

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMARI, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Automatique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme

de MASTER ACADEMIQUE EN AUTOMATIQUE
OPTION : COMMANDE DES SYSTEMES

Thème

Dépollution des Réseaux Electriques En utilisant un Filtre
Actif Parallèle

Proposé par : Amar HAMACHE

Dirigé par : Amar HAMACHE

Présenté par :

Rabah DEMNI

Youcef YOUSNADJ

Soutenu le : 25/09/2013

Promotion 2013

Remerciements

Nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de nous avoir appris ce que nous ignorions, de nous avoir donné la santé et tout dont nous nécessitions pour l'accomplissement de cette thèse.

Nous tenons à remercier notre promoteur Mr HAMACHE Amar, maitre assistant A à l'UMMTO pour son orientation et ses conseils tout le long de ce travail.

Nous remerciments s'adresse aussi aux membres des jurys qui nous font l'honneur en acceptons de juger notre travail.

Tous les enseignants du département d'automatique de l'UMMTO qui ont participé à notre formation durant tout notre cycle universitaire ainsi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici l'expression de nos plus profonds remerciements.

Dédicaces

*A Mes parents qui m'ont aidé à devenir ce que je suis
aujourd'hui,*

A Mes frères et sœurs,

A Mes beaux frères et ma belle sœur,

A Mes neveux,

A Toute ma famille,

A Tous mes amis,

A Tous ceux qui me connaissent

Youcef

Dédicaces

A la mémoire de ma grande mère décédée récemment,

*A Mes parents qui m'ont aidé à devenir ce que je suis
aujourd'hui,*

A ma sœur Malika,

A tous mes chers frères depuis l'aîné au benjamin, Mohamed,

Kamel et Hamid,

A ma belle sœur Karima,

A mon beau frère Ali,

A ma nièce et mon neveu, Sara et Adem,

A mes cousins,

A mes chères amies,

A Tous ceux qui me connaissent

Rabah

Glossaire

A : Ampère

ΔH : La largeur de la bande d'hystérésis

Δi : Différence de courant

CEI : Commission Electrotechnique Internationale

C : Capacité

D : Déformante

Fc : Fréquence de coupure

FPGA : Field Programmable Gate Array

FAP : Filtre Actif Parallèle

FAS : Filtre Actif Série

FEM : Force Electromotrice

FFT : Fast Fourier Transforme

Ic : Courant charge

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

If : Courant Compensation

In : Composante harmonique de courant et de rang n

IGBT : Transistor Bipolaire à Grille Isole

Is : Courant source

L : inductance (bobine)

MLI : modulation de largeur d'impulsion

P : Puissance

PF : Facteur de Puissance

Glossaire

R : résistance

S : puissance apparente

T : Période

THD : taux de distorsion d'harmoniques

THD-I : taux de distorsion d'harmoniques de courant

THD-V : taux de distorsion d'harmoniques de tension

UPQC : unified power quality conditioner

V : Tension

Z : Impédance

BT : Basse Tension

Tableaux

Tableau.1.1 : Forme du courant absorbé par quelques charges non linéaires	6
Tableau 1.2 : Taux(en%) des tensions harmoniques acceptables (compatibilité)	13
Tableau 1.3 : Limites des émissions de courants harmoniques	14

Figures

Figure 1.1 : circuit électrique d'un filtre passe haut	15
Figure 1.2 : circuit électrique d'un filtre passe bas	16
Figure 1.3 : circuit électrique d'un filtre passe-bande.	16
Figure 1.4 : modèles des filtres passifs amortis	17
Figure 1.5 : Modèle d'un filtre passif résonant	17
Figure 1.6 : Filtre actif série	18
Figure 1.7 : Filtre actif parallèle	19
Figure 1.8 : Combinaison parallèle-série de filtre actif	19
Figure 1.9 : Combinaison filtre actif série avec filtre passif parallèle	20
Figure 1.10 : Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	21
Figure 1.11 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	21
Figure 2.1 : Filtre actif parallèle	24
Figure 2.2 : Circuit de puissance du filtre actif parallèle deux niveaux proposé	25
Figure 2.3 : schéma simplifié d'un réseau électrique.	26
Figure 2.4 : Onduleur de courant à hystérésis.	27
Figure 2.5 : Fonction "carré" (appelée aussi "rectangle" ou "méandre")	31

Tableaux et figures

Figure 2.6 : Fonction "dent de scie"	31
Figure 2.7 : Fonction "triangle"	32
Figure 2.8 : Fonction "sinusoïde redressée"	32
Figure 2.9 : Fonction "trapèze"	32
Figure 3.1 : Courant de charge.	38
Figure 3.2 : Courant de charge (un cycle réseau).	39
Figure 3.3 : Spectre du courant de la charge	39
Figure 3.4 : Courant de la charge et onde fondamentale.	40
Figure 3.5 : Un cycle réseau du courant harmonique.	40
Figure 3.6 : Un cycle réseau du courant de compensation.	41
Figure 3.7 : Un cycle réseau du courant de la source	41
Figure 3.7 : Spectre du courant de la source.	42
Figure 3.8 : Un cycle réseau du courant de compensation.	42
Figure 3.9 : Un cycle réseau du courant de la source.	43
Figure 3.10 : Spectre du courant de la source.	43

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I La pollution harmonique et les stratégies de dépollution	
Introduction	4
1.1. Définition des harmoniques	4
1.2. Inter-harmoniques	4
1.3. Infra-harmoniques	4
1.4. Origine des harmoniques	5
1.5. Effet des harmoniques	7
1.5.1. Effet instantanés	7
1.5.1.1. Vibration mécaniques	7
1.5.1.2. Phénomènes de la résonance	7
1.5.1.3. Interférence avec les réseaux de télécommunication	7
1.5.2. Effet a terme	7
1.5.2.1. Echauffement dans les conducteurs et les équipements électriques	8
1.5.2.2 Effets sur conducteur neutre	8
1.5.2.3 Dysfonctionnement d'appareils utilisant la tension comme référence	8
1.6. Caractéristiques des perturbations	8
1.6.1. Rang d'une harmonique	10
1.6.2. Facteur de puissance	10
1.7. Critères de quantification des perturbations	11

1.7.1. Taux de distorsion harmonique global de courant et de tension THD-I et THD-V	12
1.7.2. Facteur de distorsion global	13
1.8. Normes imposées sur le THD	13
2. Solutions de dépollution des réseaux électriques.....	14
2.1. Solutions traditionnelles	15
2.1.1. Filtres passifs	15
2.1.1.1. Filtre passe haut	15
2.1.1.2. Filtre passe bas.....	15
2.1.1.3. Filtre passe-bande	16
2.1.1.4. Filtre passif amorti	17
2.1.1.5. Filtre passif résonant	17
2.1.2. Les inconvénients des filtres passifs	18
2.2. Solutions modernes	18
2.2.1 .Les filtres actifs	18
2.2.1. Filtres actif séries	18
2.2.1.2. Filtre actif parallèle.....	19
2.2.1.3. Combinaison parallèle-série de filtre actif	19
2.2.1.4. Combinaison hybride passif-actif	20
2.2.1.4.1. Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	20
3.3.1.4.3. Filtre actif connecté en série avec des filtres passifs parallèles.....	20
3.3.1.4.3. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	21

2.2.2. Avantages et les inconvénients des filtres actifs parallèles	22
Conclusion	23
Chapitre II Modélisation et commande du FAP	
Introduction.....	24
1. principe de fonctionnement d'un filtre actif.....	24
1.1. Modélisation du système globale	25
1.1.1. Modélisation du réseau	25
1.1.2. Modélisation de l'onduleur de courant	26
1.1.2.1 Structure générale.....	27
2. algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques	28
2.1. Domaine temporelle.....	29
2.1.1. Méthode des puissances instantanées et sa variante.....	29
2.2. Domaine fréquentielle.....	29
2.2.1. Application des SERIES DE FOURIER	30
2.2.1.1 Définition d'une série.....	30
2.2.1.2. Définition de la décomposition en série de Fourier.....	30
2.2.1.3. Rappels et Conditions de Dirichlet.....	30
2.2.1.4. Expression de la décomposition en série de Fourier.....	33
2.2.1.5. Utilisation de la décomposition en série de Fourier	33
2.2.1.6. Expressions mathématiques.....	34
2.2.1.7. Forme algébrique de la décomposition en série de Fourier.....	34

Sommaire

2.2.1.8. Forme polaire de la décomposition en série de Fourier.....	35
2.2.2. Autre méthodes d'identification des harmoniques	37
Conclusion	37
Chapitre III Application à la réduction des harmoniques	
Introduction.....	38
1. Simulation	38
1.1. Situation normale.....	38
1.2. Situation perturbée (chute de tension à l'entrée de l'onduleur)	42
Conclusion	44
Conclusion générale.....	45
Références	47
Annexes	49

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels (utilisation de gradateurs, de redresseurs, de variateurs de vitesse,...), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...) et domestique (téléviseurs, appareils électroménagers grand public,...).

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements.

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

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

L'utilisation de dispositifs de filtrage tels que les filtres passifs dits résonnants et/ou amortis peut ainsi empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent également être utilisés pour compenser la puissance réactive. Cependant, le filtrage passif pose certains problèmes : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau. Ainsi, cette solution présente un inconvénient majeur qui peut être intolérable dans ces circonstances particulières.

Une autre solution consiste à mettre en œuvre un filtrage actif afin d'éviter les inconvénients des filtres passifs. Une première solution consiste à connecter le filtre actif en parallèle avec le système polluant : ainsi, il injecte au réseau un courant de même amplitude que celle du courant

harmonique à éliminer mais en opposition de phase. Une seconde approche consiste en la connexion du filtre actif en série avec le réseau : il se comporte alors comme un générateur de tension qui impose une tension harmonique telle que, additionnée à celle du réseau, la tension au point de connexion soit rendue sinusoïdale. Cependant le filtrage actif présente également ses inconvénients spécifiques, notamment son coût élevé pour des applications industrielles ; le dimensionnement du convertisseur de puissance du filtre actif peut alors être relativement élevé. Pour cette raison majeure, les applications des filtres actifs de puissance dans les systèmes électriques sont aujourd'hui encore limitées bien que des normes fixent les caractéristiques exigées pour la qualité de l'énergie.

Les inconvénients des filtres passifs et des filtres actifs peuvent être simultanément limités en utilisant de nouvelles topologies de filtres actifs, appelées filtres hybrides. L'utilisation de filtres actifs hybrides est aujourd'hui considérée comme une solution qui permet de réduire la dimension et par conséquent le coût des filtres actifs. Le filtre hybride consiste en l'association de filtres passifs, destinés à absorber les harmoniques de courant provenant de la charge polluante, et d'un filtre actif de faible puissance.

D'autre part, il est important de noter que les performances d'un filtre actif sont étroitement liées à l'algorithme utilisé pour déterminer les références harmoniques de courant ainsi qu'à la méthode utilisée pour la poursuite de ces références. De plus, le mode d'implantation, analogique ou numérique, peut également avoir une influence directe sur les performances du filtre actif, selon la technologie utilisée (système de prototypage DSPACE, FPGA, microcontrôleur, carte analogique,).

Le travail présenté dans ce mémoire est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les perturbations, des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes. Les origines de cette pollution harmonique, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations sont examinées et les différentes solutions qui existent.

Au second chapitre, nous étudions théoriquement la topologie de filtre actif parallèle à structure en courant et sa stratégie de commande (hystérésis). Aussi une méthode d'analyse spectrale basée sur les séries de Fourier est additionnée à notre dispositif (filtre actif, réseau, charge polluante)

et par la suite on présentera toutes les notions sur les séries de Fourier avec lesquelles on a pu réaliser notre outil de traitement de signal (analyseur).

Au troisième chapitre, nous présentons les résultats de simulation obtenus pour la commande dite « hystérésis ». Les résultats obtenus nous permettent de distinguer deux cas :

- Cas où le système fonctionne dans la situation normale.
- Cas perturbé (chute de tension à l'entrée de l'onduleur).

CHAPITRE I

La pollution harmonique et les stratégies de dépollution

Introduction

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes : les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs et les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques et déséquilibrées et les creux de tension.

Dans ce chapitre, nous commencerons par une définition de la pollution harmonique, ensuite nous présenterons les types, origine, effets, caractéristiques des harmoniques et par la suite nous aborderons les critères de quantifications des harmoniques.

Comme solution au problème des harmoniques, nous citerons les solutions traditionnelles et modernes et nous terminerons par l'illustration des inconvénients et avantages des filtres actifs parallèles.

1.1. Définition des harmoniques

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiples de la fréquence fondamentale souvent 50 Hz . Ils sont générés par des charges dites non linéaires.

1.2. Inter-harmoniques

Les inter-harmoniques sont des signaux de fréquence non multiples de la fréquence fondamentale : ils se situent entre les harmoniques. Certains de ces derniers sont émis par les charges non linéaires.

Parmi ces charges on trouve des convertisseurs de fréquence statique qui génèrent les tensions et les courants inter-harmoniques sur le réseau tels les variateurs de vitesse pour les moteurs asynchrones, et aussi les fours à arcs.

1.3. Infra-harmoniques

Les infra-harmoniques sont des composants qui ont des fréquences inférieures à celle du fondamental.

1.4. Origine des harmoniques

Certain appareils, contenant en général des éléments d'électronique de puissance à base de semi-conducteurs pour se raccorder au réseau, absorbent un courant qui n'est pas sinusoïdal. Ces charges connues sous le nom de charges non-linéaires sont principalement à l'origine de la distorsion harmonique présente sur le réseau. Les convertisseurs statiques sont les plus gênants du fait du nombre important et de la puissance des dispositifs installés. Nous pouvons citer :

- Les gradateurs, que cela soit pour les entrainements de faible puissance, les systèmes d'éclairage et de chauffage ou pour les systèmes de conduite du réseau.
- Les redresseurs de tension à diodes ou à thyristors.
- Les circuits magnétiques saturables.
- Les équipements industriels (les machines à souder, fours à arc, fours à induction...).
- Les variateurs de vitesse pour les moteurs à courant continu.
- Les appareils de bureau (ordinateur, photocopieur, fax ...).
- Les appareils domestiques (micro-onde, TV, frigidaire).

Les onduleurs [1].

Tableau.1.1. Forme du courant absorbé par quelques charges non linéaires [11].

Type de charge	Schéma	Allure de courant
Gradateur de lumière ou de chauffage		
Redresseur d'alimentation à découpage, Par exemple : <ul style="list-style-type: none"> • Ordinateur • Electroménager 		
Redresseur triphasé avec condensateur en tête par exemple : variateur de vitesse pour moteurs asynchrones		
Redresseur triphasé avec inductance de filtrage en continu, par exemple : chargeur de batterie.		
Redresseur triphasé avec inductance de lissage en alternatif, par exemple : ASI de forte puissance		

1.5. Effet des harmoniques

Les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance à des tensions harmoniques qui vont se superposer à la tension fondamentale du réseau. La tension qui en résulte n'est plus tout à fait sinusoïdale. On distingue deux types d'effet des harmoniques sur les équipements électriques

1.5.1. Effets instantanés

Ce sont des effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement, par exemple : dans le cas des appareils électriques, il peut s'agir d'une altération de l'image pour les écrans de télévision ou une altération de son d'un téléphone. La précision des appareils de mesure est également affectée par la présence d'harmoniques.

1.5.1.1. Vibrations mécaniques

La présence d'harmoniques peut engendrer des couples mécaniques pulsatiles sur l'arbre des moteurs asynchrones. Ces couples, qui sont dus aux champs tournants harmoniques, engendrent des vibrations dans les moteurs électriques.

1.5.1.2. Phénomènes de résonance

Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances de transformateurs et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais elles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique. Dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.

1.5.1.3. Interférence avec les réseaux de télécommunication

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants. Dans le cas de résonance, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendus inutilisable.

1.5.2. Effet à terme

Ils se manifestent après une longue exposition au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités ou une destruction complète de l'appareil [2].

1.5.2.1. Echauffement dans les conducteurs et les équipements électriques

Les pertes totales par effet joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$RI^2 = \sum_{n=1}^{n=\infty} RI_n^2 \quad 1.1$$

I : Le courant total

I_n : Composante harmonique de rang n (fondamentale pour $n = 1$)

R : La résistance traversée par le courant I

Les harmoniques font aussi augmenter les pertes fer. Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs...).

Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension résultante de la présence de la tension harmonique, donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs [3].

1.5.2.2 Effets sur conducteur neutre

Dans un système équilibré, les composantes homopolaires dans le neutre sont nulles. Ceci n'est pas le cas des systèmes comportant une charge non linéaire. En effet, les courants homopolaires des harmoniques de rang multiples de 3 vont s'additionner dans le conducteur neutre. L'intensité de ces courants superposés peut endommager sérieusement le câble neutre.

1.5.2.3 Dysfonctionnement d'appareils utilisant la tension comme référence

Une tension déformée peut altérer le bon fonctionnement de certains appareils électroniques qui utilisent les passages à zéro de la tension d'alimentation pour fonctionner adéquatement. En effet, les tensions harmoniques peuvent créer des faux passages de la tension à zéro, ce qui engendre un mauvais fonctionnement pour ces appareils. Divers équipements sont sensibles à cette problématique, citons : les convertisseurs et les automates programmables.

1.6. Caractéristiques des perturbations

Le cœur de notre repos sur les grandeurs électriques non sinusoïdales, il est nécessaire de faire un rappel sur les grandeurs électriques en présence d'harmoniques. La théorie classique de l'énergie électrique ne tient compte que des systèmes électriques basés sur les signaux

sinusoïdaux équilibrés. Cependant les signaux électriques présents sur les réseaux sont souvent perturbés et ils ne sont pas parfaitement sinusoïdaux ni équilibrés. Dans le domaine de la qualité de l'énergie, il est indispensable de connaître tous les échanges d'énergie entre le réseau et les différentes charges de façons à pouvoir compenser les éventuelles perturbations. L'analyse des signaux non sinusoïdaux et déséquilibrés est basée sur deux concepts mathématiques qui sont les harmoniques et les composants symétriques, qui permettent la décomposition des signaux électriques perturbés en composantes idéales.

Le concept d'harmonique a été introduit au début du XIX^{ème} siècle par Joseph Fourier, en démontrant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être décomposé sous la forme d'une série donnée par :

$$x(t) = x_0 + \sum_{n=1}^{\infty} x_n \sqrt{2} \sin[n(\omega t) + \varphi_n] \quad 1.2$$

D'où :

x_0 : La composante continue généralement nulle

ω : Pulsation de la fréquence fondamentale

n : Le rang de l'harmonique

x_n : Valeur efficace de l'harmonique de rang (n)

φ_n : Phase de l'harmonique de rang (n)

Les expressions instantanées du courant $I(t)$ et de la tension $V(t)$ peuvent donc se mettre sous la forme :

$$I(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sqrt{2} \sin[n(\omega t) + \alpha_n] \quad 1.3$$

Et

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sqrt{2} \sin[n(\omega t) + \beta_n] \quad 1.4$$

Les valeurs efficaces de I_{eff} et de V_{eff} sont données par l'application de la formule générale :

$$X_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \quad 1.5$$

D'où

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad 1.6$$

Et

$$V_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad 1.7$$

1.6.1. Rang d'une harmonique

Le rang de l'harmonique est défini comme le rapport entre la fréquence f_n à celle du fondamental f_1 .

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad 1.8$$

1.6.2. Facteur de puissance

Dans le cas d'un réseau, les grandeurs de puissance sont définies comme suit :

La puissance instantanée :

$$p(t) = v(t)i(t) \quad 1.9$$

La puissance active :

$$S = V_{eff} I_{eff} \quad 1.10$$

La puissance réactive :

$$Q = V_{eff} I_{eff} \cos\varphi \quad 1.11$$

La puissance apparente :

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} I_{neff} \cdot V_{neff} \cos(\varphi_n) \quad 1.12$$

Ou

$$\varphi_n = \beta_n - \alpha_n \quad 1.13$$

Le facteur de puissance PF défini par le rapport entre la puissance active et la puissance apparente s'exprime comme suit :

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_{neff} V_{neff} \cos(\varphi_n)}{V_{eff} I_{eff}} \quad 1.14$$

Afin d'estimer la participation des harmoniques du courant dans la puissance apparente, une notion de puissance supplémentaire appelée puissance déformante (D) est introduite, dans le cas où la tension est parfaitement sinusoïdale :

$$D = V_1 \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad 1.15$$

La puissance apparente peut donc se mettre sous la forme :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad 1.16$$

Le facteur de puissance s'écrit alors :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad 1.17$$

Cette dernière expression fait clairement apparaître l'impact de la puissance déformante sur la dégradation du facteur de puissance [4].

1.7. Critères de quantification des perturbations

Afin de quantifier le niveau de perturbation, différents critères sont disponibles. Les plus utilisés sont le taux de distorsion d'harmoniques de courant que l'on notera THD et qui sert

à quantifier les perturbations harmonique de courant et le facteur de puissance réactive consommée. Il est défini par :

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_{effn}}{I_{eff1}} \right)^2} \quad 1.18$$

Ou :

I_{effn} : La valeur du courant de l'harmonique de rang n .

I_{eff1} : La valeur de courant fondamental.

Le facteur de puissance est défini par :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad 1.19$$

Où :

P : La puissance active

S : La puissance réactive

φ : Le déphasage entre le courant et la tension

1.7.1. Taux de distorsion harmonique global de courant et de tension THD-I et THD-V

Rapport de la valeur efficace de l'ensemble des courants harmoniques du signal sur la valeur efficace du même signal à la fréquence fondamentale

$$THDV : \quad V_{thd} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots}}{V_1} \times 100\% \quad 1.20$$

$$THDI : \quad I_{thd} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1} \times 100\% \quad 1.21$$

1.7.2. Facteur de distorsion global

Rapport de la valeur efficace de l'ensemble des courants harmoniques du signal sur la valeur efficace du signal

$$DF = \frac{\sqrt{I_0^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 \dots}}{I_{eff}} \times 100\% \quad 1.22$$

1.8. Normes imposées sur le THD

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies :

La norme CEI 50160 définit les caractéristiques principales au point de livraison du client pour un réseau public basse tension, et en particulier les niveaux de tension harmoniques (ceux de la classe 2 de tableau 1.2). Il s'agit de niveau de compatibilité en termes de compatibilité électromagnétique. En outre cette norme, indique les niveaux maximums des divers harmoniques, elle est définie par la CEI 61000.

Tableau 1.2: Taux(en%) des tensions harmoniques acceptables (compatibilité) [5].

Rang de l'harmonique	Classe 1 (matériels et systèmes sensible)	Classe 2 (réseaux publique et industriels)	Classe 3 (pour le raccordement des gros pollueurs)
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1.5
5	3	6	8
6	0.5	0.5	1
7	3	5	7
8	0.5	0.5	1
9	1.5	1.5	2.5
10	0.5	0.5	1
11	3	3.5	5
12	0.2	0.2	1
13	3	3	4.5
THD	5%	8%	10%

La norme (CEI-1000-3-4) spécifie les limites d'émission de courants harmoniques des équipements individuelles d'intensité assignée supérieure à 16 A et jusqu'à 75 A. ces limites s'appliquent au réseau public de tensions nominales comprises entre 230V (monophasé) et 600 V (triphase) [5].

Tableau 1.3 : Limites des émissions de courants harmoniques [5]

Rang	Courant harmoniques en%
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2.0
15	0.7
17	1.2
19	1.1
21	≤ 0.6
23	0.9
25	0.8
27	≤ 0.6
29	0.7
31	0.7
≥ 33	≤ 0.6
Pair	≤ 0.6

2. Solutions de dépollution des réseaux électriques

Avant l'apparition des filtres, l'utilisation du transformateur spécial était le moyen le plus utilisé pour éliminer les harmoniques. Mais ils n'étaient pas très efficaces car ils ne fonctionnent que pour les charges qui sont équilibrées. C'est pour cela actuellement la méthode la plus employée et efficace est celle du filtrage.

2.1. Solutions traditionnelles

2.1.1. Filtres passifs

Le plus ancien pour le traitement des harmoniques de courant. Il consiste à piéger les courants harmoniques pour empêcher qu'ils ne se propagent dans le reste du réseau,

Il est composé par des éléments passifs comme des inductances, des condensateurs et des Resistances, le filtre passif peut être conçu pour un seul harmonique ou une série d'harmoniques.

On détermine différents types de filtres passifs qui sont réglées à des fréquences déterminées :

2.1.1.1. Filtre passe-haut

Son concept est d'atténuer les fréquences inférieure à sa fréquence de coupure F_c et ce, dans le but de conserver les hautes fréquences, la manière la plus simple de le réaliser physiquement est d'utiliser un circuit RC .

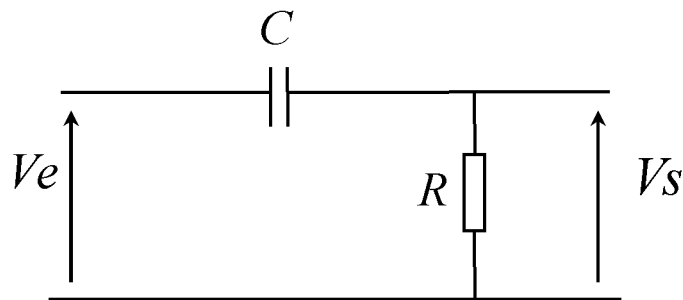


Figure 1.1. Circuit électrique d'un filtre passe haut

$$\text{Tel que : } A_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{jRC \omega}{1 + jRC \omega}$$

2.1.1.2. Filtre passe-bas

Son concept est d'atténuer les fréquences supérieure à sa fréquence de coupure F_c et ce, dans le but de conserver uniquement les basse fréquences. On le réalise à l'aide de circuit RC

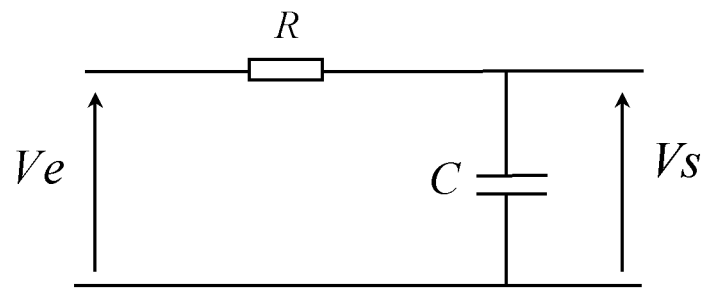


Figure 1.2. Circuit électrique d'un filtre passe bas

Tel que :
$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

2.1.1.3. Filtre passe-bande

Il ne laisse passer qu'un intervalle de fréquences entre deux fréquences choisies

f_{c1} et f_{c2} .

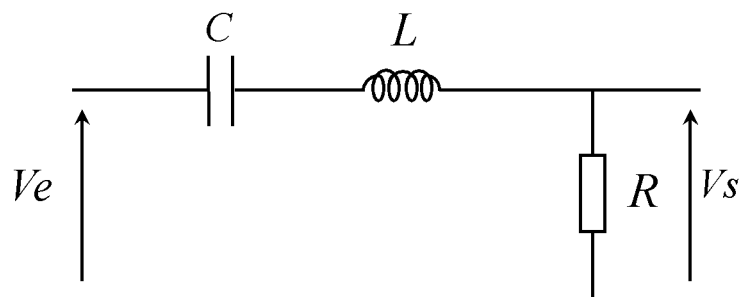


Figure 1.3. Circuit électrique d'un filtre passe-bande.

On trouve aussi deux types de filtres passifs utilisés pour éliminer les harmoniques du réseau électrique.

2.1.1.4. Filtre passif amorti

On distingue trois types de filtres : 1^{er} ordre, 2^{ème} ordre et 3^{ème} ordre comme le montre les figure si dessous :

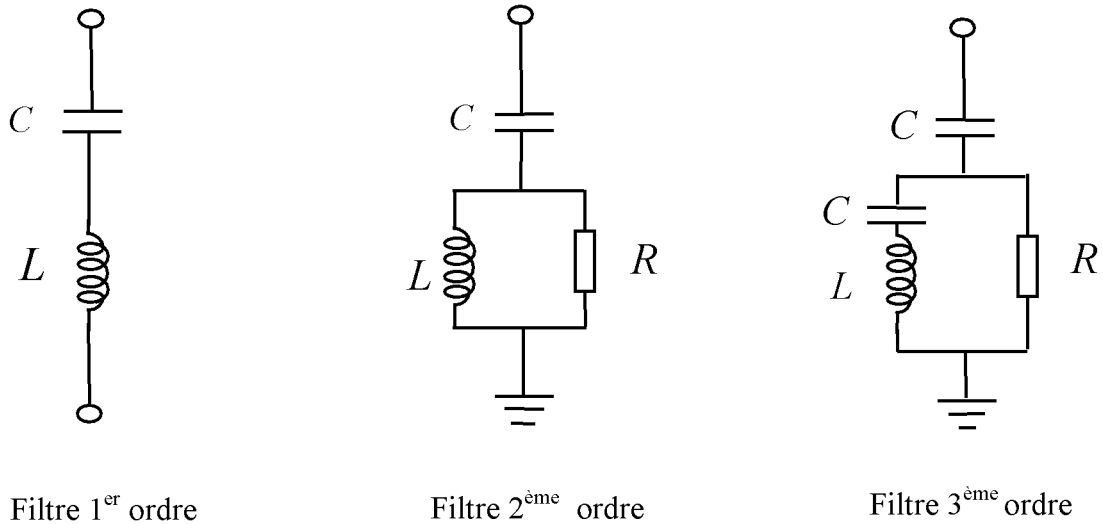


Figure 1.4. Quelques modèles des filtres passifs amortis

2.1.1.5. Filtre passif résonant

Le filtre passif résonant est composé d'une inductance L en série avec un condensateur C . les valeurs de l'inductance L et de la capacité C sont calculées à la fréquence correspondante à la fréquence de l'harmonique à éliminer [6].

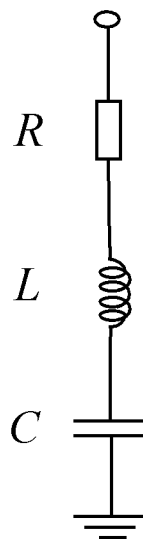


Figure 1.5. Modèle d'un filtre passif résonant

2.1.2. Les inconvénients des filtres passifs

Le filtre 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 mais il présente des inconvénients, en voici quelques uns [3]:

- Le filtrage passif est peu flexible, et en cas de modifications dans le réseau, il peut avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage
- L'impédance de réseau en présence des filtres peut faire apparaître des résonances
- D'être encombrant et de causer des vibrations

2.2. Solutions modernes

2.2.1 .Les filtres actifs

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques. Dans la suite, différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées.

2.2.1. Filtres actif série

Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge peut être rendue sinusoïdale. Cependant, le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

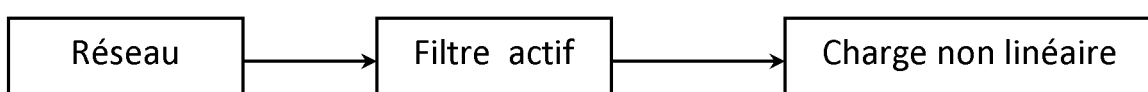


Figure 1.6. Filtre actif série

2.2.1.2. Filtre actif parallèle

Le FAP se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal.

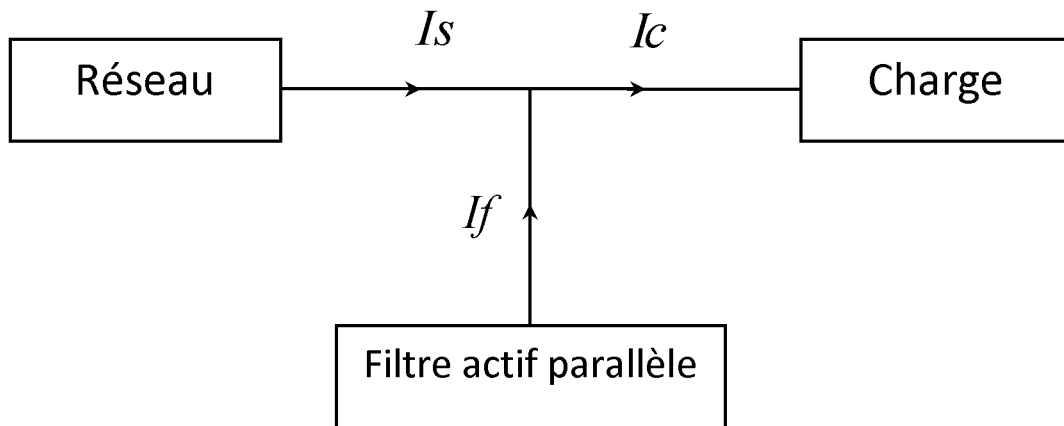


Figure 1.7. Filtre actif parallèle

2.2.1.3. Combinaison parallèle-série de filtre actif

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi conditionneur universel de la qualité d'onde (UPQC), de son origine anglais « Unified Power Quality Conditioner », résulte de l'association des deux filtres actifs et séries comme le montre la figure (1.8) l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci.

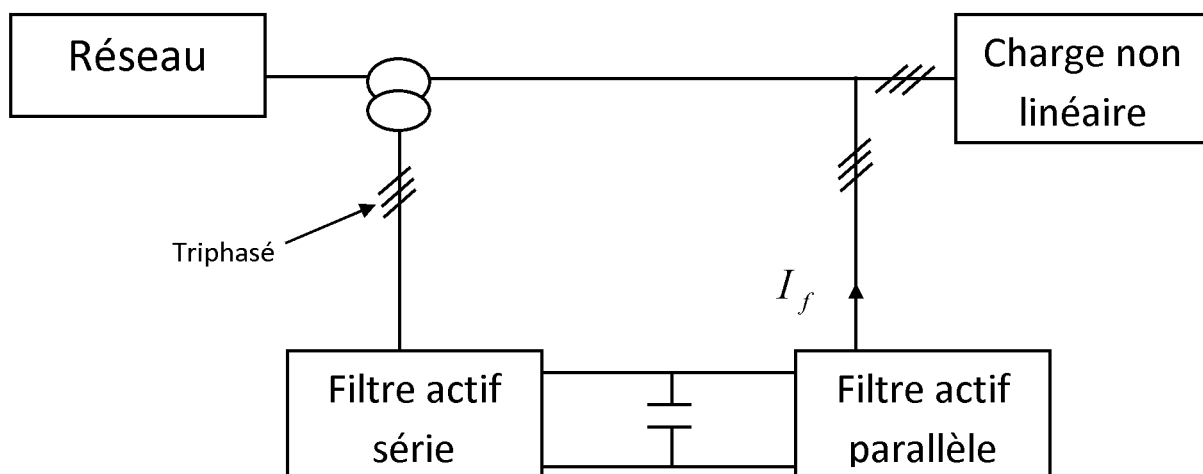


Figure 1.8. Combinaison parallèle-série de filtre actif

2.2.1.4. Combinaison hybride passif-actif

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution.

On trouve trois types de combinaisons :

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

2.2.1.4.1. Filtre actif connecté série avec des filtres passifs connecté parallèles :

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la Figure si dessous.

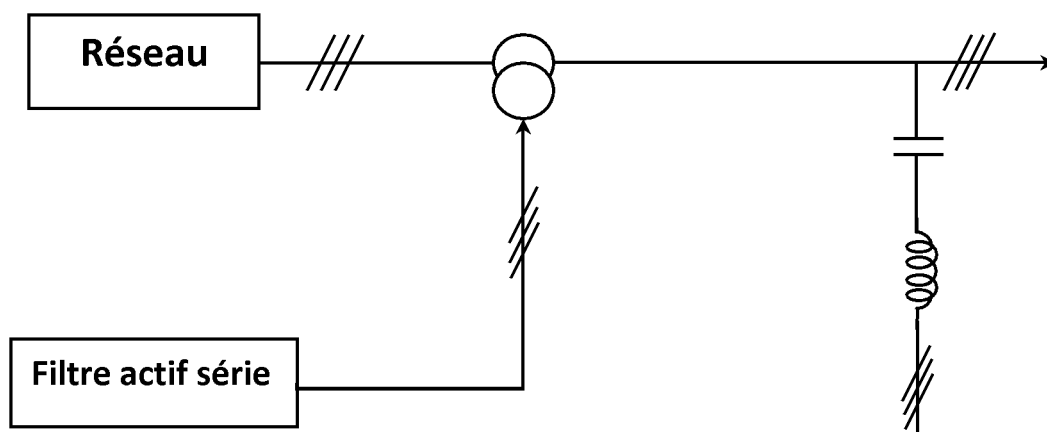


Figure 1.9. Combinaison filtre actif placé série avec filtre passif placé parallèle

3.3.1.4.3. Filtre actif connecté en série avec des filtres passifs placés en parallèles

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

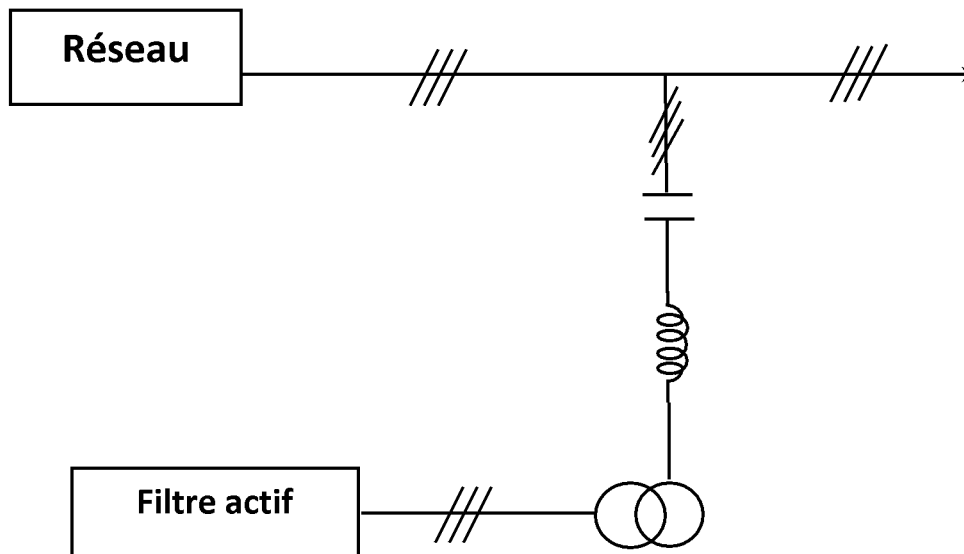


Figure 1.10. Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

3.3.1.4.3. Filtres actifs placés en parallèle avec un filtre passif placé en parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée dans la figure au dessous, est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo-convertisseur de forte puissance.

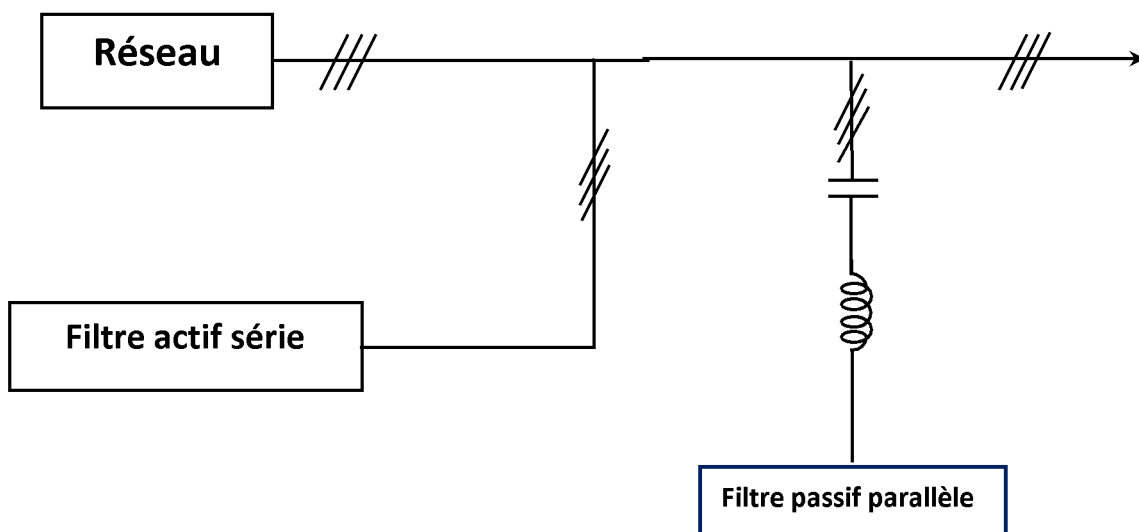


Figure 1.11. Filtres actifs placés en parallèle avec un filtre passif placé en parallèle

2.2.2. Avantages et les inconvénients des filtres actifs parallèles :

Le filtre actif parallèle peut-être une solution de filtrage économique pour la compensation d'harmonique sous les conditions suivantes :

- L'amplitude des harmoniques de courant est limitée.
- Il y a un déplacement des contraintes du facteur de puissance sous des conditions de charges légères.
- Si les interactions avec le filtre passif sont un problème (ce qui est généralement le cas pour les charges de puissances moyennes et faibles) sinon le filtre passif est plus approprié.
- Pour les charges industrielles de puissances apparentes faibles et moyennes, où les efforts de développement et les coûts d'installation sont une très grosse part des coûts globaux du système final.

Les avantages des filtres actifs parallèles sont les suivants :

- Ils peuvent être installés avec des coûts de développement et d'installation minimaux et sont très bien adaptés aux charges industrielles de puissances apparentes faibles à moyennes.
- Ils ne créent aucun problème de déplacement du facteur de puissance.
- Ils ne nécessitent pas de condensateurs de découplage à la sortie de l'onduleur.
- Plusieurs filtres peuvent être utilisés pour augmenter les capacités de charge.
- Les filtres actifs parallèles ne nécessitent pas d'appareil de protection coûteux.

Les principaux défauts des filtres actifs parallèles sont :

- Les filtres actifs parallèles peuvent poser des problèmes pour la compensation à des niveaux de puissances élevés.
- Les onduleurs MLI génèrent des harmoniques qui peuvent circuler dans des filtres passifs qui seraient connectés au système.
- il répond principalement à la problématique des harmoniques de courant qui est la plus cruciale actuellement, tout en restant simple à mettre en œuvre et offre de très bonnes performances.

En effet le FAP est au centre des recherches des deux dernières décennies sur le filtrage actif et les références traitant de FAP sont extrêmement nombreuses, en particulier sur les sources telles que les revues IEEE et sa publication dédiée à l'électronique industrielle.

Il est également évolutif et permet d'implémenter de nouvelles stratégies à partir de la même structure matérielle [7].

Conclusion

Dans ce chapitre, il a été présenté les sources et les effets de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique ainsi que le critère sur lequel ces harmoniques sont quantifiées.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries, et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbations susceptibles d'apparaître dans un réseau électrique. En effet, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

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

Le filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

La combinaison parallèle-série actifs est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

A la fin de ce chapitre, les avantages et les inconvénients du filtre actif parallèle sont tirés. Dans la suite, il sera exposé la manière d'éliminer les harmoniques en courant en utilisant les filtres actifs parallèles.

CHAPITRE II

Modélisation et commande du FAP

Introduction

L'étude par simulation d'un système quelconque passe par sa modélisation. Dans ce chapitre nous aborderons la modélisation des différentes parties du système global :

- Du réseau électrique.
- Du filtre actif parallèle à hystérésis.

Les perturbations périodiques régulières sont désignées comme des perturbations harmoniques. L'étude de ces signaux se ramène à l'analyse d'une série d'harmoniques ou à une décomposition en série de Fourier. Cette étude aboutit à une décomposition harmonique avec le plus souvent une représentation spectrale en fréquence, une détermination des valeurs efficaces et des taux de distorsion aussi bien en courant qu'en tension et une évaluation des puissances transitées en présence d'harmoniques, ce qui nous amène à faire un rappel général sur les notions des séries de Fourier.

1. principe de fonctionnement d'un filtre actif

Le rôle de la commande est la génération de courants harmoniques produits par le filtre actif afin qu'ils suivent en temps réel leurs références harmoniques. Dans un premier temps, il faut donc déterminer ces courants harmoniques de référence. L'objectif est de compenser l'ensemble des harmoniques de courant générés par la charge non linéaire [03].

La figure.2.1 présente le système global à étudier, constitué du réseau d'alimentation, de la charge polluante et du filtre actif parallèle.

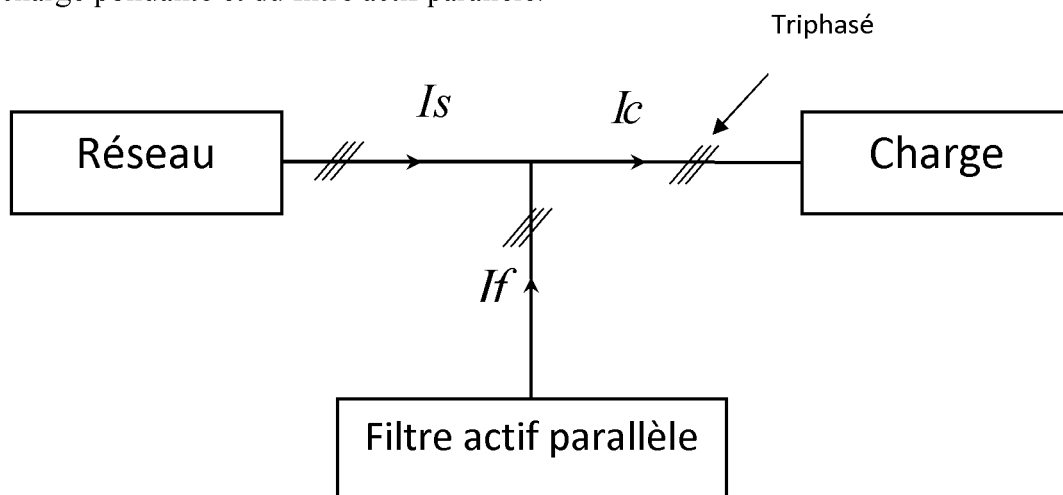


Figure 2.1. Filtre actif parallèle

Le filtre actif réalise trois tâches distinctes à savoir:

- la détermination des courants harmoniques de la charge polluante,
- la commande de l'onduleur du filtre actif pour réaliser la poursuite des références de courant,
- la régulation de la tension aux bornes de la source de tension continue.

1.1. Modélisation du système globale

Pour commencer l'explication de fonctionnement d'un filtre actif parallèle on va commencer par présenter la structure générale d'un filtre actif placé sur une source triphasé pour éliminer les courants harmoniques d'une charge électrique [07].

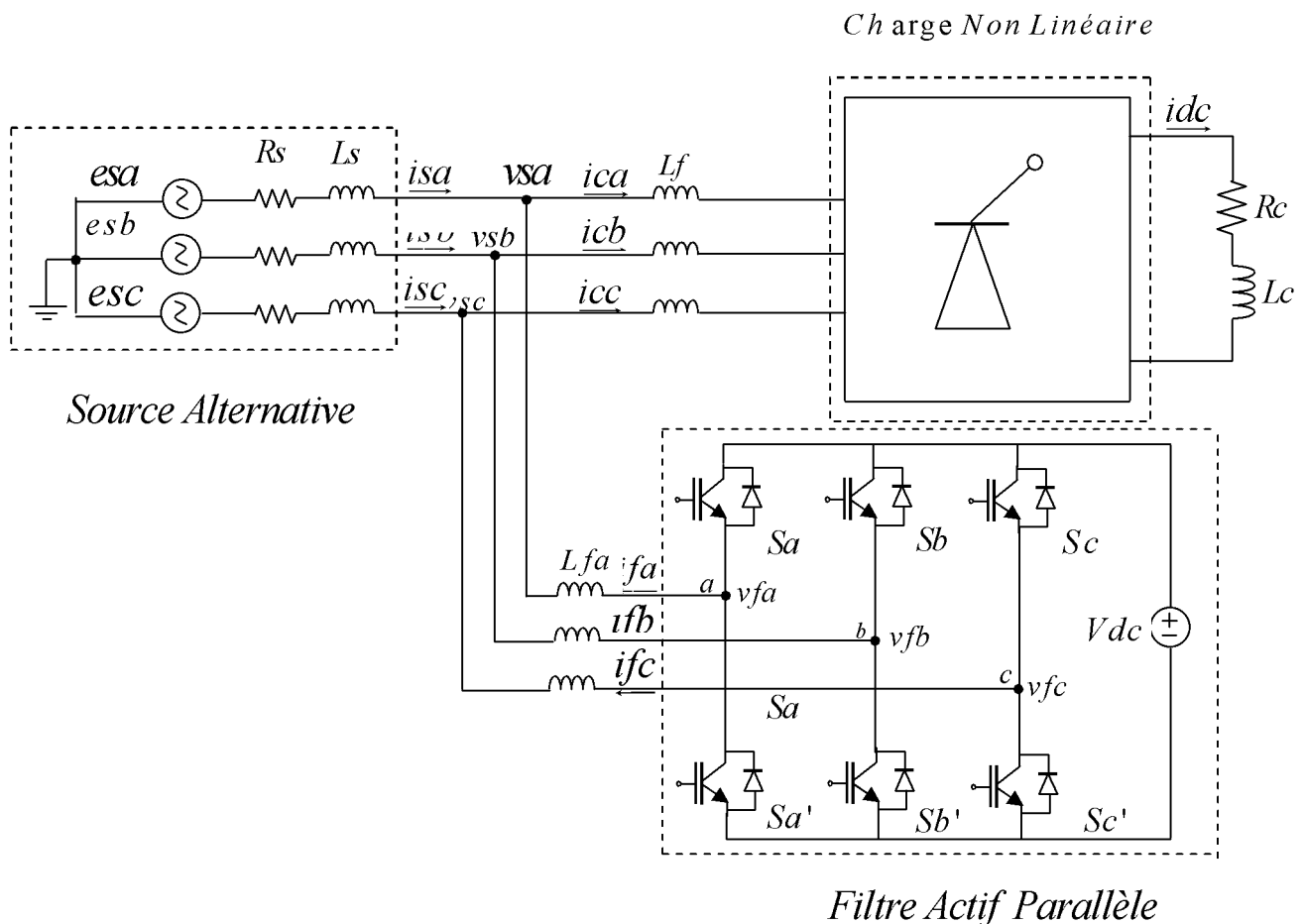


Figure 2.2. Circuit de puissance du filtre actif parallèle à deux niveaux proposé.

1.1.1. Modélisation du réseau

Le réseau triphasé équilibré est constitué de trois phases de tensions sinusoïdales de même fréquence où chaque phase est une $f.e.m(e_{si}, i = a, b, c)$ en série avec une impédance

$$Z_{cc} = R_s + jL_s\omega \quad 2.1$$

Ou :

$\omega = 2\pi f$ la fréquence fondamentale du réseau [09].

$$\text{Et } \begin{pmatrix} e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{pmatrix} = E\sqrt{2} \begin{pmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \quad 2.2$$

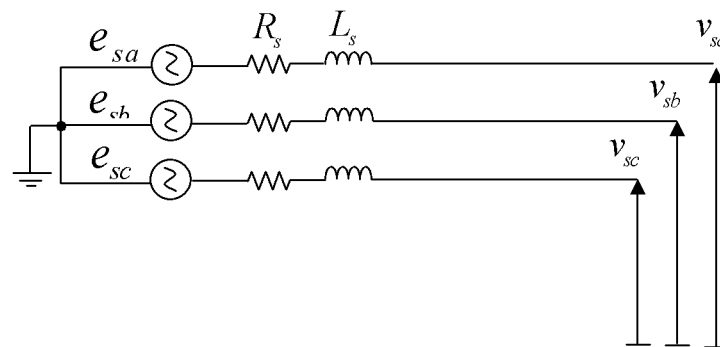


Figure 2.3. Schéma simplifié d'un réseau électrique.

1.1.2. Modélisation de l'onduleur de courant

Les filtres actifs sont soit basés sur un onduleur de tension avec un condensateur du côté continu et un filtre de raccordement inductif du côté réseau, soit sur un commutateur de courant avec une inductance du côté continu et un filtre de raccordement capacitif du côté du réseau.

Actuellement, même si l'on trouve des articles basés sur le commutateur de tension, l'onduleur de courant est généralement préféré à cause de son meilleur rendement, de son moindre coût et de son volume plus réduit (si l'on compare le condensateur et l'inductance du côté continu). Par ailleurs, les modules à *IGBT* disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de courant car en général une diode en antiparallèle est rajoutée pour chaque *IGBT*.

1.1.2.1 Structure générale

L'onduleur de courant est un dispositif électronique de puissance constitué de trois bras montés en parallèle, chaque bras est formé par la mise en série de deux interrupteurs commandés d'une façon complémentaire en ouverture-fermeture par l'injection d'impulsions de courant sur leurs gâchettes (voir figure.2.4) [08].

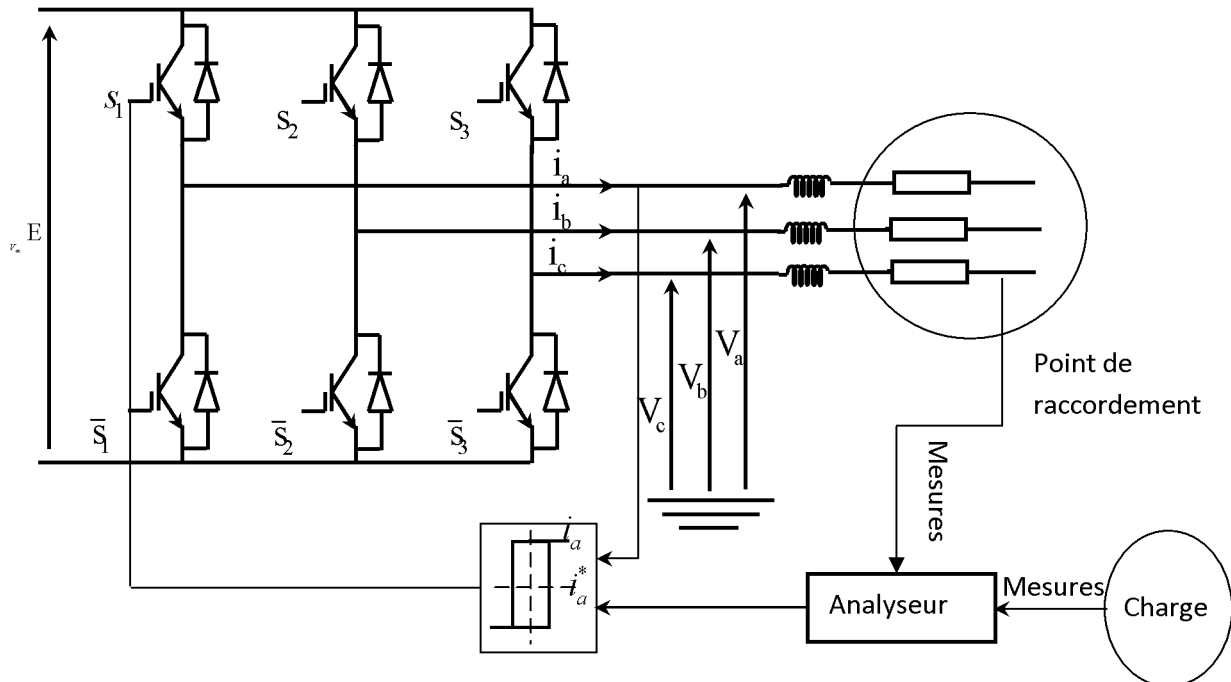


Figure 2.4 : Onduleur de courant à hystérésis.

A partir des mesures et consignes, le dispositif de traitement de signal (analyseur de Fourier) génère le courant de compensation de référence (noté par un astérisque) qui est comparé au courant mesuré et l'erreur est traduite par le bloc hystérésis par une action d'ouverture-fermeture du transistor concerné. Cela force le courant au point de raccordement ou d'injection à évoluer dans une bande plus ou moins étroite définie par le courant de référence. Cette technique de commande des courants d'onduleur par hystérésis présente l'avantage d'être relativement simple de conception et de mise en œuvre pratique néanmoins, elle est limitée par certaines contraintes comme la fréquence de commutation des interrupteurs qui est le plus souvent incontrôlable et théoriquement infinie.

Le fonctionnement d'un tel onduleur peut être résumé comme suit (pour la phase 'a'):

Soit $\Delta i_a = i_a^* - i_a$ et ΔH la moitié de largeur de la bande d'hystérésis.

Si $\Delta i_a > \Delta H$ alors, $s_1 = 1$ et $\bar{s}_1 = 0$

Si $\Delta i_a < -\Delta H$ alors, $s_1 = 0$ et $\bar{s}_1 = 1$

Si $|\Delta i_a| \leq \Delta H$ alors, garder l'état précédent

L'algorithme peut être généralisé pour les phases 'b' et 'c'.

L'équivalent Thevenin du circuit de la figure.2.4 est une tension triphasée en sortie de l'onduleur en série avec une impédance triphasée équilibrée représentant tout le circuit du système. La tension de sortie dépend directement des états de commutation de l'onduleur selon la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} \quad 2.3$$

Où :

$$M = \frac{E}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad 2.4$$

E : est la tension continue en entrée de l'onduleur.

Il y a lieu de noter que la largeur de la bande d'hystérésis est choisie en fonction de plusieurs paramètres entre autres la constante de temps de l'ensemble onduleur plus charge, la fréquence des courants de référence, la tension d'entrée de l'onduleur ...etc.

2. algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques [10]

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la

charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est donc nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.

Plusieurs algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence et de nombreuses techniques de commande et de régulation ont été développés depuis la mise en place des premiers filtres actifs. Selon leur champ de calcul, les algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques sont classés dans deux domaines, fréquentiel et temporel.

2.1. Domaine temporel

Les algorithmes de compensation dans le domaine temporel sont basés sur la détermination instantanée des grandeurs de compensation des courants/tensions harmoniques. Généralement, les courants de référence sont requis non seulement pour la compensation des courants harmoniques mais également pour remplacer les déficits de la puissance réactive et les fluctuations du bus continu du filtre actif. Fondamentalement, les différents schémas proposés essaient d'inclure la composante réactive afin d'éliminer les courants harmoniques et de corriger le facteur de puissance.

2.1.1. Méthode des puissances instantanées et sa variante

La méthode des puissances instantanées est une méthode temporelle. Elle a été utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en œuvre des méthodes fréquentielles telle que la méthode de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète). Cette méthode a été introduite par H. Akagi. Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, à un système diphasé (repère $\alpha\text{-}\beta$) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. Ensuite, pour déterminer les courants harmoniques de la charge, la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Dans la méthode classique des puissances instantanées [38], on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passe-bas afin de ne garder que la composante harmonique du signal.

2.2. Domaine fréquentiel

Les algorithmes appartenant à ce domaine sont basés sur l'analyse de Fourier appliquée aux grandeurs distordues (courants ou tensions) afin d'en extraire les signaux de compensation. En utilisant la transformée de Fourier, les composantes harmoniques de

compensation sont d'abord séparées du signal fondamental et sont ensuite combinées pour générer les consignes.

2.2.1. Application des SERIES de FOURIER [13]

2.2.1.1 Définition d'une série

En mathématiques, la série constitue une généralisation de la notion de somme, pour une succession infinie de termes. L'étude des séries consiste à effectuer la somme d'un nombre fini n de termes successifs, puis à observer le comportement lorsque n devient indéfiniment grand, par un calcul de limite. Un certain nombre de méthodes permettent de déterminer la nature (convergence ou non) des séries sans réaliser explicitement ces deux calculs.

Exemple : $\sum_{n=0}^{\infty} a_n = a_0 + a_1 + a_2 + \dots + a_i + \dots$ série de terme général a_n

Une série trigonométrique est une série dont le terme général est une fonction trigonométrique dont la fréquence varie selon l'indice n .

Exemple : $\sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + \dots + a_i \cos(i\omega t) + \dots$

2.2.1.2. Définition de la décomposition en série de Fourier

Dans la plupart des domaines de la physique, en électricité, optique, acoustique, thermique, mécanique, ... on a souvent affaire à des fonctions périodiques, mais de forme quelconque.

Nous allons voir que sous certaines conditions, on peut considérer ces signaux comme la superposition de fonctions périodiques simples que sont les fonctions sinus et cosinus. Le signal apparaît alors comme la somme d'une série trigonométrique appelée *série de Fourier*.

2.2.1.3. Rappels et Conditions de Dirichlet

Pour être développable en série de Fourier, une fonction $f(t)$ doit :

- être périodique, de période T , de pulsation $\omega = \frac{2\pi}{T}$, telle que $f(t+T) = f(t)$ pour tout t ,
- être définie dans un intervalle $\left] -\frac{T}{2} \quad \frac{T}{2} \right[$,
- vérifier les conditions dites de Dirichlet qui sont les suivantes :

- Ne posséder que des discontinuités de première espèce (sauts finis) c'est à dire des points τ tels que $f(\tau_-) \neq f(\tau_+)$ (valeur à droite différente de la valeur à gauche), en nombre fini dans l'intervalle de la période T .
- N'avoir qu'un nombre fini de maxima et de minima dans T .
- Partout où $f(t)$ est continue, sa dérivée $f'(t)$ doit être bornée, autrement dit il ne faut pas que $f(t)$ présente de points à tangente verticale sauf aux discontinuités.

Exemples : Les fonctions suivantes sont très couramment rencontrées dans le domaine du génie électrique et sont toutes décomposables en série de Fourier.

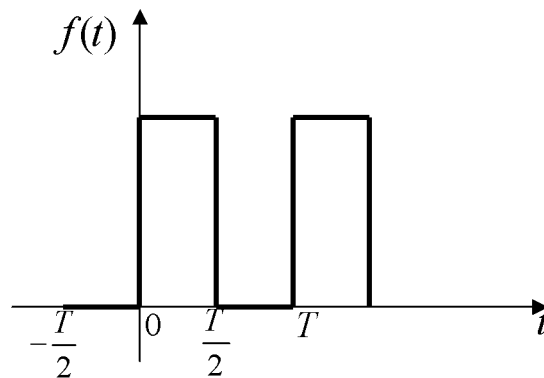


Figure 2.5. Fonction "carré" (appelée aussi "rectangle" ou "méandre")

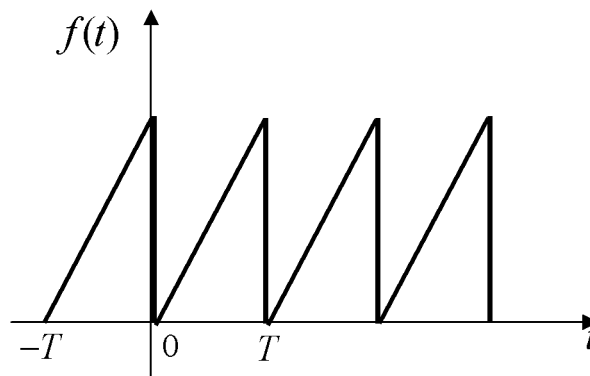


Figure 2.6. Fonction "dent de scie"

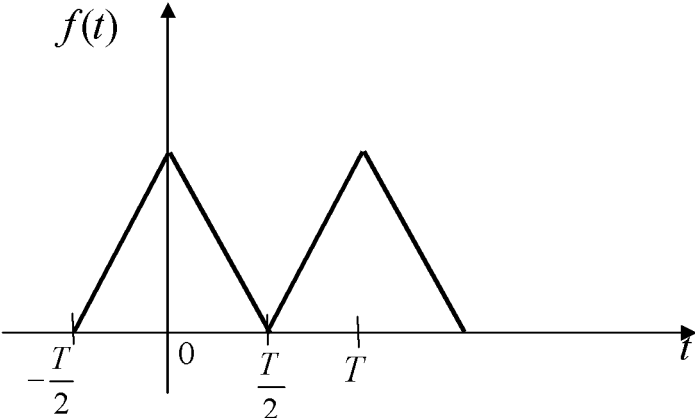


Figure 2.7 Fonction "triangle"

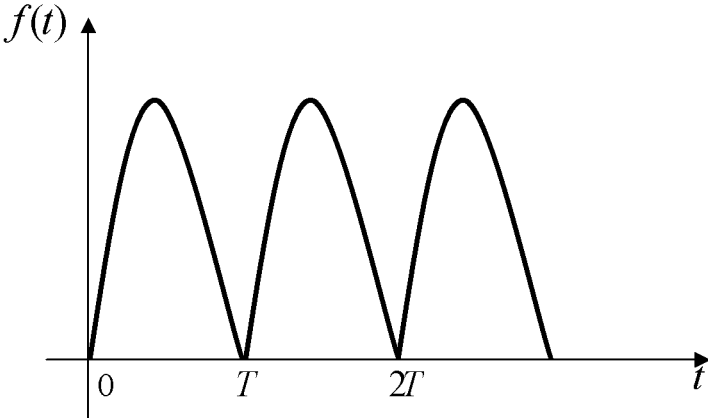


Figure 2.8. Fonction "sinusoïde redressée"

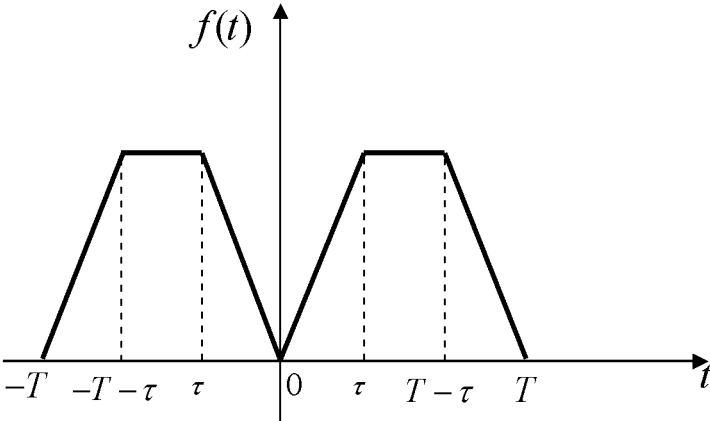


Figure 2.9. Fonction "trapèze"

Contre-exemples :

Une fonction telle que $f(t) = \frac{1}{t}$ pour $-\tau < t < \tau$, de période $T = 2\tau$, non bornée en $0 + 2k\pi$ n'est pas décomposable en série de Fourier.

Il en est de même pour la fonction $f(t) = \sin\left(\frac{1}{t}\right)$ de période T sur l'intervalle $-\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2}$. En effet cette fonction admet une infinité de maxima et de minima, de valeur ± 1 au voisinage de zéro (chaque fois que $\frac{1}{t} = (2k+1)\frac{\pi}{2}$)

2.2.1.4. Expression de la décomposition en série de Fourier

Soit une fonction périodique $f(t)$ de la variable t qui satisfait aux conditions de Dirichlet, elle est alors développable en série de Fourier, sous la forme :

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + \dots + a_n \cos(n\omega t) + \dots + b_1 \sin(\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + \dots + b_n \sin(n\omega t) + \dots$$

Où encore,

en posant $b_0 = 0$

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad 2.5$$

Où n est entier naturel et $\omega = \frac{2\pi}{T}$,

Les coefficients a_0, a_n, b_n sont des constantes réelles que l'on appelle les coefficients de Fourier. Ils représentent l'amplitude des termes successifs de la série trigonométrique.

2.2.1.5. Utilisation de la décomposition en série de Fourier

On a pu voir que les signaux périodiques que l'on rencontre en électrotechnique ne sont pas franchement sinusoïdaux : signaux issus d'un hacheur, d'un redresseur, d'un onduleur.

Faire une décomposition en série de Fourier va nous permettre de savoir de combien le signal que l'on étudie est éloigné du signal sinusoïdal : ce sera quantifié à l'aide du calcul du taux de distorsion harmonique (THD).

Par ailleurs, grâce à la décomposition en série de Fourier, une analyse spectrale du signal pourra être effectuée. Elle permettra de savoir si le dispositif étudié répond aux normes de pollution harmonique, CEM, filtrage, etc.....

On retrouve alors dans de nombreux domaines de la physique la notion de spectre fréquentiel : électricité, électronique, médecine, radar-sonar, hifi, géologie, traitement du signal ...

2.2.1.6. Expressions mathématiques

Soit une fonction $f(t)$ de la variable t , intégrable sur l'intervalle $\left] -\frac{T}{2} \quad \frac{T}{2} \right[$.

Calcul de la valeur moyenne a_0

Par définition on a :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad 2.6$$

C'est la valeur moyenne de la fonction sur l'intervalle d'une période $\left] -\frac{T}{2} \quad \frac{T}{2} \right[$

2.2.1.7. Forme algébrique de la décomposition en série de Fourier

La forme la plus couramment utilisée de la décomposition en série de Fourier d'une fonction $f(t)$ est la forme algébrique. Elle s'écrit comme suit :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad 2.7$$

Les coefficients de la série de Fourier s'évaluent selon les expressions suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad 2.8$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad 2.9$$

Remarque :

Il est important de remarquer que l'expression du coefficient a_0 n'est pas la même que celle que l'on obtiendrait en faisant $n = 0$ dans l'expression de a_n .

Pour $n = 1$:

- la fonction $(a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t))$ s'appelle le fondamental de la fonction.
- Les fonctions $(a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t))$ s'appellent les harmoniques de la fonction.
- Les intégrales sont à prendre sur une période de la fonction

On peut donc généraliser les expressions suivantes :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} f(t) dt \quad 2.10$$

$$a_n = \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad 2.11$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad 2.12$$

Dans la pratique, on choisira t_0 de manière à simplifier le calcul de l'intégrale.

2.2.1.8. Forme polaire de la décomposition en série de Fourier

Soit le développement en série de Fourier de $f(t)$:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t))$$

2.13

On peut décider d'écrire la décomposition en série de Fourier comme une somme infinie de fonction cosinus uniquement ou sinus.

A ce moment là, on doit faire intervenir des déphasages dans les fonctions trigonométriques.

Dans un premier temps, choisissons d'exprimer la décomposition en série de Fourier de $f(t)$ avec uniquement des fonctions cosinus.

$$\text{On pose alors : } \begin{cases} a_n = \rho_n \cos \varphi_n \\ b_n = \rho_n \sin \varphi_n \end{cases} \quad 2.14$$

$$\text{Ainsi : } \begin{cases} \rho^2 = a_n^2 + b_n^2 \\ \cos \varphi_n = \frac{a_n}{\rho_n} = \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \\ \sin \varphi_n = \frac{b_n}{\rho_n} = \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \\ \text{tg} \varphi_n = \frac{b_n}{a_n} \end{cases} \quad 2.15$$

φ_n est la phase de l'harmonique n

Alors :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \rho_n [\cos \varphi_n \cos(n\omega t) + \sin \varphi_n \sin(n\omega t)] = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \rho_n \cos(n\omega t - \varphi_n)$$

On écrira donc:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \rho_n \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad 2.16$$

$$\text{avec } \begin{cases} \rho_0 = a_0 \\ \varphi_0 = 0 \end{cases}$$

Si l'on décide maintenant d'exprimer la décomposition en série de Fourier de $f(t)$ avec uniquement des fonctions sinus.

$$\text{On pose alors : } \begin{cases} a_n = \rho_n \sin \psi_n \\ b_n = \rho_n \cos \psi_n \end{cases}$$

$$\text{Ainsi : } \begin{cases} \rho^2 = a_n^2 + b_n^2 \\ \cos \psi_n = \frac{b_n}{\rho_n} = \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \\ \sin \psi_n = \frac{a_n}{\rho_n} = \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \\ \text{tg} \psi_n = \frac{b_n}{a_n} \end{cases} \quad 2.17$$

ψ_n est la phase de l'harmonique n

Alors :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \rho_n \left[\sin \psi_n \cos(n\omega t) + \cos \psi_n \sin(n\omega t) \right] = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \rho_n \sin(n\omega t - \psi_n)$$

On écrira donc:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \rho_n \sin(n\omega t - \psi_n) \quad 2.18$$

Remarque

Cette forme d'écriture de la série de Fourier, qui fait apparaître l'amplitude et la phase de l'harmonique de rang n est très utilisée en physique.

2.2.2. Autre méthodes d'identification des harmoniques

Domaine Fréquentiel :

- Algorithmes de la FFT
- Technique de la multiplication sinusoidale
- Technique des séries de Fourier modifiées

Domaine temporel :

- Algorithme du référentiel synchrone
- Algorithme de détection du maximum
- Algorithme de la séquence positive du fondamental
- Algorithme du filtre coupe-bande (notch filter)

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord étudié le filtre actif shunt à hystérésis et à structure courants, connecté en parallèle sur le réseau afin d'injecter les courants permettant d'éliminer la pollution harmonique des charges non linéaires et en explicitant aussi le fonctionnement de base de la méthode de contrôle par hystérésis.

Ensuite, nous avons abordé toutes les notions sur les séries de Fourier qui permettent de réaliser le dispositif de traitement de signal et qui est l'une des méthodes utilisée pour l'identification des courants harmoniques.

CHAPITRE III

Application à la réduction des harmoniques

Introduction

Dans ce chapitre, la méthode d'analyse utilisant les séries de Fourier sera appliquée à une charge polluante en présence d'un filtre actif parallèle. L'intérêt de ce dernier est de faire en sorte que la source génère un courant quasi sinusoïdal (un faible THD et un THDI négligeable) et ce en compensant le contenu harmonique du courant de la charge par un courant délivré par l'onduleur constituant le filtre actif.

1. Simulation

Pour tester le fonctionnement du filtre actif utilisant la méthode d'analyse spectrale basée sur les séries de Fourier, un programme Matlab script a été élaboré. Le programme implémente la méthode de Simpson pour approcher les intégrales et la méthode de Range-Kutta pour intégrer les équations différentielles ordinaires.

1.1. Situation normale

La figure ci-dessous représente le courant de la charge polluante à la fréquence fondamentale de 50 Hz équivalent à un cycle réseau de 20 ms .

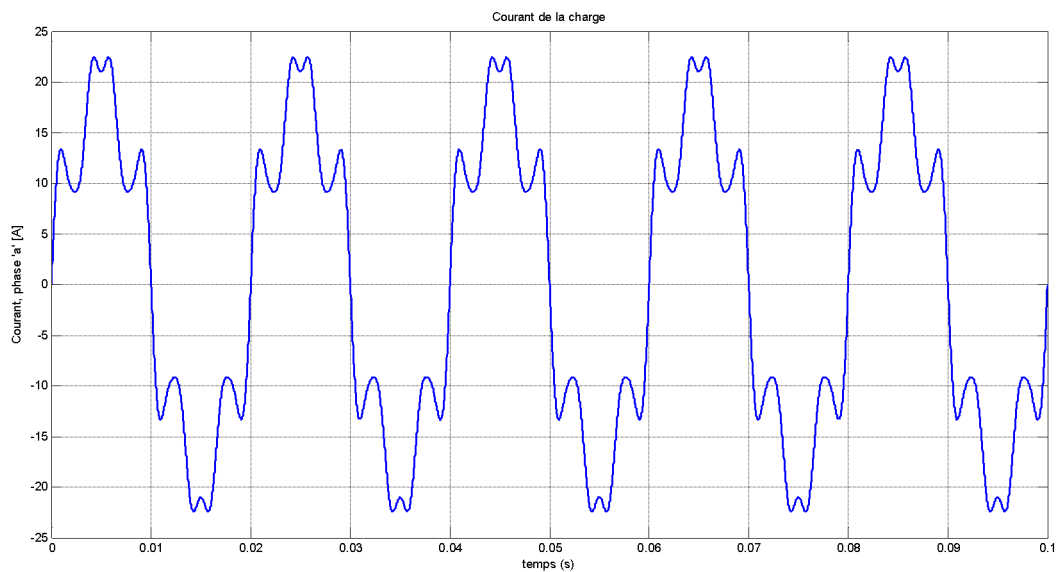


Figure 3.1 : Courant de charge.

Ce courant est supposé périodique avec un cycle réseau représenté à la figure suivante :

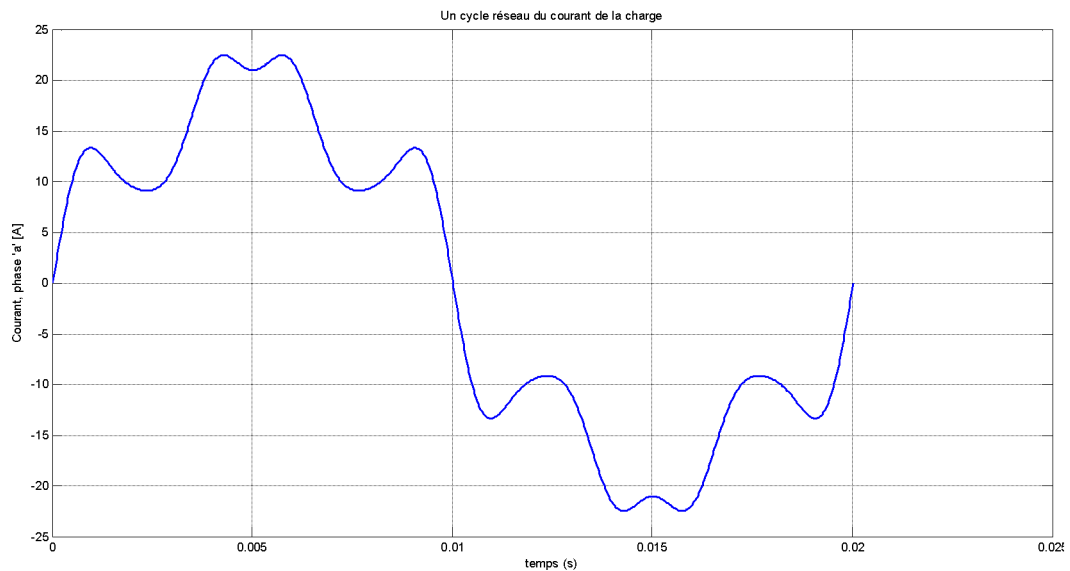


Figure 3.2 : Courant de charge (un cycle réseau).

L'analyse spectrale est donnée à la figure 3.3.

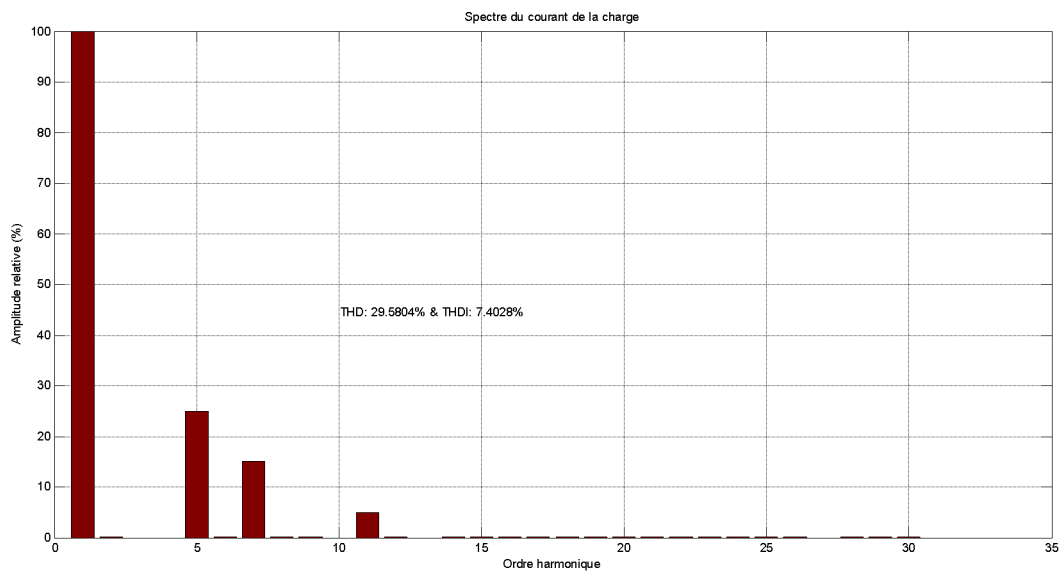


Figure 3.3 : Spectre du courant de la charge

Il est clair que le courant de charge est constitué d'un fondamental et de trois harmoniques de rangs respectifs : 5, 7 et 11 et d'amplitudes relatives respectives : 25%, 15% et 5%.

A noter aussi que le courant est très distordu avec un THD de 29% et un THDI de 7% qui sont des valeurs hors normes.

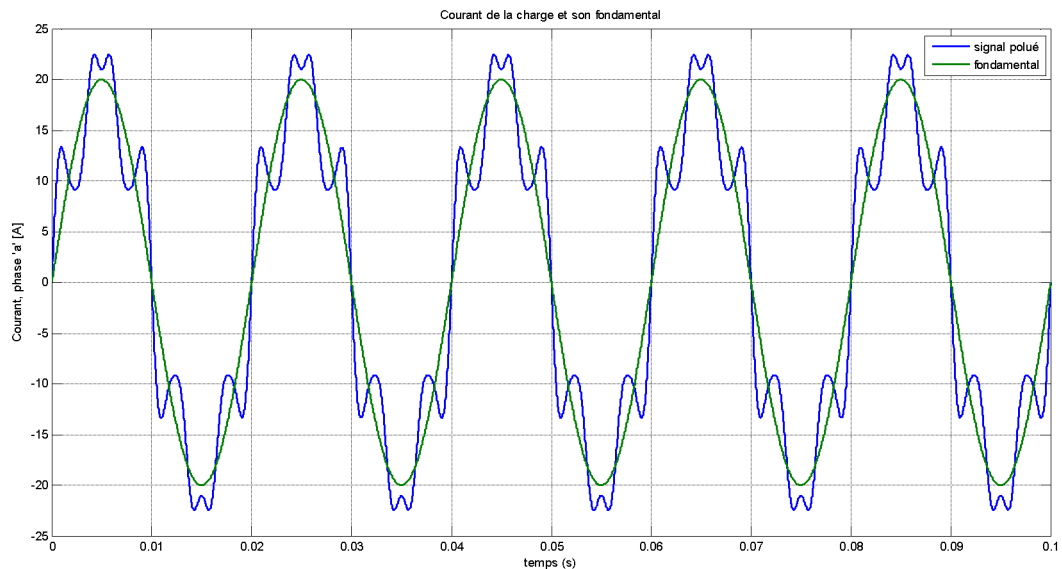


Figure 3.4 : Courant de la charge et onde fondamentale.

La figure 3.4 montre que l'onde fondamentale a pour amplitude 20 A. cela signifie que les amplitudes des trois harmoniques sont respectivement : 5 A, 3 A et 1 A. D'où le contenu harmonique du courant de la charge sur un cycle réseau représenté à la figure 3.5. Ce courant constitue l'entrée de référence du système de commande de l'onduleur.

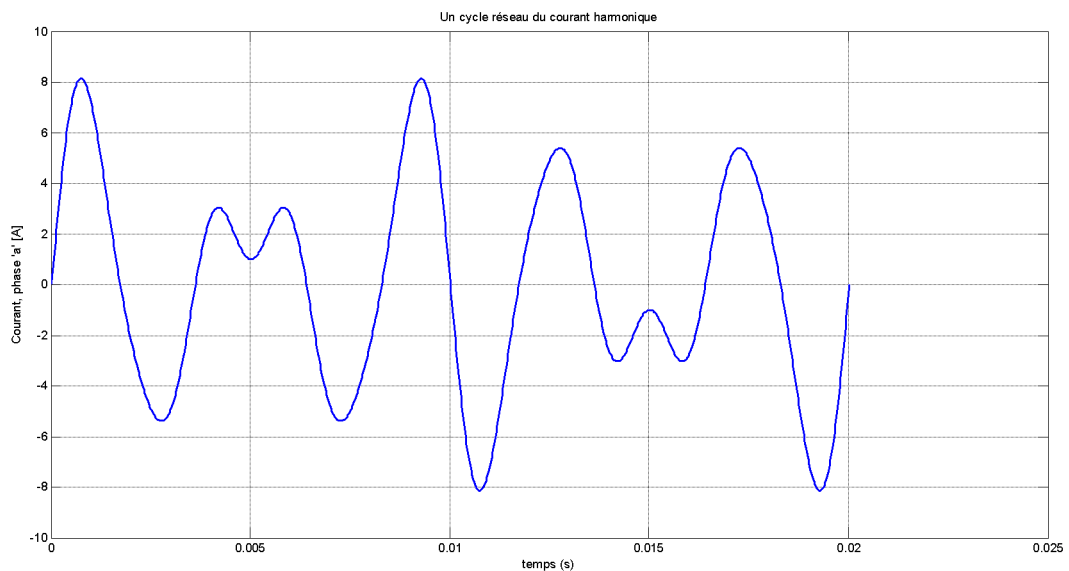


Figure 3.5 : Un cycle réseau du courant harmonique.

Le courant harmonique précédent est généré par le filtre et injecté au point de raccordement pour compenser le courant de la charge. La technique de commande des courants par hystérésis a donné un courant de sortie de l'onduleur très proche du courant de consigne précédent, tel qu'il est représenté à la figure 3.6

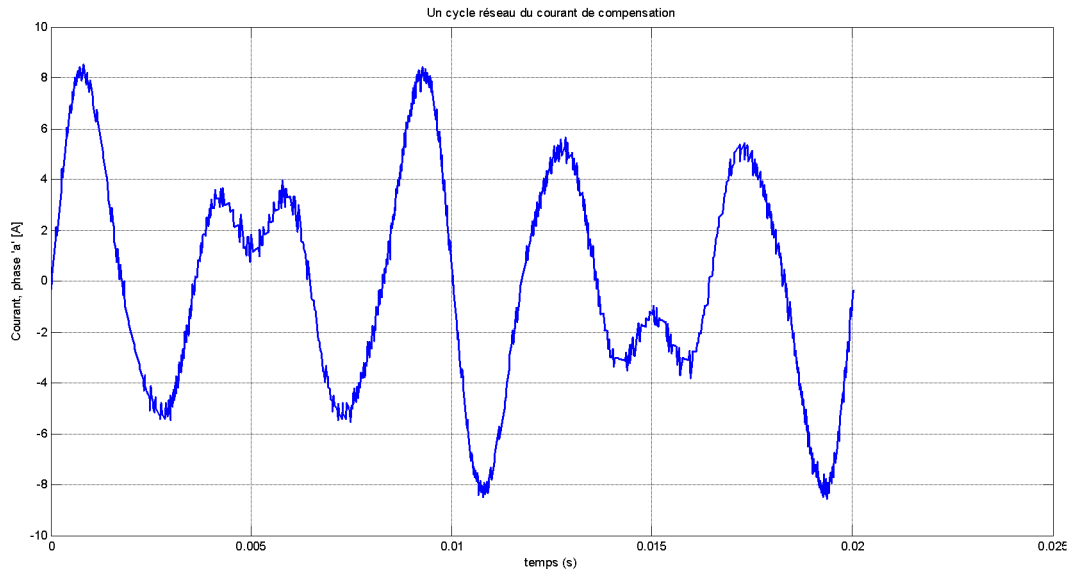


Figure 3.6 : Un cycle réseau du courant de compensation.

L'injection du courant de compensation impose à la source de contribuer à l'alimentation de la charge par un courant quasi sinusoïdal, ce qui se justifie par les figures 3.7 et 3.8. En effet, le THD vaut maintenant 2% et le THDI 0.2%.

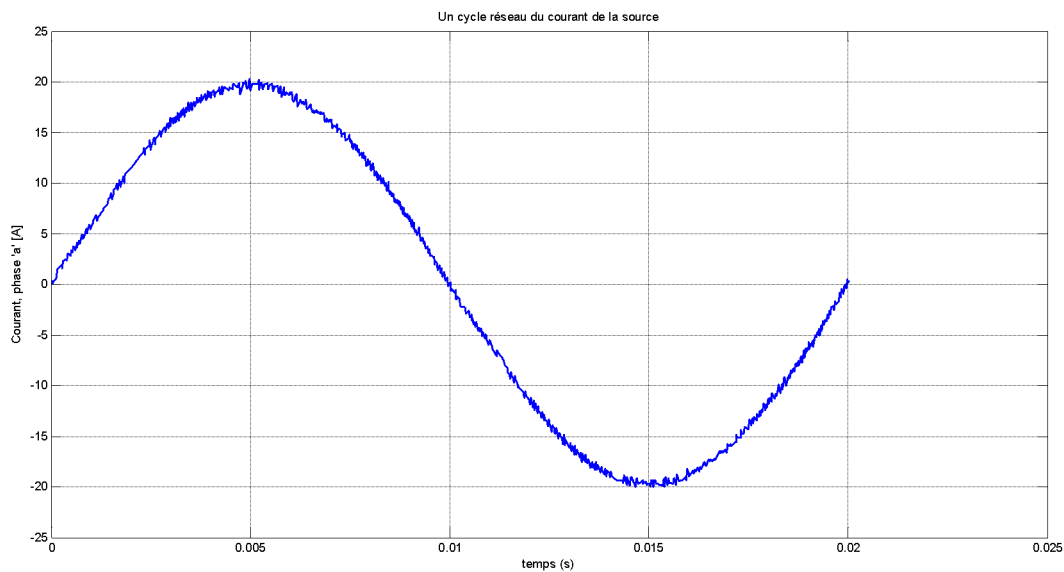


Figure 3.7 : Un cycle réseau du courant de la source

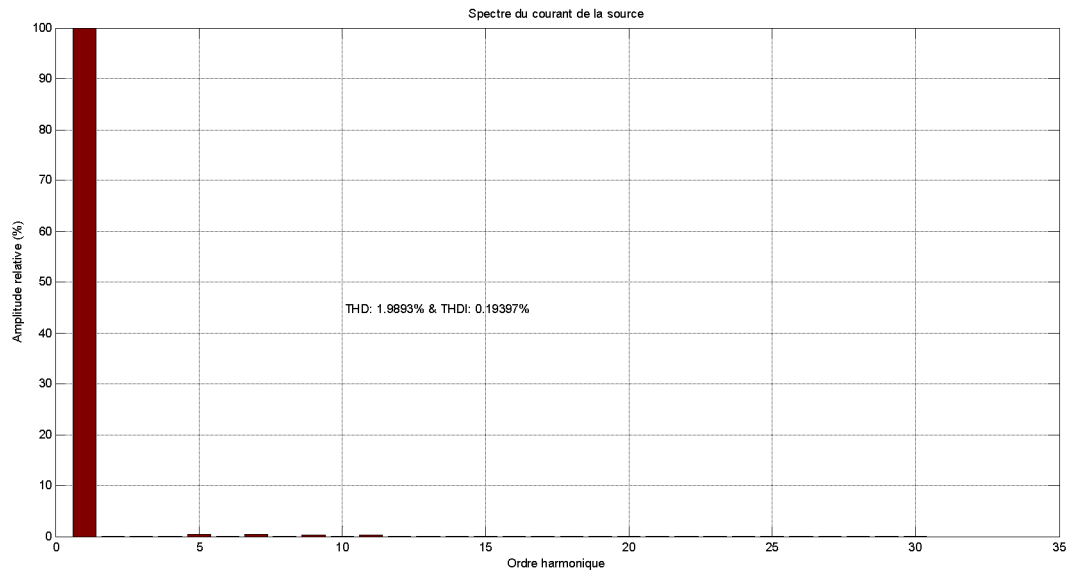


Figure 3.8 : Spectre du courant de la source.

1.2. Situation perturbée (chute de tension à l'entrée de l'onduleur) :

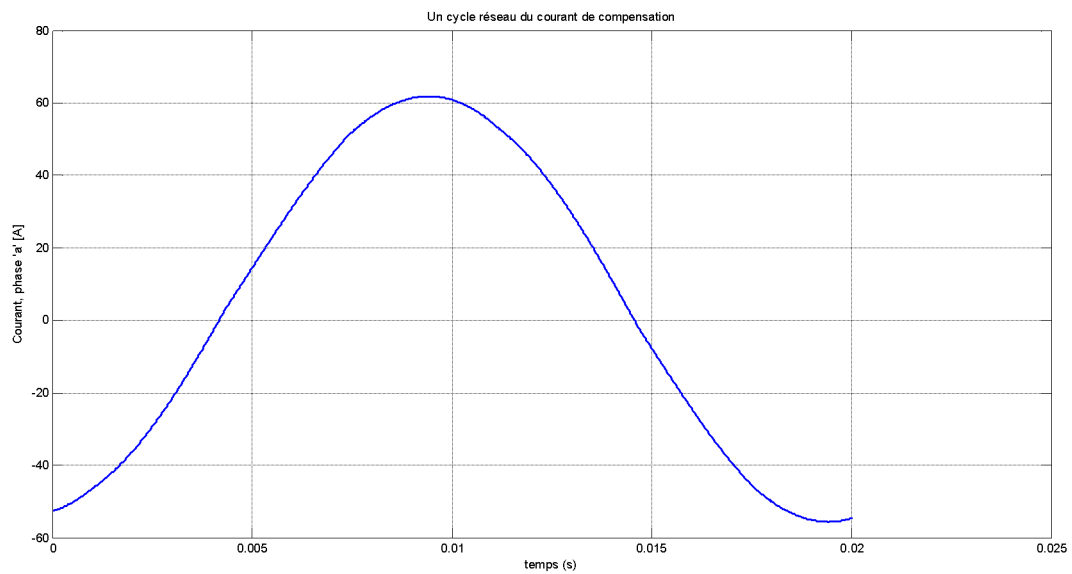


Figure 3.9 : Un cycle réseau du courant de compensation.

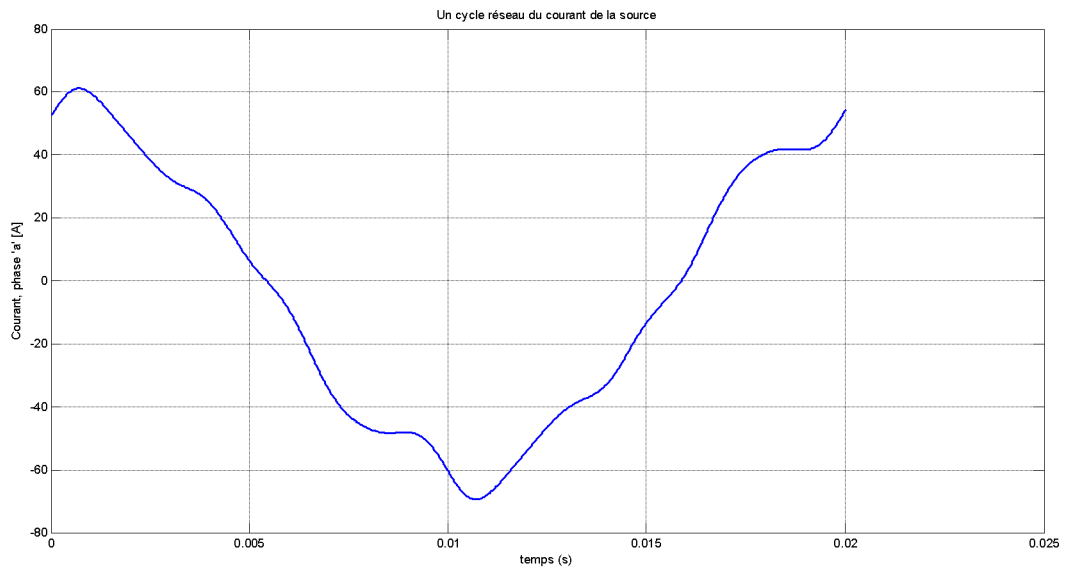


Figure 3.10 : Un cycle réseau du courant de la source

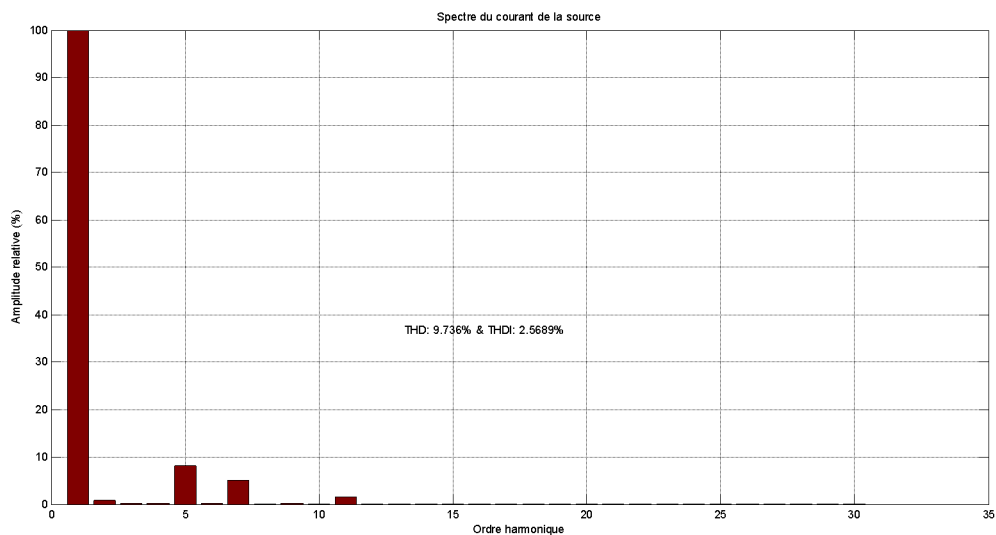


Figure 3.11 : Spectre du courant de la source.

D'après ce qui précède, il est correct de dire que le filtre actif parallèle utilisant un onduleur de courant commandé par hystérésis, a permis de satisfaire la charge tout en ramenant la pollution harmonique dans les normes. De plus, il a empêché la pollution de se propager dans le réseau amont car le courant de compensation a été injecté là où la charge en avait besoin.

En situation perturbée, le filtre actif a pu maintenir son fonctionnement en dépit de la chute de tension néanmoins, il n'était pas capable de ramener la distorsion dans les normes. D'où la nécessité de doter les filtres actifs parallèles de dispositif de régulation de tension d'entrée.

Conclusion :

Au cours du présent chapitre, il a été illustré, à travers les résultats de simulation numérique, la procédure de fonctionnement d'un filtre actif parallèle. Ce dernier a été commandé par la technique à hystérésis pour réaliser sa fonction de base qui est la compensation des harmoniques de courant et la réduction, par conséquent, de la distorsion du courant de la source d'alimentation. Afin de conserver ses qualités de filtrage, un filtre actif doit être alimenté par une source continue stabilisée.

CONCLUSION GENERALE

Du fait de la profusion des charges non linéaires, la distorsion harmonique des réseaux est un phénomène dont l'amplitude est croissante. Ses effets ne peuvent être négligés, car la quasi-totalité des composants du réseau en est en pratique affectée. La solution la plus couramment mise en œuvre jusqu'à ce jour a été le filtrage passif. A cette solution lourde et non exempte de risque, il est aujourd'hui proposé une alternative forte séduisante : l'utilisation de compensateurs actifs. Ces dispositifs utilisent une structure de type convertisseur statique de puissance. Ainsi, grâce aux progrès des semi-conducteurs, les convertisseurs, qui sont habituellement des pollueurs harmoniques, sont capables d'être des dépollueurs efficaces et auto-adaptatifs.

Le compensateur actif « shunt », souple d'emploi, auto-adaptatif et qui ne nécessite pratiquement pas d'études préalables à la mise en service, est la solution pour la dépollution au niveau d'une charge non linéaire ou d'un tableau de distribution BT. Il faut noter qu'il ne s'oppose pas nécessairement aux filtres passifs auxquels il peut s'associer avec intérêt.

Le travail présenté dans ce projet de fin d'étude apporte une synthèse des filtres actifs de puissances, principaux palliatifs aux problèmes engendrés par la pollution harmonique dans les réseaux de distribution. Une application du filtrage actif de puissance a été traitée, c'est un filtre actif parallèle alimenté par une source de tension continue dont les ordres de commutation ont été envoyés par un onduleur à hystérésis et à deux niveaux, dont les courants harmoniques de référence ont été détectés par un analyseur (outil de traitement des courants).

Les résultats obtenus dans ce travail nous permettent de tester l'efficacité du filtre actif parallèle de puissance. En fait la distorsion d'harmonique quantifiée par les deux critères THD et THDI a été réduite après mise en marche du filtre actif.

Pour le bon fonctionnement du filtre actif il faut que la tension d'alimentation de ce dernier doit être maintenue. La tension d'alimentation du filtre actif est affectée par deux types de perturbations ; continue, et harmonique. La régulation de cette tension est nécessaire. Comme solution on peut proposer : le régulateur PI. Un régulateur PI classique ne permet pas d'avoir à la fois, un bon réglage des fluctuations de tensions et un bon filtrage des harmoniques de tension.

Afin d'améliorer les performances de réglage de la tension d'alimentation du filtre actif parallèle, un régulateur PI adaptatif sera une solution très efficace. Ce régulateur (grâce

Conclusion générale

à l'adaptation de ses paramètres), peut agir efficacement contre les fluctuations de tension, et contre les ondulations de tension.

Les filtres actifs parallèles peuvent poser des problèmes pour la compensation à des niveaux de puissances élevés (haute tension) en générant des perturbations qui deviennent de plus en plus importantes. Comme nous avons réalisé notre projet tout en travaillant en basse tension l'effet des harmoniques du FAP lui-même sont négligeable, elles se résument juste a de petites valeurs.

Références bibliographiques

- [01] S.A.Tadger, « étude d'un système de compensation d'harmoniques en utilisant un générateur photovoltaïque GPV ». Mémoire de magistère université de boumerdés, 2008.
- [02] S.Beaulieu, « étude et mise en point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique ». Mémoire présenté à l'université de Québec à Chicoutimi comme exigence partielle et la maîtrise en ingénierie, Mai 2007.
- [03] M. A. E. Alali, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension ». Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur Strasbourg I, France, (2002).
- [04] G.Seguir, « les convertisseurs de l'électronique de puissance ». tome1 Lavoisier 1984.
- [05] E. Bettega, J-N. Fiorina, « Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs ». Cahier Technique Schneider Electric.
- [06] H. Sasaki, T.Machida, « A new method to eliminate AC harmonic currents by magnetic compensation-consideration on basic design ». IEEEtrans. PAS, vol.90, pp.2009, no .5, 1975.
- [07] A.ABOUBOU, S.E.ZOUZOU, « contribution à la compensation de la pollution harmonique en utilisant un filtre actif parallèle commandé par logique floue ». Courrier du Savoir – N°03, pp. 59-63, Janvier(2003).
- [08] M.M.Abdusalam, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales ». Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, France, (2008).
- [09] B. Tarak, « commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome ». Thèse de magister de l'école militaire polytechnique, 20 janvier 2004.
- [10] H.Djeghloud, « filtrage actif de puissance ». Thèse de doctorat de l'université mentouri Constantine, 12 décembre 2007.
- [11] M. Damien Flieller, « Etude de stratégies de commande d'un filtre actif de type parallèle en vue d'assurer la compensation des harmoniques et du déséquilibre ». Mémoire de projet de fin d'études du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Instrumentation Université Catholique de Louvain, Belgique, (2006).

- [12] A.Morsli, A.Tlemcani, M.S.Boucherit et N. Ould Cherchali, « dépollution des réseaux électriques basse tension utilisant un filtre actif parallèle deux niveaux contrôlé par l'algorithme P-Q ». Mediamira Science Publisher, volume 53, nombre 2, (2012).
- [13] A. Porebski, « théorie de signal ». École d'Ingénieurs du Pas-de-Calais (E.I.P.C.), Année 2009-2010.
- [14] H. Akagi, Y. Kanazawa, A Nabae, « Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising switching Devices without Energy Storage Components », IEEE Trans. Vol. IA-20, N°3 1984.
- [15] H. Akagi, Y. Kanazawa, A Nabae, « Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits », Proceeding 1983 International power electronics conference. Tokyo, Japan, PP. 1375-1386, 1983.
- [16] Tsengenes Georgios, Adamidis Georgios, « Shunt Active Power Filter Control Using Fuzzy Logic Controllers ». Democritus University of Thrace, Department of Electrical and Computer Engineering, Xanthi, Greece, 2011 IEEE.
- [17] S. Ramirez, N. Visairo, M. Oliver, C. Nuiiez, V. Ckdenas, H. Sira-Ramirez , « Harmonic Compensation in the AC Mains by the Use of Current and Voltage Active Filters Controlled by a Passivity-Based Law », CENIDET, ITESRC, UASLP CIEP, Universidad de LOS Andes, 2000 IEEE.
- [18] Marcos Pereira, Georg Wild, Hartmut Huang and Kadry Sadek, « Active Filters in HVDC Systems: Actual Concepts and Application Experience ». 2002 IEEE.
- [19] HIROFUMI AKAGI, « Active Harmonic Filters ». VOL. 93, NO. 12, DECEMBER 2005 IEEE.

ANNEXES

ANNEXE A

Méthodes des puissances instantanées [12]

Puissances instantanées active et réactive

Cette méthode d'identification des courants harmoniques, plus simple, consiste à éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées ce qui est relativement facile à réaliser. On exploite la transformation de Concordia pour obtenir les puissances active et réactive et nécessite de tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale. On note respectivement les vecteurs des tensions simples au point de raccordement $[v_s]$ et des courants de charge $[i_c]$ d'un système triphasé et équilibré par :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \text{ Et } [i_c] = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix}$$

La transformation des valeurs triphasées instantanées de la tension et du courant dans le repère des coordonnées $\alpha - \beta$ est donnée par les expressions suivantes:

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}$$

Et pour les courants :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix}$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement p et q , sont définies par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix}$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés, on obtient :

$$p = v_{s\alpha} i_{c\alpha} + v_{s\beta} i_{s\beta} = v_{s\alpha} i_{ca} + v_{s\beta} i_{cb} + v_{sc} i_{cc}$$

De même, pour la puissance imaginaire on a :

$$q = v_{s\alpha} i_{c\beta} - v_{s\beta} i_{s\alpha} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[(v_{sa} - v_{sb}) i_{cc} + (v_{sb} - v_{sc}) i_{ca} + (v_{sc} - v_{sa}) i_{cb} \right]$$

A partir de l'équation (4), en posant :

$$\Delta = v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2$$

On a :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \right\}$$

Ou alors :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{c\alpha p} \\ i_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{c\alpha q} \\ i_{c\beta q} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$i_{c\alpha p} = \frac{v_{s\alpha}}{\Delta} p \quad i_{c\alpha q} = -\frac{v_{s\beta}}{\Delta} q$$

$$i_{c\beta p} = \frac{v_{s\beta}}{\Delta} p \quad i_{c\beta q} = \frac{v_{s\alpha}}{\Delta} q$$

Les puissances instantanées selon les axes α et β peuvent s'écrire :

$$\begin{bmatrix} p_{\alpha} \\ p_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} i_{s\alpha} \\ v_{s\beta} i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} i_{c\alpha p} \\ v_{s\beta} i_{c\beta q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{s\alpha} i_{c\alpha q} \\ v_{s\beta} i_{c\beta p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{\alpha p} \\ p_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{\alpha q} \\ p_{\beta q} \end{bmatrix}$$

$$p_{\alpha p} = \frac{v_{s\alpha}^2}{\Delta} p \quad p_{\alpha q} = -\frac{v_{s\alpha} v_{s\beta}}{\Delta} q$$

$$p_{\beta p} = \frac{v_{s\beta}^2}{\Delta} p \quad p_{\beta q} = \frac{v_{s\alpha} v_{s\beta}}{\Delta} q$$

$p_{\alpha p}$: Puissance instantanée selon l'axe α

$p_{\beta p}$: Puissance instantanée selon l'axe β

$p_{\alpha q}$: Puissance instantanée selon l'axe α

Annexes

$P_{\beta q}$: Puissance instantanée selon l'axe β

D'après les expressions (12), on peut écrire :

$$P = P_{\alpha p} + P_{\beta p} + P_{\alpha q} + P_{\beta q} = P_{\alpha p} + P_{\beta p}$$

L'analyse de l'équation (13) nous ramène aux conclusions suivantes :

La somme des puissances instantanées $P_{\alpha p}$ et $P_{\beta p}$ coïncide avec la puissance instantanée dans un circuit triphasé.

La puissance réactive correspond à la partie de la puissance instantanée qui dépend de q . Ces puissances $P_{\alpha q}$ et $P_{\beta q}$ s'annulent entre elles et elles n'apportent aucune contribution au transfert de puissance instantanées entre la source et la charge.

Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimente une charge non linéaire, les puissances instantanées p et q ont pour expression :

$$p = \bar{p} + \tilde{p}$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}$$

Avec :

\bar{p} : Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant.

\bar{q} : Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant.

\tilde{p} et \tilde{q} : puissance alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

En considérant les équations (8) et (14), nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha - \beta)$ en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques. Ceci conduit

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\nabla} \underbrace{\begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix}}_{\text{courant actif}} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\nabla} \underbrace{\begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\nabla} \underbrace{\begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}$$

Il est évident, d'après l'équation (15), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelle et imaginaire doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux méthodes de filtrage illustré sur la figure si dessous :

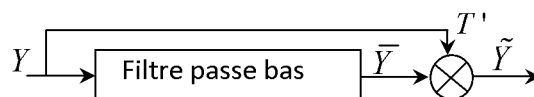


Fig.2.1. Schéma de principe du filtre utilisé pour l'extraction des composantes alternatives de P et Q

Les courants harmoniques triphasés i_{hk}^* ($k = a, b, c$) sont obtenus à partir des courants diphasés i_{ha}^* et i_{hb}^* par la transformation inverse de Concordia soit :

$$\begin{bmatrix} i_{ha}^* \\ i_{hb}^* \\ i_{hc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ha}^* \\ i_{hb}^* \end{bmatrix}$$

Si V et I_a représentent respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamentale et Φ_a , le déphasage entre eux, alors on peut écrire :

$$\begin{cases} \bar{p} = 3VI_{ca} \cos \Phi_a \\ \bar{q} = -3VI_{ca} \sin \Phi_a \end{cases}$$

Les termes \bar{p} et \bar{q} sont respectivement équivalents à la puissance active conventionnelle et à la puissance réactive conventionnelle.

De cette manière, éliminer les courants harmoniques revient à compenser les composantes alternatives \tilde{p} et \tilde{q} . La suppression des courants réactifs revient à compenser la composante continue \bar{q} .

ANNEXE B

Méthode Simpson

On veut estimer $\int_a^b f(x) dx$ à l'aide de cette méthode numérique. On commence par subdiviser l'intervalle $[a, b]$ en un nombre pair n de sous intervalles.

Posez $h = \frac{b-a}{n}$ et considérez les points $x_0 = a$ $x_1 = a + h$ $x_2 = a + 2h$ $x_n = a + nh = b$ la formule de Simpson dit que :

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + 4f(x_3) + 2f(x_4) + \dots + 4f(x_{n-1}) + f(x_n)]$$

ANNEXE C

Méthode de range KUTTA

Considérons une équation différentielle du premier ordre :

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

La méthode RK4 utilise **plusieurs points intermédiaires** pour calculer la valeur de y_{i+1} à partir de la valeur de y_i :

On considère un point intermédiaire A d'abscisse $x_i + h/2$ dont la valeur de l'ordonnée est donnée par :

$$y_{iA} = y_i + \left(\frac{dy}{dx}\right)_i \times \frac{h}{2} \text{ soit } y_{iA} - y_i = \left(\frac{dy}{dx}\right)_i \times \frac{h}{2} = \frac{k_1}{2}$$

Puis un point B d'ordonnée :

$$y_{iB} = y_i + \left(\frac{dy}{dx}\right)_{iA} \times \frac{h}{2} \text{ soit } y_{iB} - y_i = \left(\frac{dy}{dx}\right)_{iA} \times \frac{h}{2} = \frac{k_2}{2}$$

On calcule alors l'ordonnée d'un point C d'abscisse $x_i + h$ à l'aide de la relation :

$$y_{iC} = y_i + \left(\frac{dy}{dx}\right)_{iB} \times h \text{ soit } y_{iC} - y_i = \left(\frac{dy}{dx}\right)_{iB} \times h = k_3$$

Soit $\left(\frac{dy}{dx}\right)_{iC}$ la valeur de $\left(\frac{dy}{dx}\right)$ au point C .

On pose : $\left(\frac{dy}{dx}\right)_{iC} \times h = k_4$

L'ordonnée définitive y_{i+1} du point d'abscisse $x_i + h$ est donnée par la relation :

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} \left[\left(\frac{dy}{dx}\right)_i + 2 \times \left(\frac{dy}{dx}\right)_{iA} + 2 \times \left(\frac{dy}{dx}\right)_{iB} + \left(\frac{dy}{dx}\right)_{iC} \right] \times h$$

ou

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} [k_1 + 2 \times k_2 + 2 \times k_3 + k_4] \times h$$

La méthode de RUNGE KUTTA d'ordre 4 définit deux suites, h étant le pas de discrétisation en X :

Une première qui permet de définir les valeurs de x

Terme initial : x_0

Relation de récurrence : $x_{i+1} = x_i + h$

Une deuxième qui permet d'évaluer les valeurs de y

Terme initial : y_0

Relation de récurrence : $y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}[k_1 + 2 \times k_2 + 2 \times k_3 + k_4]$

Avec

$$k_1 = h \times f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = h \times f(x_i + h/2, y_i + k_1/2)$$

$$k_3 = h \times f(x_i + h/2, y_i + k_2/2)$$

$$k_4 = h \times f(x_i + h, y_i + k_3/2)$$