépollution	13
I.6.1 Filtre actif parallèle	13
I.6.2 Filtre actif série	14
I.6.3 Combinaison parallèle-série actifs	14
I.6.4 Avantages et inconvénients des filtres actifs	15
I.7 Conclusion	15

Chapitre II Filtre Actif Parallèle : Modélisation et Principe de Commande	16
II.1 Introduction	17
II.2 Principe du filtrage actif parallèle	17
II.3 Description d'un onduleur de tension	18
II.4 Modélisation du filtre actif parallèle	20
II.5 Commande prédictive	22
II.5.1 Définition	22
II.5.1 Principes	22
II.6 Eléments d'une commande prédictive	23
II.7 Intérêts de la commande prédictive	24
II.8 Conclusion	25
Chapitre III Commande et Résultats de Simulation	26
III.1 Introduction	27
III.2 Commande directe de puissance prédictive	27
III.2.1 Calcul des puissances instantanées	28
III.2.2. Modèle prédictif du filtre actif parallèle	28
III.2.3. Prédiction des références des puissances instantanées	29
III.2.4 Principe de sélection du vecteur de commande optimal	30
III.3 Résultats de simulation	30
III.3.1 Régime permanent	31
III.3.2 Régime dynamique	34
III.3.3 Variation de la charge non linéaire	35
III.4 Conclusion	37
Conclusion Générale	39



Introduction Générale

Introduction Générale

Une des branches de l'électronique en pleine expansion est l'électronique de puissance qui contrôle la qualité de l'énergie électrique ainsi que sa conversion en d'autres formes d'énergie afin de fournir des tensions et des courants aux différents types de charges selon les applications. En effet, les charges non linéaires perturbent le réseau qui les alimente en y injectant des courants harmoniques, ce qui est très mauvais pour le réseau électrique, car une dégradation de la qualité de l'énergie électrique sera une conséquence directe de l'utilisation d'équipements à convertisseurs statiques.

Devant cet état de fait, et afin de limiter le taux de perturbation harmonique provoquée par les systèmes d'électronique de puissance connectés au réseau, il est apparu nécessaire de développer des dispositifs curatifs tel que le filtrage actif [1].

L'objectif de ce mémoire est de développer une méthode de commande performante afin de construire une fonction de filtrage actif de grande efficacité. Cette commande est basée sur la commande directe de puissances prédictive.

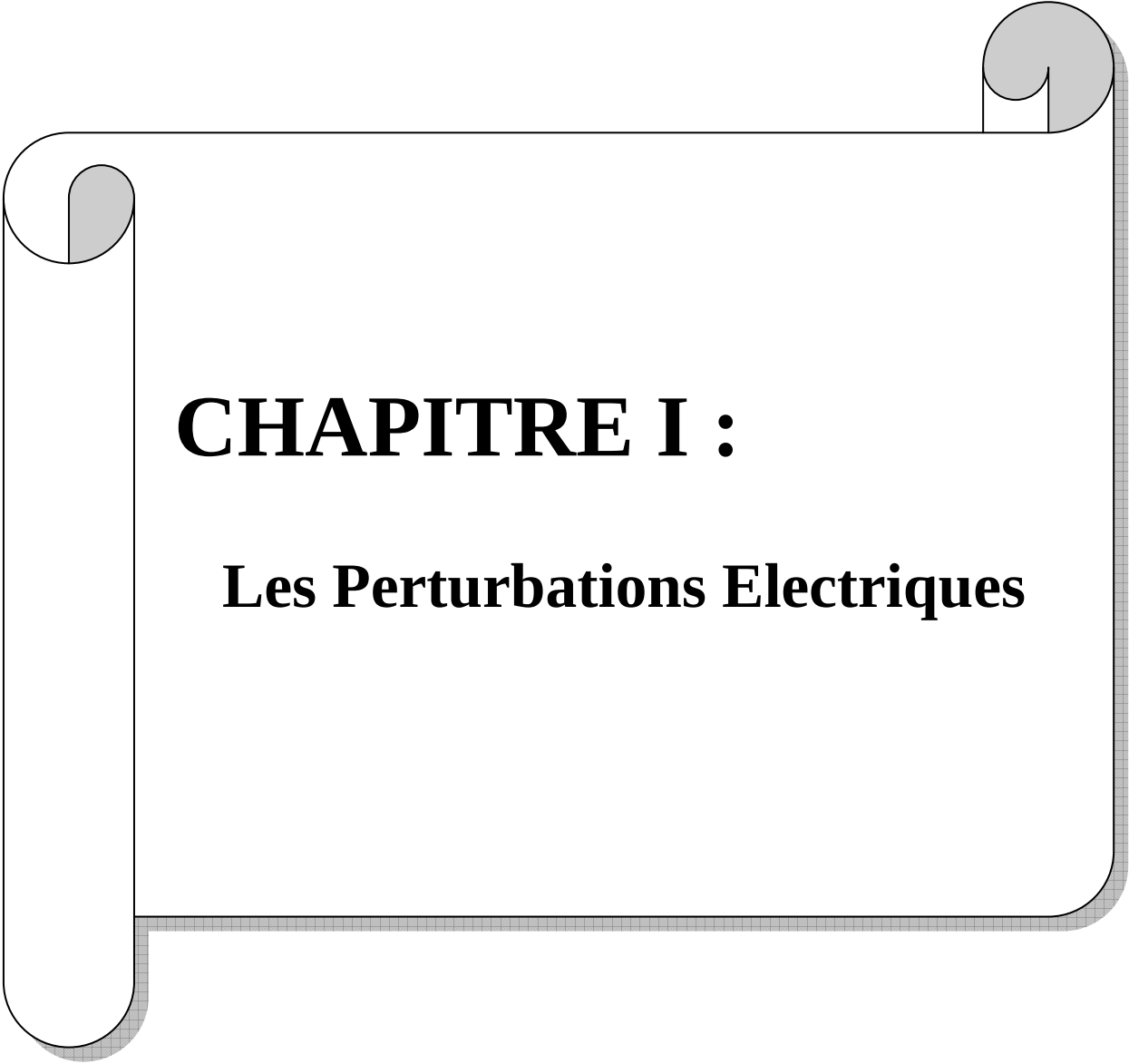
Ce rapport de mémoire est composé de trois chapitres distincts.

Le premier chapitre débute avec la problématique des harmoniques. Ensuite, les différentes solutions à base d'électronique de puissance pour compenser les harmoniques sont présentées. Nous détaillerons en particulier la structure de filtre actif parallèle.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement et la modélisation du filtre actif parallèle. Ensuite, nous étudions les techniques d'identifications des courants harmoniques, en particulier, la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

Dans le troisième chapitre, nous montrons, par simulation numérique l'efficacité de la commande prédictive en puissance appliquée au filtre actif parallèle.

Nous terminons par une conclusion sur l'ensemble de cette étude et nous proposons des perspectives à ce travail.



CHAPITRE I :

Les Perturbations Electriques

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 des services 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.

I.2 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe [2,3].

I.2.1 Qualité de la tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

I.2.1.1 Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations : Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.

- Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

I.2.1.2 Fréquence

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge [4]. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$ pendant 99,5% de l'année, et $-6\% \div 4\%$ durant 16 100% du temps. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes.

I.2.1.3 Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

I.2.1.4 Symétrie

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.

I.2.2 Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de $2\pi/3$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale. Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la

qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension.

I.3 Classification des perturbations électriques

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension et énumérés au paragraphe précédent, on distingue quatre familles de perturbations électriques [5] :

- les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions, flicker),
- les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale,
- les modifications de la forme d'onde (harmoniques, interharmoniques, bruits),
- la dissymétrie du système triphasé : déséquilibre

Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en se basant sur leur durée:

- les perturbations transitoires,
- les perturbations de courte durée,
- les perturbations permanentes. Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi-période fondamentale.

Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre. Les perturbations de courte durée sont les creux de tension, les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement provoquées par la présence de courts-circuits. Elles se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension, et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses sur les équipements électriques. Dans la catégorie « perturbations permanentes » on retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et sont à l'origine d'échauffement, de pertes supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle-commande.

On peut également remarquer que les origines des perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories :

- les défauts au sein des réseaux électriques,
- la présence de charges non-linéaires ou fluctuantes.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent eux aussi être divisés en deux grandes familles :

- les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, ...),
- les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements).

I.4 Définition de la pollution harmonique

C'est l'altération de la forme d'onde sinusoïdale du courant et/ou de la tension engendrée par certaines charges électriques dites charges non- linéaires. Ce genre de signal, à supposer que la périodicité du signal ne soit pas atteinte, peut être décomposée en une somme de sinusoïde de fréquence (n.f) tel que $n \in \mathbb{N}$ et (f) la fréquence du signal.

Pour $n = 1$ La sinusoïde est dite fondamentale

Pour $n > 1$ Les sinusoïdes sont dites harmoniques d'ordre supérieur

Le signal peut éventuellement contenir une composante continue qui présente la valeur moyenne du signal. Cette décomposition est connue sous le nom de la décomposition en série de Fourier.

Dans le cas où la tension et le courant seraient non-sinusoïdaux, ils peuvent être mis sous la forme donnée respectivement par (I.1) et (I.2) :

$$V(t) = \sum_n \sqrt{V_n} \sin(n \cdot \omega \cdot t - \alpha_n) + V_0 \quad \text{I-1}$$

$$i(t) = \sum_m \sqrt{I_m} \sin(m \cdot \omega \cdot t - \beta_m) + I_0 \quad \text{I.2}$$

I.4.1 Origines des harmoniques

Depuis plusieurs années, les convertisseurs statiques (redresseurs, gradateurs...) prolifèrent tant dans les équipements industriels que domestiques. Par exemple, ces dispositifs sont

fréquemment employés dans la régulation de vitesse de moteurs à courant continu et alternatif, ainsi que dans les alimentations des ordinateurs (figure I.1).

Ils sont également utilisés dans les variateurs de lumière, les régulations de systèmes de chauffage électrique et les variateurs de vitesse des moteurs universels

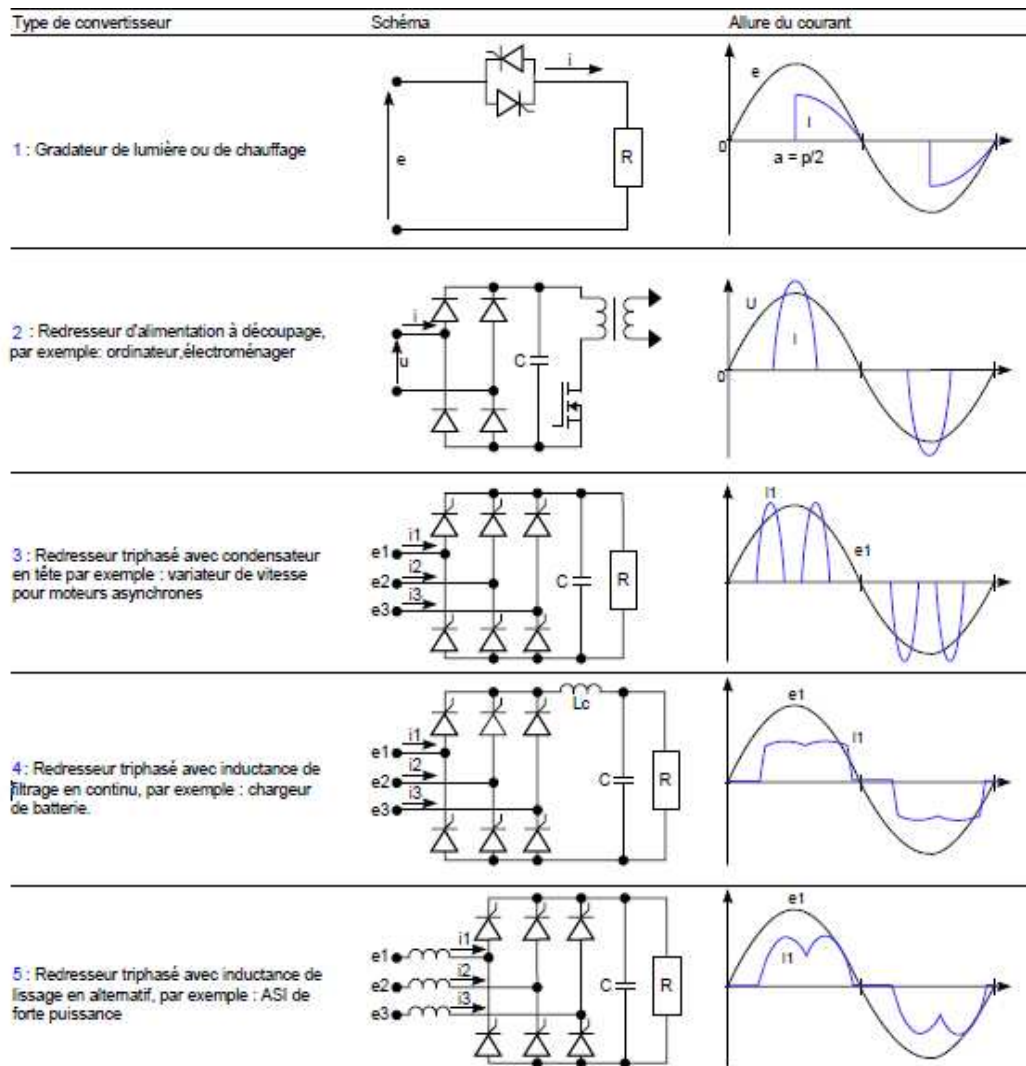


Fig. I.1 : Forme du courant absorbé par quelques charges non-linéaires.

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

I.4.2 Facteur de puissance

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

I.4.3 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 :

$$T_{aux(h)} = 100 \frac{y_{h, rms}}{y_{1, rms}} (\%) \quad \text{I-3}$$

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

C'est le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental seul (norme IEC 61000-2-2) :

$$THD = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_{h, rms}^2}}{y_{1, rms}} (\%) \quad \text{I-4}$$

I.4.4 Principales sources polluantes

Les ponts de diodes sont les plus présents sur les applications de puissance car ils sont sans commande et ont une durée de vie importante et un coût d'achat beaucoup plus faible que des solutions plus évoluées. Il existe aussi d'autre type de charge comme par exemple les fours à arc ayant un contenu spectral très imprévisible.

A plus petite échelle, on trouve toutes les grandes industries tertiaires : les hôpitaux qui consomment des courants harmoniques par le biais des éclairages, des alimentations à découpage d'ordinateurs

I.4.5 Conséquences de la pollution harmonique

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement et l'interférence avec

les réseaux. En présence des harmoniques, la tension ou/et le courant peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période, par conséquent, l'équipement sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.

I.4.6 Causes de la production des harmoniques

La production harmonique est due à l'utilisation d'un grand nombre de charges non linéaires. Les charges non linéaires sont les charges qui n'absorbent pas de courant sinusoïdal même lorsqu'elles sont alimentées par une tension sinusoïdale. La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux dans le réseau. Différentes sources génératrices des courants harmoniques peuvent être citées :

- Charges commerciales : Alimentations monophasées, éclairage fluorescent, variateurs de vitesse pour HVAC, ascenseurs, etc... ;
- Charges industrielles : Variateurs des courants continus et alternatifs ;
- Charges domestiques : Systèmes informatiques et autres charges électroniques.

I.4.7 Effets indésirables de la pollution harmonique

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques, tel que :

- La surchauffe des transformateurs, moteurs, etc.... ;
- L'augmentation des pertes dans le réseau électrique ;
- Le faux déclenchement des relais de protection ;
- Les vibrations dans les machines tournantes ;
- La dégradation de la qualité de la tension.

I.5 Solutions traditionnelles de dépollution

Les moyens de dépollution traditionnels sont nombreux et se résument dans points suivants [6,7] :

- inductance anti-harmonique de protection des condensateurs ;
- inductance de lissage des courants ;
- confinement des harmoniques ;

- l'utilisation de transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la circulation des courants harmoniques
- augmentation de l'indice de modulation ;
- filtres passifs utilisant des éléments réactifs en l'occurrence des inductances et des condensateurs.

I.5.1 Avantages et inconvénients 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. Il présente cependant les inconvénients suivants:

- 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. Ce problème peut être résolu en adoptant un filtre à large bande qui atténue plusieurs rangs harmoniques; ce avec un facteur d'atténuation moindre.
- 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.
- Finalement, 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. L'amortissement utilisant la commande et l'électronique de puissance se présente comme solution pour améliorer efficacement le mode opératoire du réseau.

I.6 Solutions modernes de dépollution

Les filtres actifs de puissance ont été étudiés pour compenser les harmoniques dans les systèmes de puissance industriels depuis le principe de compensation de base proposé en 1971 par *Sasaki* et *Machida*. Cependant, au début de l'année 1970, le domaine de filtres actifs de puissance ne connaissait presque pas de progrès au-delà du stade de test de laboratoire, parce que la technologie de ces circuits était très pauvre pour l'implantation pratique du principe de compensation. Dans les années 80, un remarquable progrès des dispositifs de commutation rapide comme les transistors de puissance et les thyristors à induction statique a aiguillonné le centre d'intérêt dans l'étude des filtres actifs pour la compensation des harmoniques.

Les filtres actifs sont des convertisseurs de puissance, agissant comme source de courants ou de tensions harmoniques, qui injectent en série ou en parallèle sur les réseaux des courants ou des tensions harmoniques en opposition par rapport aux perturbations existantes.

I.6.1 Filtre actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure I.2 est le plus souvent commandé comme un générateur de courant [7]. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du *filtre actif parallèle (F.A.P)* consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

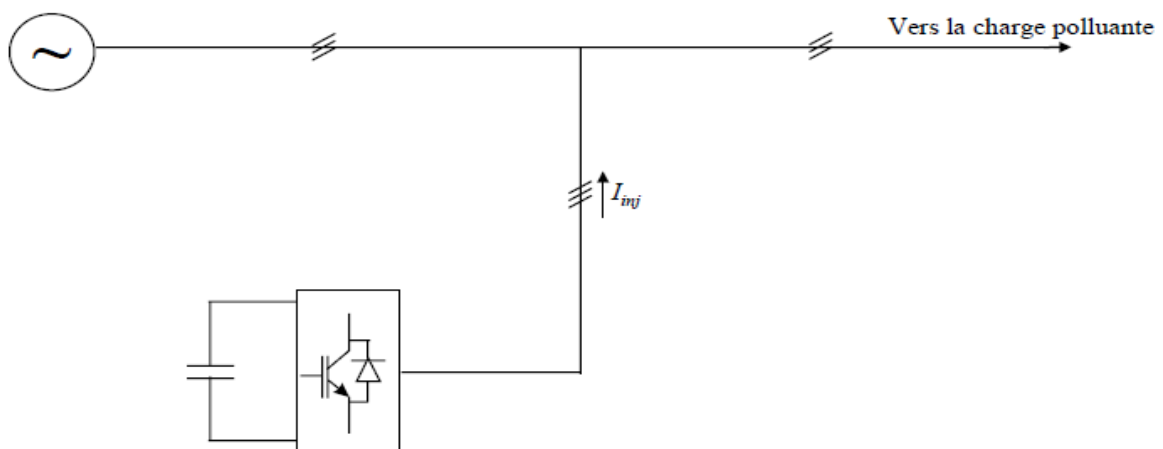


Fig. I.2 : Filtre actif parallèle.

I.6.2 Filtre actif série

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la figure I.3, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

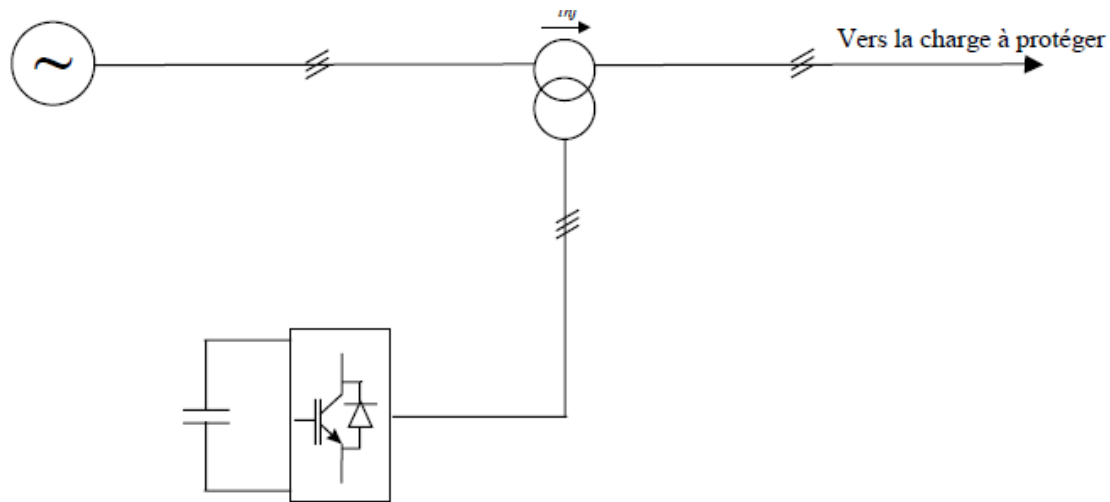


Fig. I.3 : Filtre actif série.

I.6.3 Combinaison parallèle-série actifs

La *combinaison parallèle-série actifs*, résulte de l'association des deux *filtres actifs parallèle* et *série*, comme le montre la figure I.4. Profitant des avantages des deux filtres actifs, le filtre assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [7].

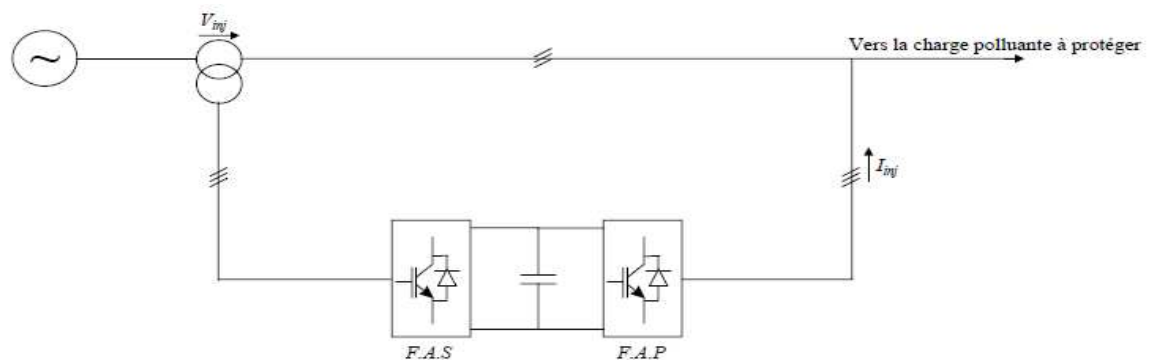


Fig. I.4 : Combinaison parallèle-série actifs (UPQC).

I.6.4 Avantages et inconvénients des filtres actifs

Le filtre actif offre de nombreux avantages:

Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau; Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante); Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction; Le risque de résonance entre le filtre et l'impédance du réseau ne se présente pas comme dans le cas du filtre passif; il peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge.

Toutefois, le filtrage actif présente quelques inconvénients :

Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance; il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif; son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtrage passif.

I.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exposé une idée générale sur la notion harmoniques, et principalement sur leurs sources, leurs caractéristiques, leurs influences sur les réseaux de distribution d'énergie et sur les récepteurs raccordés à un réseau pollué.

Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions existantes, notamment les techniques de filtrage et compensation à base d'éléments passifs présentent de plusieurs inconvénients qui peuvent être l'origine de problèmes d'harmoniques supplémentaires. Afin de palier à ces problèmes, nous avons présenté les différentes structures des filtres actifs.



CHAPITRE II :

Filtre Actif Parallèle : Modélisation et Principe de Commande

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions la structure générale d'un filtre actif parallèle triphasé permettant de compenser les harmoniques de courant d'un réseau électrique triphasé. Tout d'abord, nous introduirons le bloc principal de la partie puissance, notamment l'onduleur triphasé à structure tension. Les objectifs du présent chapitre sont de comprendre la structure du filtre actif parallèle ainsi que son fonctionnement général.

II.2 Principe du filtrage actif parallèle

Le principe du filtrage actif des courants harmoniques consiste à ajouter en parallèle avec la charge polluante un dispositif constitué d'un onduleur de tension à deux niveaux commandé en temps réel de telle sorte que le courant de source soit sinusoïdal.

Le filtre actif parallèle, appelé aussi compensateur shunt est une solution moderne et efficace pour restituer la forme sinusoïdale du courant provenant du réseau électrique lorsque celui-ci est déformé par une charge non linéaire qui se comporte comme un générateur de courants harmoniques. En effet, Il injecte au réseau des courants harmoniques égaux à ceux générés par la charge, mais de phase opposée de façon que le courant du réseau coté source sera ainsi sinusoïdal [8]. La figure. II.1 illustre ce principe.

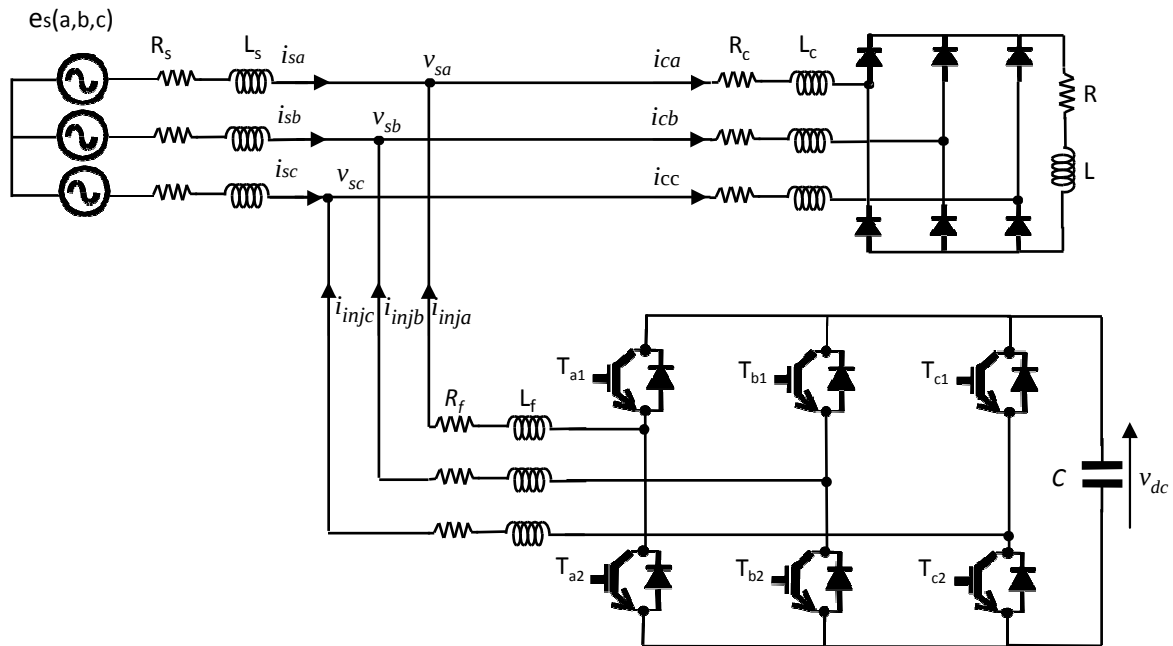


Fig. II.1. Circuit de puissance du filtre actif parallèle.

II.3 Description d'un onduleur de tension

L'onduleur triphasé de tension à deux niveaux à base d'IGBT est constitué de six interrupteurs bidirectionnels en courant (commandés à l'amorçage et au blocage) conduisant le courant dans les deux directions grâce aux diodes en antiparallèles. Il est associé généralement à deux étages passifs l'un du côté continu et l'autre du côté alternatif. L'étage passif du côté alternatif, a comme fonction principale le filtrage, il est constitué d'inductance de sortie [6,7] .

Pour la modélisation de l'onduleur, on considère un fonctionnement idéalisé :

Interrupteurs parfaits : la commutation des interrupteurs est instantanée (temps de fermeture et ouverture nul) et sans pertes. Enfin, la chute de tension dans les interrupteurs est considérée nulle en conduction.

Sources parfaites : la tension aux bornes du bus continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée.

Temps morts négligés : le but de notre étude étant de réduire la fréquence de découpage, les temps mort seront donc peu influents.

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur. Ainsi, comme les grandeurs de commande agissent sur les interrupteurs commandables, on peut définir l'état des interrupteurs T_{ki} ($k = a, b, c$ $i=1, 2$), on définit une fonction de commutation S_{ki} :

$$S_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{Si } T_{ki} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{Si } T_{ki} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

Les tensions triphasées de sortie par rapport à la référence de la source continue peuvent être exprimées par :

$$S_{K2} = 1 - S_{K1} \quad (\text{II. 2})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II. 3})$$

Les tensions composées entre les phases sont données par:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bo} - V_{co} \\ V_{co} - V_{ao} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II. 4})$$

Ainsi, on peut facilement exprimer les tensions V_{kn} (K=a,b,c) en fonction de commutation

S_{ki} comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} - V_{ca} \\ V_{bc} - V_{ab} \\ V_{ca} - V_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2S_{a1} - S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} + 2S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} - S_{b1} + 2S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.5})$$

Puisque les variables S_{ai} , S_{bi} et S_{ci} prennent chacune deux valeurs, il en résulte huit combinaisons de commande, qui sont présentées dans le Tableau II.1.

Tableau II.1. Tensions de 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 plan biphasé (α , β), en considérant V_f le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur V_f sont donnés par la figure II.2.

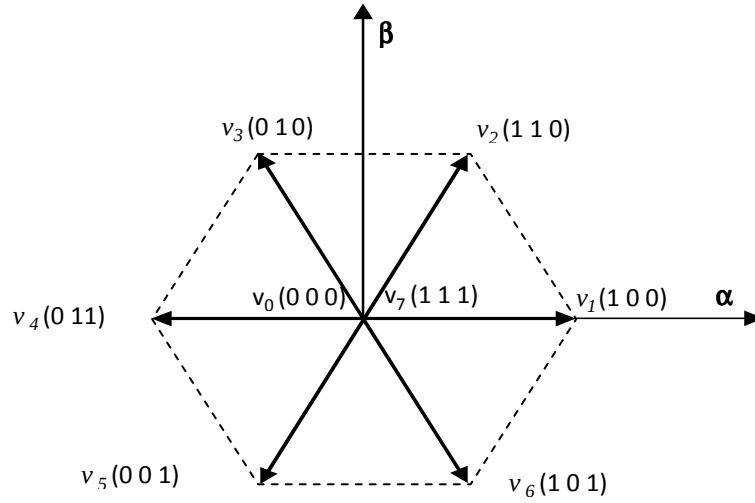


Fig . II.2. Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

Ou V_f représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de références que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la figure II.2 [4,6].

II.4 Modélisation du filtre actif parallèle

Selon la loi de mailles l'équation de tension pour chaque phase peut être donnée par :

$$\begin{cases} v_{fa} = R_f \cdot i_{fa} + \frac{L_f di_{fa}}{dt} + e_{sa} \\ v_{fb} = R_f \cdot i_{fb} + \frac{L_f di_{fb}}{dt} + e_{sb} \\ v_{fc} = R_f \cdot i_{fc} + \frac{L_f di_{fc}}{dt} + e_{sc} \end{cases} \quad (II.6)$$

L'équation d'état du bus continu comme fonction des fonctions de connexion est donnée par :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc} \quad (\text{II.7})$$

Le système d'équation définissant le filtre actif parallèle dans le plan triphasé est alors donné par :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fa}}{dt} = -R_f i_{fa} + v_{fa} - e_{sa} \\ L_f \frac{di_{fb}}{dt} = -R_f i_{fb} + v_{fb} - e_{sb} \\ L_f \frac{di_{fc}}{dt} = -R_f i_{fc} + v_{fc} - e_{sc} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Dans le repère stationnaire (α, β) et pour trois tensions de réseau équilibrées et symétriques, le système d'équations précédent est équivalent au système d'équation ci-après :

$$\begin{cases} v_{f\alpha} = R_f i_{f\alpha} + \frac{L_f di_{f\alpha}}{d(t)} + e_{s\alpha} \\ v_{f\beta} = R_f i_{f\beta} + \frac{L_f di_{f\beta}}{d(t)} + e_{s\beta} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Dans le repère tournant (d, q) et pour un réseau triphasé de tensions symétriques et équilibrées, la dynamique des courants injectés par l'onduleur triphasé est décrite par l'équation ci-dessous :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fd}}{dt} = -R_f i_{fd} - L_f \omega i_{fq} + v_{fd} - e_{sd} \\ L_f \frac{di_{fq}}{dt} = -R_f i_{fq} - L_f \omega i_{fd} + v_{fq} - e_{sq} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_d i_{fd} + S_q i_{fq} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

II.5 Commande prédictive

II.5.1 Définition

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé.

La commande prédictive se différencie des autres techniques de commande par le fait qu'elle doit être résolue en ligne, elle consiste à optimiser, à partir des entrées/sorties d'un système, le comportement futur prédit du système considéré. La prédiction est faite à partir d'un modèle interne du système sur un intervalle de temps fini appelé horizon de prédiction. La solution du problème d'optimisation est un vecteur de commande dont la première entrée de la séquence optimale est injectée au système. Le problème est à nouveau résolu sur l'intervalle de temps suivant en utilisant les données du système actualisées.

Cette stratégie de commande a montré son efficacité, sa flexibilité et son succès dans des applications industrielles, même pour des systèmes à faible période d'échantillonnage. L'application de la commande prédictive dans le domaine des commandes numériques a donné des bons résultats en termes de rapidité et de précision.

II.5.1 Principes

Fondamentalement, l'algorithme de commande prédictive prend en compte le comportement futur du système afin d'élaborer une commande permettant le meilleur suivi d'une trajectoire connue [9].

Le principe de la commande prédictive consiste à créer pour le système à commander un effet anticipatif par rapport à une trajectoire à suivre connue à l'avance, en se basant sur la prédiction du comportement futur du système et en minimisant l'écart de ces prédictions par rapport à la trajectoire au sens d'une certaine fonction coût, tout en respectant des contraintes de fonctionnement. Cette idée est simple et pratiquée de façon assez systématique dans la vie quotidienne. Par exemple, le conducteur d'un véhicule connaît la trajectoire de référence désirée à l'avance (la route) sur un horizon de commande fini (son champ visuel), et en prenant en compte les caractéristiques de la voiture (modèle mental du comportement du véhicule), il décide quelles actions (accélérer, freiner ou tourner le volant) il faut réaliser afin de suivre la trajectoire désirée. Seule la première action de conduite est exécutée à chaque instant, et la procédure est répétée à nouveau pour les prochaines actions [10].

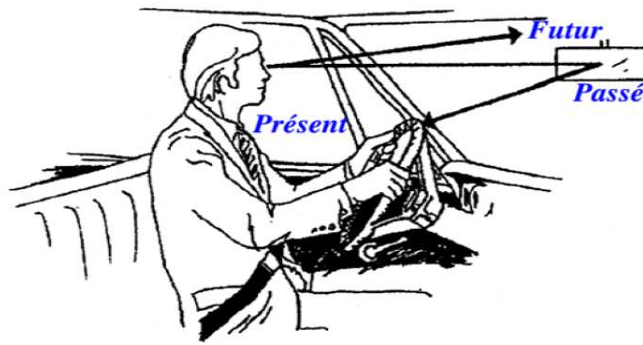


Fig. II.3. Philosophie de la commande prédictive.

II.6 Eléments d'une commande prédictive

Tous les algorithmes de la commande prédictive possèdent les mêmes éléments et différentes options peuvent être considérées pour chaque élément, ce qui donne une multitude d'algorithmes. Ces éléments sont :

1. Le modèle du système (pour la prédiction)
2. Le critère de performances (la prédiction)
3. L'algorithme d'optimisation (pour déterminer la séquence de commande)

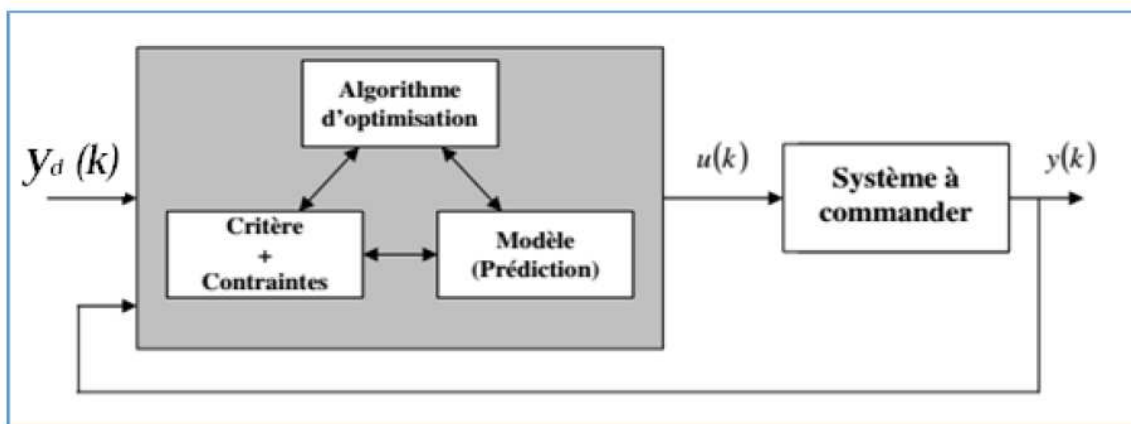


Fig. II.4. Stratégie de commande prédictive.

Pour l'implémentation de la stratégie prédictive, la structure de base de la figure (II.4) est mise en œuvre. Un modèle sert à prédire les futures sorties du système, grâce aux valeurs courantes et passées de la commande et aux commandes optimales futures. Ces dernières sont calculées par une méthode d'optimisation, qui prend en compte la fonction de coût (qui dépend aussi des consignes futures), et éventuellement des contraintes. Donc, Le modèle du système à commander joue un rôle central dans la commande prédictive. Le modèle choisi doit être capable de prendre en compte la dynamique du processus pour prédire précisément les sorties futures [10].

III.7 Intérêts de la commande prédictive

La plupart des régulations industrielles sont réalisées souvent avec des régulateurs PID analogiques, avec une efficacité remarquable et un rapport prix/performance avec lequel il est difficile de les rivaliser. Toutefois, ce type de régulateur ne couvre pas tous les besoins et ses performances souffrent dans un certain champ d'applications dont on cite [11]:

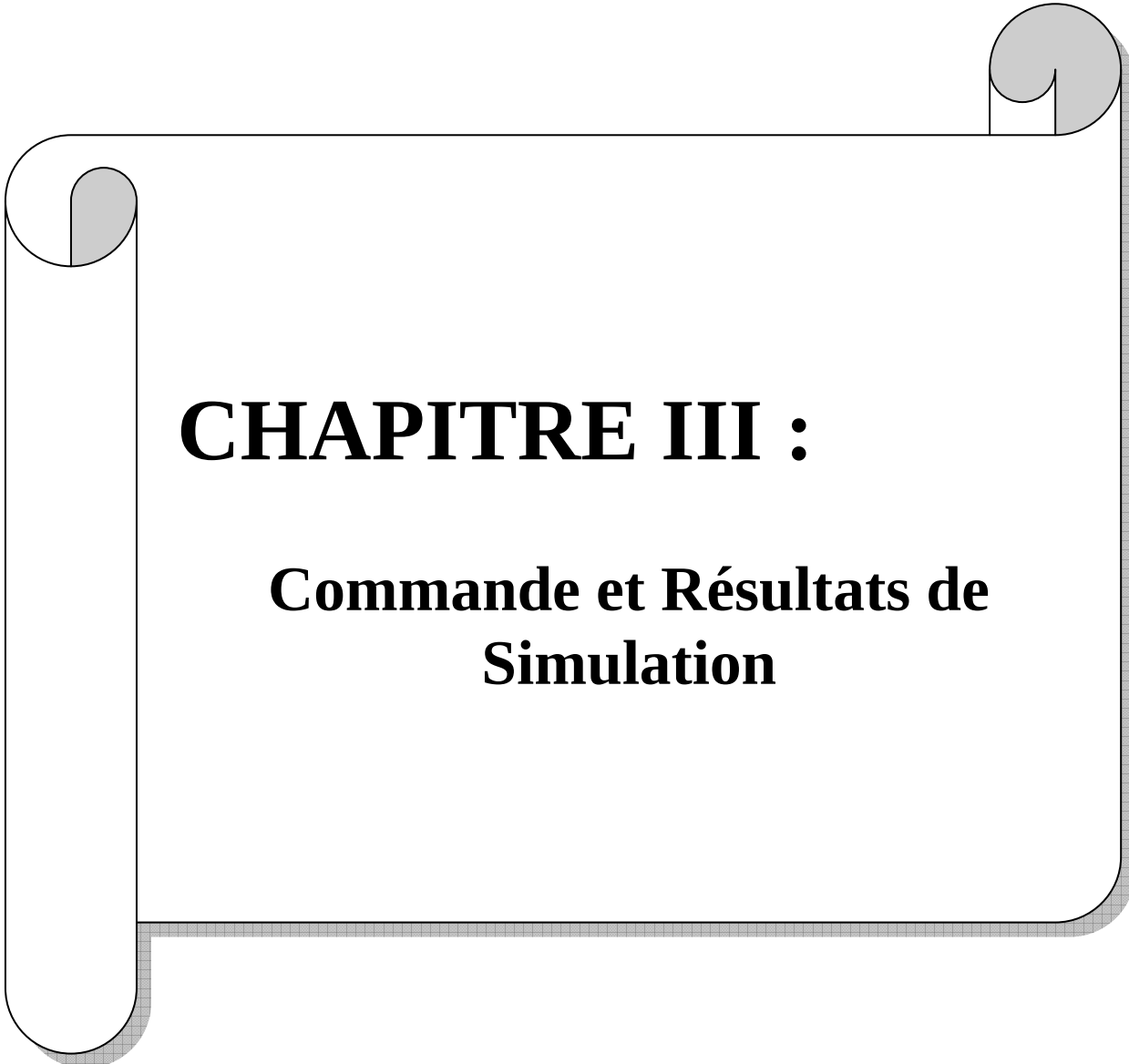
- Les processus difficiles, notamment non linéaires, instables, non stationnaires, à grand retard purs et aussi multi variables.
- Lorsque les performances sont tendues par l'utilisateur, notamment : forte atténuation des perturbations, erreur de traînage nulle en poursuite, réponse en temps minimal, ce qui amène à fonctionner sous contraintes qui affectent soit les variables de commande, soit les variables internes du processus.
- Ces limitations ont favorisé l'éclosion de la commande prédictive à base de modèle numérique puisque sur le plan technique, l'accessibilité est plus aisée aux calculateurs numériques susceptibles de réaliser des traitements algorithmiques, intégrant calcul et logique qu'aux régulateurs purement analogiques. En conséquence, le régulateur prédictif va être construit sur la base d'un modèle interne, qu'il va utiliser sur le site, en temps réel.
- La richesse de la commande prédictive provient du fait qu'elle n'est pas seulement capable de contrôler des processus simples du premier et du second ordre, mais aussi des processus complexes, notamment les processus avec temps de retard assez long, processus instable en boucle ouverte sans que le concepteur prenne trop des précautions spéciales.

Pendant les dernières années, différentes structures du contrôleur prédictif ont été développées, on peut citer la commande prédictive généralisée (GPC), qui a connu un grand

essor en tant que technique de commande avancée depuis le milieu des années 80.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure et les éléments constitutifs d'un filtre actif parallèle triphasé. Ce filtre permet de compenser les harmoniques de courant générés par des charges non-linéaires, connectées à un réseau électrique. Nous avons ensuite successivement donné les concepts de base et le principe de la commande prédictive, ainsi que les différents éléments de cette dernière et leurs intérêts.



CHAPITRE III :

Commande et Résultats de Simulation

III.1 Introduction

Nous avons développé aux chapitres précédents les notions théoriques relatives aux phénomènes des harmoniques et les principaux remèdes. Ce chapitre est consacré à l'étude d'un réseau comportant un filtre actif parallèle à structure tension commandé en puissance et une charge polluante connecté en parallèle sur celui-ci. Afin d'étudier les performances par simulation de commande directe de puissance prédictive appliquée au filtre actif parallèle, nous avons développé un modèle sous l'environnement Matlab/Simulink. Durant la simulation, la puissance réactive est maintenue à une valeur nulle, afin d'assurer un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

III.2 Commande directe de puissance prédictive

La stratégie de commande directe de puissance prédictive est basée sur la recherche de l'optimum d'une fonction de performance (fonction de coût) permettant de déterminer le vecteur de commande optimal, parmi l'ensemble des vecteurs possibles. Elle consiste donc à appliquer un seul vecteur de commande durant cette période.

Le schéma fonctionnel de la commande prédictive d'un filtre actif parallèle est présenté sur la figure (III.1) :

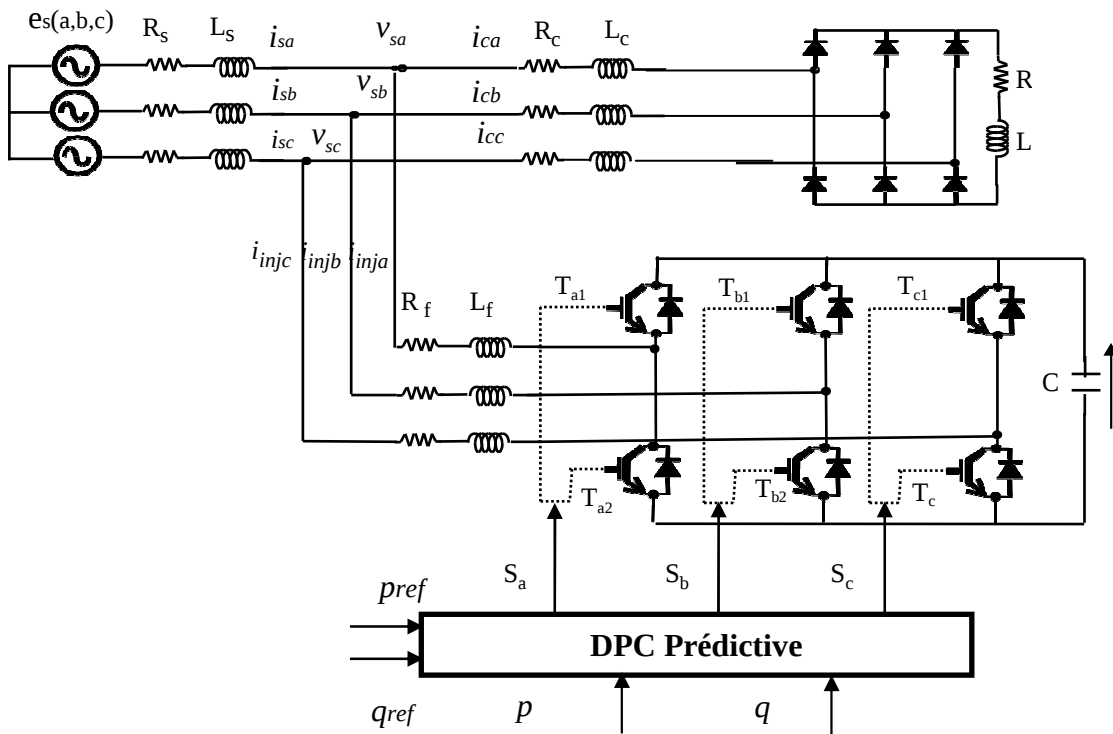


Fig. III.1. Configuration de la commande directe de puissance prédictive.

III.2.1 Calcul des puissances instantanées

En se basant sur la mesure des tensions au point de raccordement du filtre actif parallèle : v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} et des courants de source i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} , [6,7]. Après la transformation de Clark, on obtient les tensions $e_{s\alpha}, e_{s\beta}$ et les courants $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ sous le système de coordonnées stationnaires biphasés α - β .

$$\begin{cases} p = v_{s\alpha} i_{s\alpha} + v_{s\beta} i_{s\beta} \\ q = v_{s\alpha} i_{s\beta} - v_{s\beta} i_{s\alpha} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

III.2.2. Modèle prédictif du filtre actif parallèle

La commande directe de puissance prédictive avec fréquence de commutation variable est basée sur le modèle mathématique du filtre actif parallèle. En supposant que la période d'échantillonnage T_s est très petite par rapport à la période de la tension de source, c'est-à-dire ($T_s \ll T$), les deux composantes du vecteur de tension de source e_α, e_β peuvent être considérées comme des constantes pendant la période d'échantillonnage.

Cette hypothèse permet d'écrire les composantes e_α, e_β comme suit :

$$\begin{cases} e_\alpha(k) = e_\alpha(k+1) \\ e_\beta(k) = e_\beta(k+1) \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Pour une combinaison de système (III.1), les puissances active et réactive dans le prochain instant d'échantillonnage sont données par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} p(k+1) \\ q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha(k) & e_\beta(k) \\ e_\beta(k) & -e_\alpha(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) \\ i_\beta(k+1) \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

En conséquence, la variation des puissances active et réactive entre deux instants d'échantillonnage successifs peut être exprimée comme suit :

$$\begin{bmatrix} p(k+1) - p(k) \\ q(k+1) - q(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha(k) & e_\beta(k) \\ e_\beta(k) & -e_\alpha(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) - i_\alpha(k) \\ i_\beta(k+1) - i_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

En se référant à la figure III.1, les équations différentielles du filtre actif parallèle peuvent être exprimées comme suit :

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha(t) \\ e_\beta(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \end{bmatrix} - R_f \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

En négligeant l'effet de la résistance série de l'inductance de couplage R_f , l'équation III.5 prend la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{L_f} \left(\begin{bmatrix} e_\alpha(t) \\ e_\beta(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \end{bmatrix} \right) \quad (\text{III.6})$$

D'une discrétisation de l'équation III.6, on obtient la variation de vecteur de courants entre deux périodes d'échantillonnage k et $k+1$:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(k+1) - i_\alpha(k) \\ i_\beta(k+1) - i_\beta(k) \end{bmatrix} = \frac{T_s}{L_f} \left(\begin{bmatrix} e_\alpha(k) \\ e_\beta(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_\alpha(k) \\ v_\beta(k) \end{bmatrix} \right) \quad (\text{III.7})$$

En substituant l'expression de l'équation III.7 dans l'équation III.4, on obtient le modèle prédictif du filtre actif parallèle, basé sur les puissances active et réactive instantanées :

$$\begin{bmatrix} p(k+1) \\ q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p(k) \\ q(k) \end{bmatrix} + \frac{T_s}{L_f} \begin{bmatrix} e_\alpha(k) & e_\alpha(k) \\ e_\beta(k) & -e_\beta(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha(k) - v_\alpha(k) \\ e_\beta(k) - v_\beta(k) \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

D'après l'équation III.8, il est clair que l'inductance de couplage L_f et la période d'échantillonnage T_s sont les seuls paramètres impliqués dans le modèle prédictif du filtre actif parallèle.

III.2.3. Prédiction des références des puissances instantanées

La puissance active de référence est calculée à partir de la sortie du régulateur de tension du bus continu v_{dc} ; par contre la référence de la puissance réactive est mis à zéro pour

assurer un facteur de puissance unitaire. Pour cela, la prédiction des références des puissances active et réactive sont données par la relation suivante :

$$\begin{cases} p_{ref}(k+1) = 2p_{ref}(k) - p_{ref}(k-1) \\ q_{ref}(k+1) = q_{ref}(k) \end{cases} \quad (III.9)$$

III.2.4 Principe de sélection du vecteur de commande optimal

La commande proposée peut obtenir une bonne performance en régime permanent et une réponse dynamique rapide en sélectionnant le vecteur de tension optimal, ce qui minimise l'erreur entre la puissance de référence et la puissance réelle. Le vecteur de commande optimal est issu d'une minimisation d'une fonction coût pour les sept états de l'onduleur de tension à deux niveaux. La fonction objective pour la régulation des puissances active et réactive est généralement choisie comme une somme carrée ou absolue du terme d'erreur des puissances instantanées :

$$F = \min((p_{ref}(k) - p(k))^2 + (q_{ref}(k) - q(k))^2) \quad (III.10)$$

III.3 Résultats de simulation

Nous avons élaboré plusieurs cas de simulation que nous regrouperons dans trois cas d'étude :

- Régime permanent
- Régime dynamique
- Variation de la charge non linéaire

Les paramètres du filtre actif et du réseau sont résumé dans le tableau III.1.

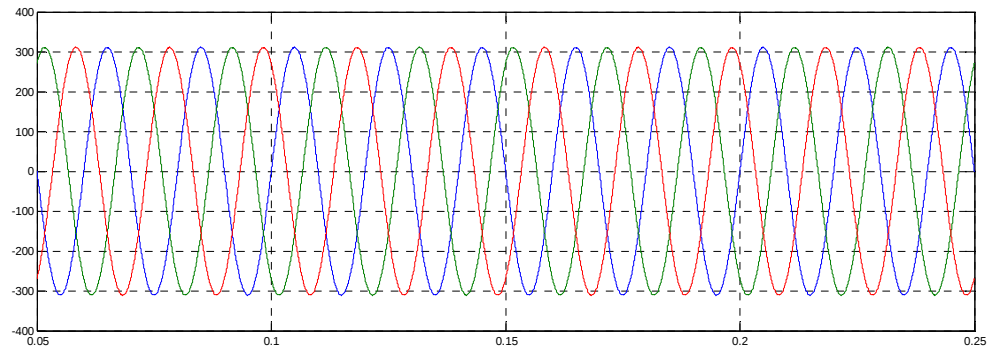
Tableau III.1
Paramètres de simulation d'un filtre actif parallèle.

Paramètre		Valeur numérique
Réseau électrique	E_s	220 V
	Fréquence f	50 Hz
	Résistance R_s	0.25 m Ω
	Inductance L_s	0.5 mH
Charge perturbatrice	Résistance R	26 Ω
	Inductance L	10 mH
	Résistance R_c	1.2 m Ω
	Inductance L_c	0.3 mH
Filtre actif parallèle	Résistance R_f	5 m Ω
	Inductance L_f	5 mH
	Tension v_{dc}	800 V
Période d'échantillonnage	T_s	10^{-6} s

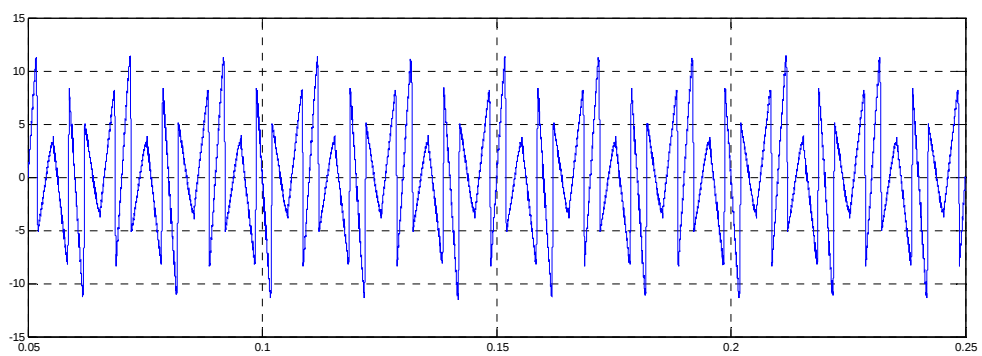
III.3.1 Régime permanent

Les résultats des figures III.2, III.3, III.4 et III.5 sont obtenus en régime permanent. Ces résultats de simulation montrent que la stratégie développée permet d'obtenir un bon contrôle des puissances active et réactive. Le spectre harmonique du courant de source avant et après compensation est représenté par les figures III.3.a et III.3.b. Le taux de distorsion harmonique avant compensation était égal à 28.45 %, après compensation il s'est réduit à 1.13 %.

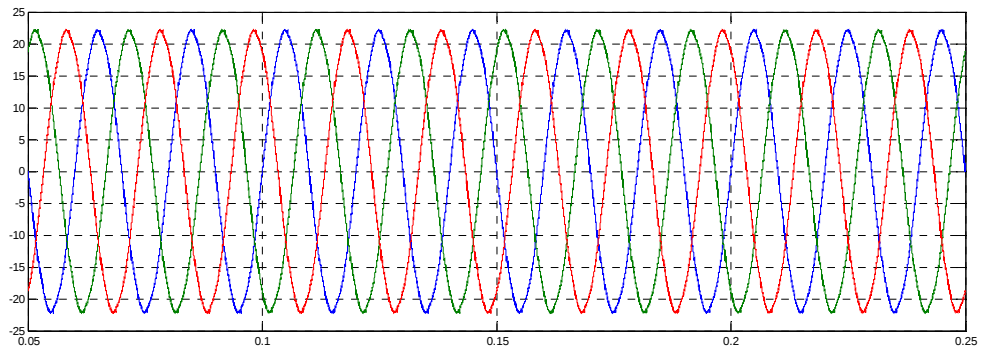
La figure III.5 représente le courant et la tension de la source, le courant reste en phase avec la tension en régime permanent sous un facteur de puissance unitaire côté réseau car la puissance réactive est maintenue nulle dans ce régime.



a) Tensions de source

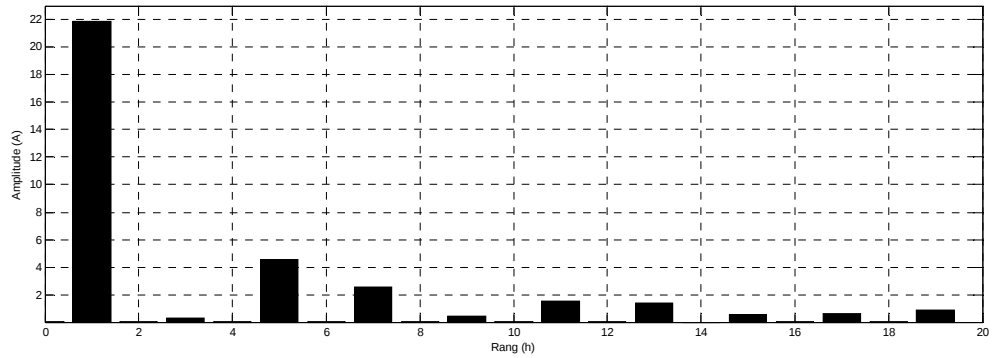


b) Courant du filtre

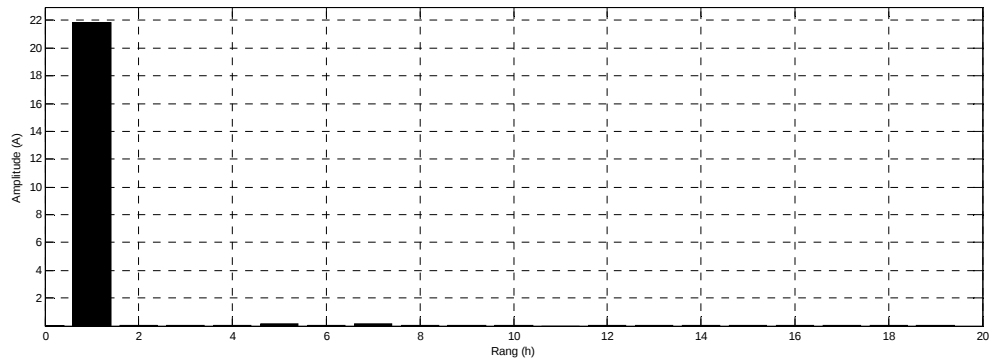


c) Courants de source

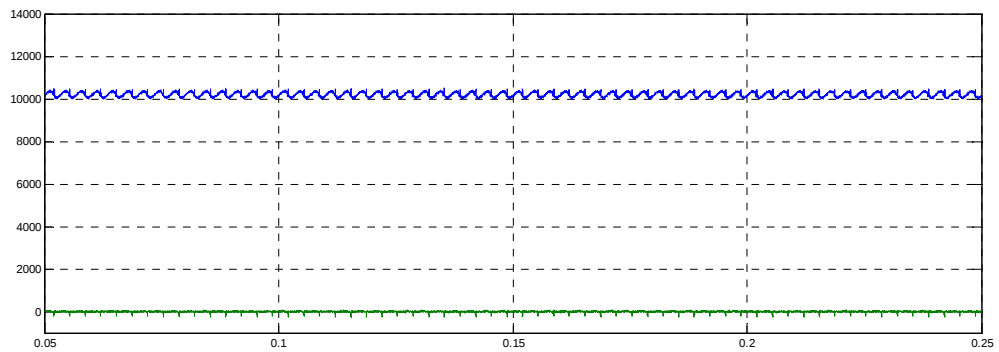
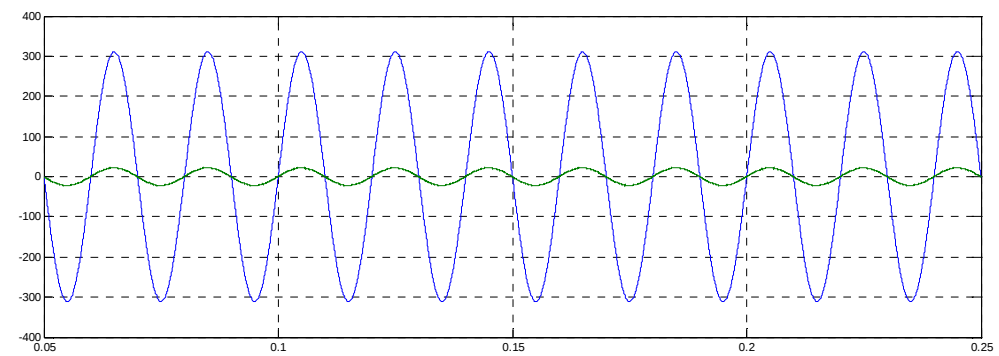
Fig. III.2. Résultats de simulation en régime permanent.



a) Spectre harmonique du courant de source avant compensation

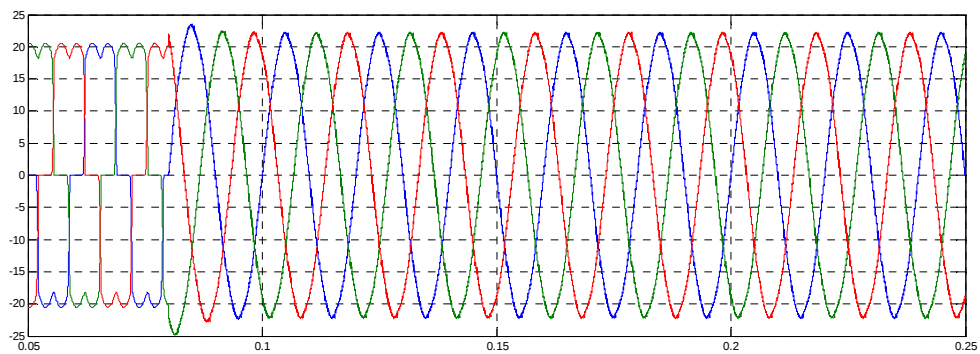


b) Spectre harmonique du courant de source après compensation

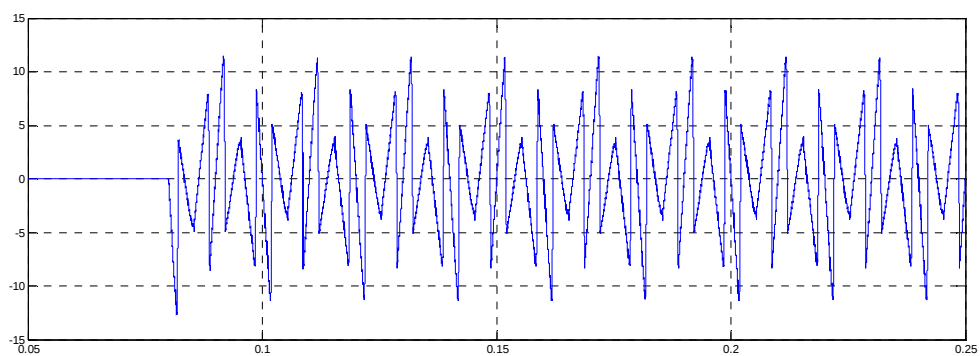
Fig. III.3. Analyse spectrale de courant de source après la mise en service du filtre actif parallèle.**Fig. III.5.** Courant et tension en phase (côté source en régime permanent).**Fig. III.4.** Allures des puissances instantanées en régime permanent.

III.3.2 Régime dynamique

Les figures III.6, III.7 et III.8 illustrent les performances dynamiques de la commande directe de puissance prédictive. Initialement le système fonctionne sans filtre actif parallèle, les courants de source sont identiques à ceux de la charge non linéaire caractérisés par un spectre contenant que des harmoniques d'ordre impair. La figure III.6 montre qu'à $t = 0.08s$ le filtre actif parallèle est mis en service, en produisant des courants du filtre qui arrivent, après un transitoire à rendre les courants de source sinusoïdaux et en phase avec les tensions correspondantes.



a) Courants de source



b) Courant du filtre

Fig. III.6. Résultats de simulation en régime dynamique.

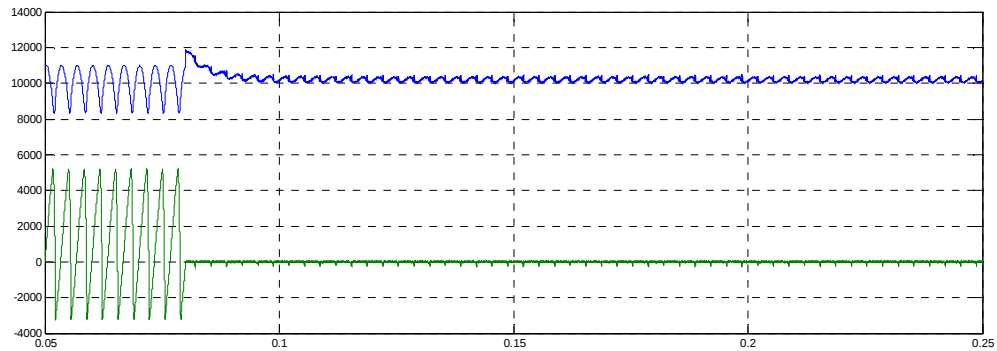


Fig. III.7. Allures des puissances instantanées en régime dynamique.

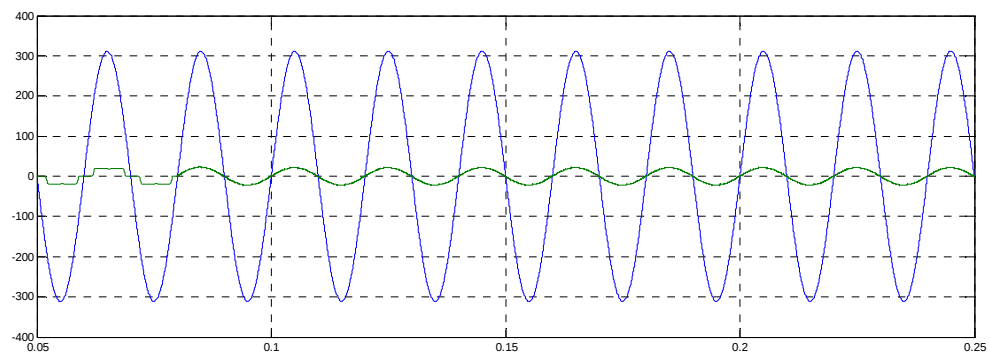
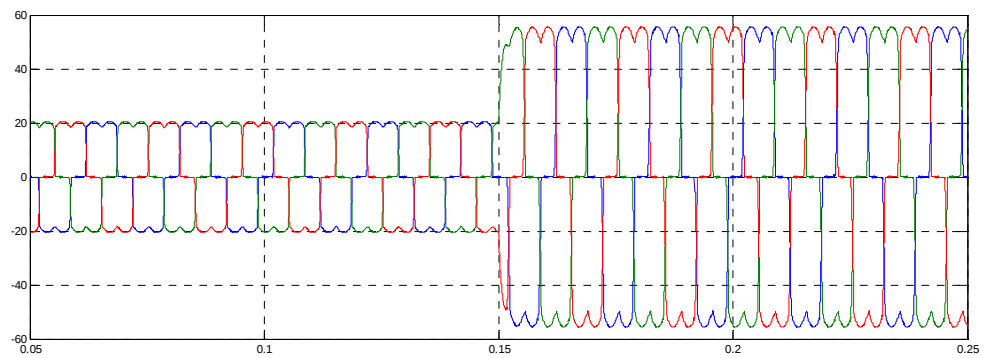


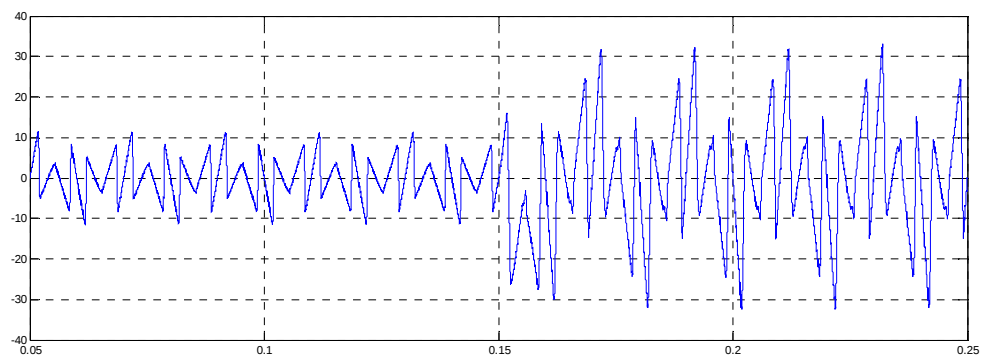
Fig. III.8. Courant et tension en phase (côté source en régime dynamique).

III.3.3 Variation de la charge non linéaire

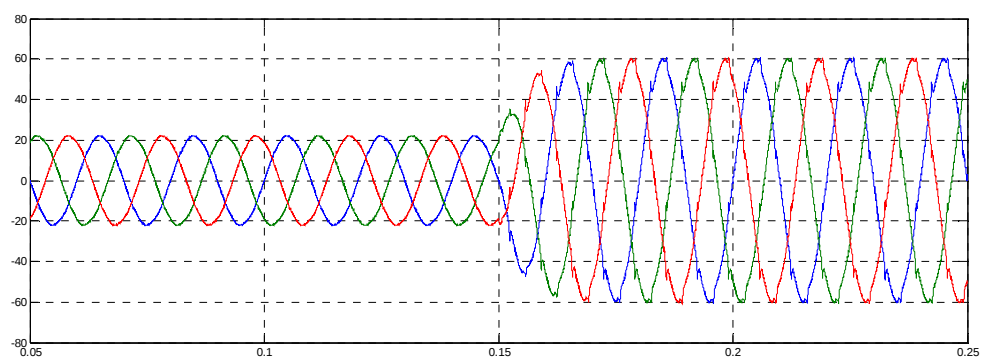
Les performances de la commande proposée pour une variation de la charge non linéaire sont présentées par la figure III.9. Ces résultats attestent du bon fonctionnement de la commande lors d'une variation brusque de la charge.



a) Courants de la charge



b) Courant du filtre

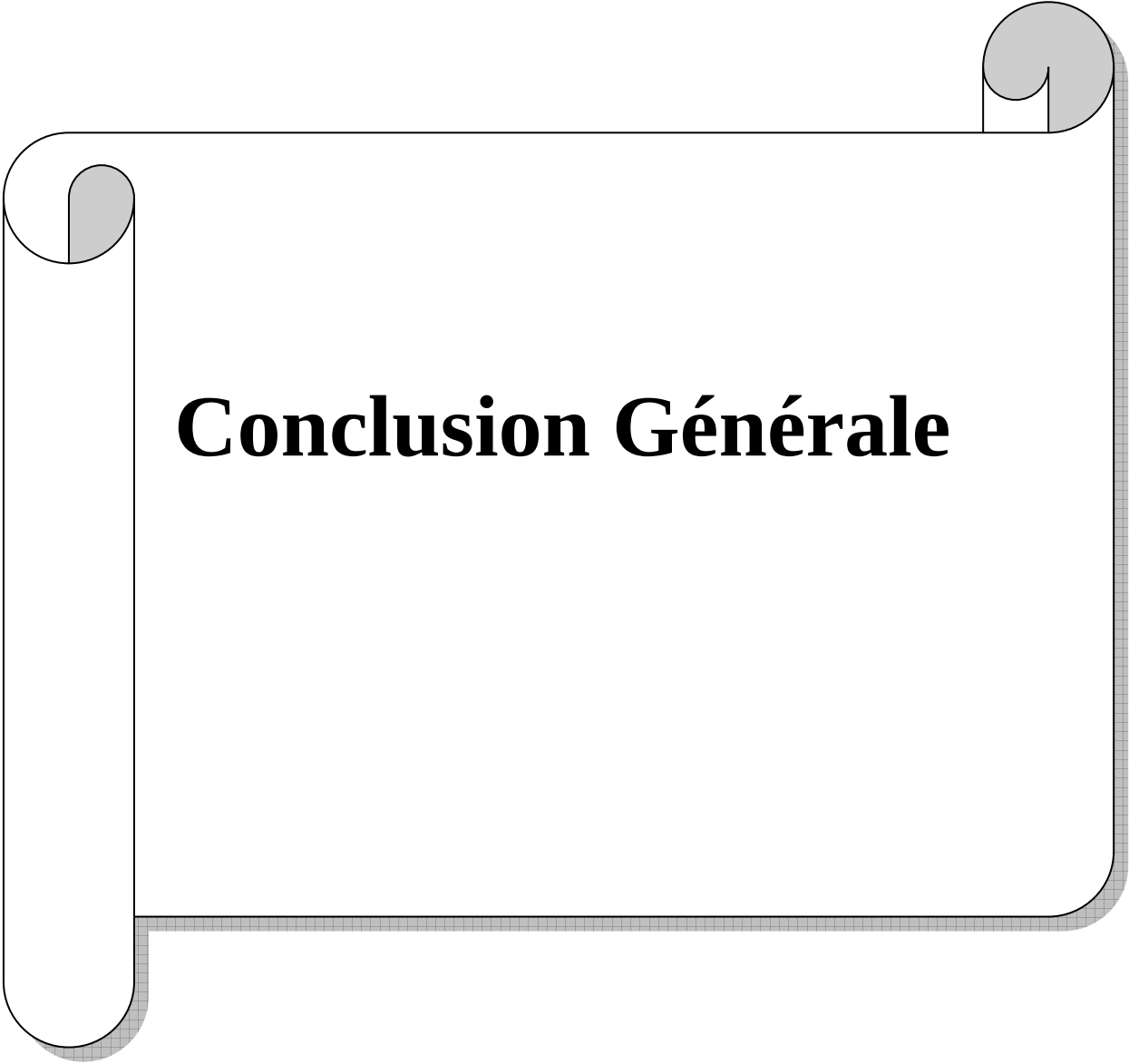


c) Courants de source

Fig. III.9. Résultats de simulation lors de la variation de la charge non linéaire.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la philosophie et le principe de la commande directe de puissance prédictive. Cette commande est basée sur la sélection du vecteur de commande optimal qui doit être appliqué durant chaque période d'échantillonnage. Nous avons mis en place un modèle discret d'un filtre actif parallèle reposant sur un onduleur de tension à deux niveaux. Les résultats de simulation obtenus montrent que la commande prédictive donne des performances très satisfaisantes.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude et simulation numérique de la commande prédictive en puissance appliquée au filtre actif parallèle. L'objectif de ce dernier est la compensation des perturbations du courants générées par les charges dites non linéaires, tels que les courants harmoniques.

Nous avons effectuée, dans un premier temps, une étude théorique sur la problématique des perturbations harmoniques générées par des charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. Nous avons alors présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées dans le filtrage. Dans le second chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle et son modélisation. D'autre part, l'efficacité du filtre actif dépend fortement de la méthode d'identification des courants de référence. La méthode choisie pour identifier les courants harmoniques est celle de l'identification des puissances réelle et imaginaire instantanée.

Dans le troisième chapitre on a étudié la commande prédictive en puissance appliquée au filtre actif parallèle. Les résultats de simulation ont été très satisfaisants, en effet, les objectifs de compensations ont été correctement achevés avec de taux de distorsion harmonique du courant de la source dans des limites très acceptables.

A l'issue de ce travail de mémoire, il se dégage quelques perspectives :

- Extension de la commande prédictive utilisée dans ce mémoire pour le filtre actif parallèle multiniveaux.
- Exploitation d'une commande prédictive avec les techniques intelligentes.

Références Bibliographiques

- [1] A. Bouafia, “ Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d’électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI”, *Thèse de Doctorat*, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.
- [2] V. Ignatova, “Méthodes d’analyse de la qualité de l’énergie électrique : application aux creux de tension et à la pollution harmonique”, *Thèse de Doctorat*, Université Joseph Fourier, Octobre 2006.
- [3] T. Gouraud, “Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique”, *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, Janvier 1997.
- [4] A. Chaoui, “Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires”, *Thèse de Doctorat*, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.
- [5] 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, Décembre 2005.
- [6] N. Mesbahi, “Contribution à l’étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les réseaux de distribution”, *Thèse de Doctorat*, Université Badji Mokhtar, Annaba, Juin 2014.
- [7] M.A. Alali, “Contribution à l’étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension”, *Thèse de Doctorat*, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Septembre 2002.
- [8] A Boukadoum, “Contribution à l’étude des stratégies d’identification harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques”, *Thèse de Doctorat*, Université Badji Mokhtar, Annaba, Avril 2015.
- [9] O. Bourebia, “Commande prédictive floue des systèmes non linéaires”, *Thèse de Doctorat*, Université Mentouri, Constantine, 2011.
- [10] A. Bezzini, “Commande prédictive non linéaire en utilisant les systèmes neuro-flous et les algorithmes génétiques”, *Mémoire de Magister*, Université Mohamed Khider, Biskra, 2013.

- [11] K. Barra, “Commande prédictive généralisée (GPC) des associations convertisseurs - machines à induction ”, *Thèse de doctorat*, université de Batna, 2008.