

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



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

THEME

FILTRAGE ACTIF PARALLELE DES RESEAUX ELECTRIQUES

Proposé et dirigé par:

Monsieur: :- **Fethi CHOUAF**

Présenté par :

**-LABBI Imad
- ZOBEIDI Smail
-DJABALLAH Mounir**

Sommaire

	<i>Page</i>
<i>Introduction générale</i>	01

CHAPITRE I : Introduction sur les harmoniques

I.1 Introduction	02
I.2. Définition de la pollution harmonique.....	02
I.3. Origine des harmoniques.....	03
I.3.1. Charge non-linéaire.....	03
I.3.2. Déformation d'un signal sinusoïdal	03
I.3.3 Décomposition d'un signal déformé	04
I.4 Type des harmoniques.....	04
I.5. Harmonique de courant et de tension.....	05
I.5.1. Courant Harmonique	05
I.5.2. Tension harmonique	05
I.6. Caractérisation des perturbations harmoniques	05
I.6.1. Le taux de distorsion harmoniques.	06
I.6.2. Puissances en présence des harmoniques	06
I.7. Les principales sources d'harmoniques	07
I.8. Les effets des harmoniques	07
I.8.1. Effets instantanés	07
I.8.2. Effets à long terme	08
I.9. Solutions De dépollution des réseaux électriques	09
I.9.1 Solutions traditionnelles.....	09
I.9.2. Solutions moderne.....	10
I.9.2.1.filtre actif série (FAS)	11
I.9.2.2. Filtre actif parallèle(FAP)	11

I.9.2.3. Combinaison parallèle-série de filtres actifs	12
I.9.2. 4 Filtre hybrid	12
I.9.2. 4 .1. Filtre hybride combinant filtres actif et passif	13
I.9.2.4.1.a. Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	13
I.9.2.4.1.b. Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	13
I.9.2.4.c. Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif	14
I.10. Conclusion	15

CHAPITRE II : Etude d'une charge non linéaire

II.1. Introduction	16
II.2 .Charge non linéaire	16
II.3. Types de charges non linéaires.....	17
II.3.1. Le premier groupe (Charges monophasées) comprend.....	17
II.3.2 Le deuxième groupe (Charges triphasées) comprend	17
II.4. Redresseur à diode.....	17
II. 4.1. Redresseur en monophasé	17
II. 4.2. Redressement des (2) alternances.....	18
II.4.2.1. Redresseurs monophasé bi alternance.....	18
II.5. Redresseur a diodes triphasées.....	20
II.5.1. La tension redressée.....	23
II.5.2. La valeur moyenne de tension redressée.....	24
II.5.3. Courant de redresseur.....	24
II.5.4. La valeur efficace de courant.....	24
II.6 . Développement en série de fourrier (harmonique courant)	25
II.6.1. Le courant d'entrée du redresseur.....	27
II.6.2. La valeur efficace de courant d'entrée.....	27

II.6.3. La valeur efficace de courant fondamental	27
II.6.4. La valeur efficace de courant harmoniques	27
II.7. Conclusion.....	28

CHAPITRE III : Identification des courants harmoniques

III.1. Introduction	29
III.2. Classification des méthodes d'identification	29
III.2.1. Méthodes du domaine fréquentiel	29
III.2.2. Méthodes du domaine temporel.....	29
III.3. Comparaison entre les méthodes d'identification des courants harmoniques.....	30
III.4 Méthode des puissances instantanées	32
III.4.1. Généralités sur les puissances instantanées	32
III.4.2. Principe de la méthode	32
III.4.3. Séparation des puissances perturbatrices	34
III.4.4. Calcul des courants perturbateurs.....	34
III.5. Algorithme d'identification.....	35
III.5. III.6 Conclusion	36

CHAPITRE IV : La commande du filtre actif parallèle

IV.1. Introduction	37
IV.2. Principe du filtrage actif parallèle.....	37
IV.3. Structure générale d'un filtre actif parallèle.....	38
IV.3.1 La partie puissance et constituée.....	38
IV.3.2. La partie control commande est constituée.....	38
IV.4. Généralité sur les onduleurs.....	39

IV.4.1. Les onduleurs	39
IV.4.2. Propriété de l'onduleur	39
IV.4.3. Onduleur de tension.....	39
IV.4.4. Domaine d'utilisation.....	40
IV.5. Onduleur de tension triphasé.....	40
IV.5.1. Structure générale	40
IV.5.2 Expression des tensions de sortie	41
IV.6. Commande du filtre actif parallèle.....	43
IV.6.1. Commande par hystérésis	43
IV.6.1.1. principe.....	43
IV.6.1.2. Algorithme.....	43
IV.6.2. Commande en pleine onde	44
IV.6.3. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	45
IV.7. Nécessité de régulation du bus continu	46
IV.8. Difficulté de la régulation.....	47
IV.9. La Régulation du courant du filtre actif parallèle.....	48
IV.10.1 Méthode de régulation par PI	48
IV.11. Conclusion.....	49

CHAPITRE V : Simulation

V.1. Introduction.....	50
V.2. Simulation	50
V.3. Paramètres du réseau	51
V.4. Paramètres de la charge polluante.....	52
V.5. Paramètre du filtre actif	52
V.6. Résultat de Simulation	52
V. 6 .1 Les courant de charges	52
V.6.2 Résultats de simulation de l'identification	56

V.6.2.1 Les puissances instantanées.....	56
V.6.2.2 Identification de courant harmonique.....	58
V.6.3 Résultats de la simulation par commande à commande MLI.....	60
V.8 . Conclusion	63
Conclusion générale.....	64

Liste des symboles et Abréviation

I_h : le Courant harmonique.

f_1 : fréquence fondamentale.

y : signale déformé de harmonique.

Y_0 : est la composante continue.

Y_n : est l'amplitude de l'harmonique de rang n .

ω : Pulsation électrique.

φ_n : est le déphasage relatif au fondamental de la composante harmonique de rang n .

V_1 : Valeur efficace de la tension fondamentale.

THD : taux de distorsion harmonique.

V_h : Valeur efficace de la tension harmonique du rang h .

I_1 : Valeur efficace du courant fondamental.

I_h : valeur efficace du courant harmonique du rang h .

S : la puissance apparente.

P : la puissance active.

Q : la puissance réactive.

D : la puissance déformante ou de distorsion.

FP : facteur de puissance.

V : tension simple.

FAS, : Filtre Actife Série.

FAP : Filtre Actife Paralléle.

IGBT : Insolated gate Bipolar Transistor.

I_s : valeur efficace de courant.

\bar{U}_d : valeur moyenne de tension redressée.

D : diode.

U_d : tension redressée.

V_1, V_2, V_3 : Les tensions simples du réseau triphasé.

I_{ch} : courant de charg.

I_{eff} : la valeur efficace de courant.

I_{heff} : valeur efficace de courant harmoniques .

SDA : la détection synchronisée .

FBD : Fryze-Bucholz Depenbanck .

SGF : sinusoïdale Généralisée de Fryze.

Abréviation et Liste des symboles

V_a, V_b, V_c : tensions simples de notre système triphasé.

(I_a, I_b, I_c) étant les courants de ligne de notre système triphasé.

V_α, V_β : le tension biphasé l'axe $\alpha \beta$.

$po(t)$: la puissance homopolaire instantanée.

GTO : Gate turn off thyristor.

V_{dc} : tension de sortie.

C_i : la variable d'état de l'interrupteur.

$U_{an, bn, cn}$: Les tensions de référence.

V_{io} : tension prise entre phase.

$C(t)$: est le signal carré résultant de commande.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

$i_{\alpha\beta, h}$: Les courants harmoniques biphasés. (A).

L : Inductance (H).

C : Capacité (F).

R : Résistance (Ω).

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

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

p, q : Puissance alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

F.P.B : Filtre passe-bas.

F.P.H : Filtre passe-haut.

I_{inj} : Les courants d'harmoniques à injectés (A).

f_p : La fréquence de la porteuse.(Hz).

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 L'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique.....	09
Tableau III 1 : Comparaison entre les méthodes d'identification des harmonique.....	31
Tableau IV.1 Obtention des deux niveaux de Tension, en fonction des etats des interrupteurs.....	41
Tableau IV.2 Obtention des deux niveaux de Tension pour toutes les combinaisons possibles	42

LISTE DES FIGURES

Fig. I.1. Représente la décomposition d'un signal périodique.....	03
Fig. I. 2. image d'une onde déformée.....	04
Fig. I.3. Représentation spectrale d'un sigpériodique.....	05
Fig. I.4. Filtre passif résonnant et amorti.....	10
Fig. I.5. Filtre actif série.....	11
Fig. I.6. Filtre actif parallèle.....	11
Fig. I.7. Combinaison parallèle-série de filtres actifs.	12
Fig. I.8. Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	13
Fig. I.9 : Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	14
Fig. I.10. Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.....	14
Fig. II.1 Les charges non linéaires déforment les signaux électriques du courant et de la tension.....	16
Fig. II.2. Redresseur monophasé.	17
Fig. II.3. II.3 signal d'un redresseur monophasé.....	18
Fig. II.4. Redresseur de Graetz a diode.....	19
Fig. II.5. La tension ou borne de la charge	19
Fig. II.6. Redresseur à point milieu a diod.....	20
Fig. II.7.Redresseur triphasé a diod.....	21

Fig. II.8. signal redresseur triphasé.....	25
Fig. II.9. La forme rectangulaire de courant d'entrée de pont à diode.....	25
Fig. III 1 Schéma représentant le principe de séparation des puissances ($x= p$ ou q).....	34
Fig. III.2 Algorithme (P-Q) D'extraction des courants harmoniques.....	36
Fig. IV.1 Principe du filtrage actif parallèle.....	38
Fig. IV.2 structure générale d'un filtre actif parallèle.....	39
Fig. IV.3 Schéma de principe de l'onduleur.....	39
Fig. IV.4 Onduleur de tension deux niveaux et les interrupteurs pouvant le constituer.....	41
Fig. IV.5 Schéma synoptique de la commande par régulateurs à hystérésis.....	44
Fig IV.6 Principe de commande des courants par MLI.....	45
Fig IV.7 Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur.....	46
Fig IV.8 boucle de régulation de la tension continue.....	48
Fig .V.1 Schéma globale d'un filtre actif parallèle.....	51
Fig. V.2 Courant redressé de la charge.....	52
Fig. V.3 Tension redressée.....	53
Fig . V.4 spectre de fréquence Courant de charge	53
Fig .V.5 Courant de charge i_{ch1}	54
Fig. V.6 Courant de charge i_{ch2}	54
Fig. V.7 Courant de charge i_{ch3}	55
Fig. V.8 Les spectres fréquentiels des courants i_{ch1} , i_{ch2} , i_{ch3}	56
Fig. V.9 Puissance active instantanée.....	56
Fig .V.10 Spectre d'harmonique de Puissance active instantanée.....	57
Fig. V.11 Puissance réactive instantanée.....	57
Fig.V.12 Spectres d'harmoniques de Puissance réactive instantanée.....	57

Fig. V.13 Courant harmonique de référence i_{h1}	58
Fig. V.14 Courant harmonique de référence i_{h2}	58
Fig. V.15 Courant harmonique de référence i_{h3}	58
Fig. V.16 Les spectres des courants harmoniques de référence i_{h1} , i_{h2} et i_{h3}	59
Fig. V.17 le courant injecté par l'onduleur i_{inj1}	60
Fig. V.18 Le courant injecté par l'onduleur i_{inj2}	60
Fig. V.19 Le courant injecté par l'onduleur i_{inj3}	60
Fig V.20 Les spectres des courants injectés par l'onduleur i_{f1} , i_{f2} et i_{f3}	61
Fig. V.22 Courant de source i_{f1}, i_{f2}, i_{f3} après filtrage.....	62
Fig V.23 Les spectres des courants après filtrage.....	62

Introduction générale

Le développement croissant de l'industrie a poussé les recherches dans le domaine des semi conducteurs et en particulier dans le domaine de l'électronique de puissance. Les résultats de ces recherches sont très importants du point de vue industriel et économique vu que les performances des procédés sont nettement améliorées et le coût de fonctionnement des équipements est clairement diminué, ce qui explique la grande utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie.

Malheureusement ces grands avantages ne manquent pas d'inconvénients ; le plus grand inconvénient est que les convertisseurs statiques sont des charges non linéaires qui absorbent l'énergie réactive et les courants non sinusoïdaux, ce qui est très mauvais pour le réseau électrique, car une dégradation de la qualité du courant et de la forme de tension sera une conséquence directe de l'utilisation de ces convertisseurs.

Actuellement, de nombreux compensateurs actifs sont proposés et étudiés, ils se distinguent par leur mode de connexion sur le réseau (série ou parallèle), par leur contrôle commande (compensateurs générateur de courant ou générateur de tension) et par la structure électrotechnique de leur circuit de puissance (onduleur de tension ou de courant).

Dans ce travail, nous allons choisir d'étudier la combinaison parallèle-série utilisant un onduleur à deux niveaux qui est destiné au filtrage des courants harmoniques et la compensation de l'énergie réactive. Nous mettrons en évidence deux stratégies de commande, à savoir la commande triangulo-sinusoïdale, et la commande par hystérésis. Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre nous allons donner quelques notions et définitions se rapportant au phénomène des harmoniques.
- Dans le deuxième chapitre nous étudierons une charge non linéaire (un pont redresseur à diodes) avec les grandeurs électriques de sortie d'entrée associées.
- Dans le troisième chapitre, nous étudierons les méthodes d'identification des courants harmoniques et leurs applications à la détermination des courants harmoniques que doit générer le filtre actif, la méthode que l'on a utilisée est celle des puissances instantanées.
- le quatrième chapitre sera consacré à la commande du filtre actif dans la première partie on modélisera le filtre actif parallèle, dans la deuxième partie nous aborderons les deux types de commandes utilisées : la commande par hystérésis et la commande *MLI*.

Nous terminons notre étude par simulation (en logiciel MATLAB) pour visualiser les courants harmoniques. Le différent paramètre et leur analyse spectrale.

Chapitre I : Introduction sur les harmoniques

I.1 Introduction

Les réseaux de distribution modernes doivent faire face aux nouveaux défis et aux nouvelles opportunités d'un système électrique en pleine évolution technologique, du point de vue technique, le principal changement pour le réseau concerne la nature des charges connectées; d'une part les charges passives classiques ont subi une évolution très importante et d'autre part de nouvelles charges actives ont été connectées au réseau.

Plusieurs types de ces nouvelles charges engendrent des perturbations importantes dans le réseau électrique ; ces perturbations peuvent être classées sur deux catégories, qui sont:

- Des perturbations causées par les courants perturbateurs, tel que les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et les courants réactifs.
- Des perturbations causées par les tensions perturbatrices, telle que les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrées.

Ce premier chapitre comporte trois parties; dans la première partie on cite les différentes origines des harmoniques dans le réseau électrique, ainsi, l'étude des caractéristiques des harmoniques et la présentation des normes internationale. la seconde partie est réservée à l'étude de l'influence des harmoniques sur les composantes passives et actives du réseau. on termine ce chapitre en présentant les différentes solutions de dépollution possibles[5].

I.2 Définition des harmoniques

Un signal périodique se compose d'un signal de fréquence (f) et de forme quelconque peut se décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux comprenant.

- Un signal sinusoïdal à la fréquence fondamentale, courbe fondamentale.
- Des signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers du fondamental, Les harmoniques.
- Une éventuelle composante continue.

Chacun des harmoniques est caractérisé par une amplitude généralement exprimée en pourcentage de l'amplitude du fondamental et par une phase.

Le « rang » de l'harmonique est la valeur de l'entier qui détermine sa fréquence sur un réseau (50Hz, $I_n 7= 350$ Hz)[4].

I.3 Origine des harmoniques

I.3.1 Charge non-linéaire

Une charge est dite: non linéaire lorsque le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme que la tension qui l'alimente. Typiquement, les charges utilisant l'électronique de puissance sont non-linéaires. Or, elles sont de plus en plus nombreuses et leur part dans la consommation d'électricité ne cesse de croître.

Par exemple de charges non-linéaire, on peut citer [3] :

- les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction, redresseurs).
- les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu.
- les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, ...).
- les appareils domestiques (TV, fours micro-onde, éclairage néon, ...).
- les onduleurs.

I.3.2 Déformation d'un signal sinusoïdal

Le théorème de Fourier indique que toute fonction périodique non sinusoïdale peut être représentée sous la forme d'une somme de termes (série) qui est composée :

- D'un terme sinusoïdal à la fréquence fondamentale.
- De termes sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers de la fondamentale.
- Et d'une éventuelle composante continue .

Exemple : décomposition d'un signal périodique.

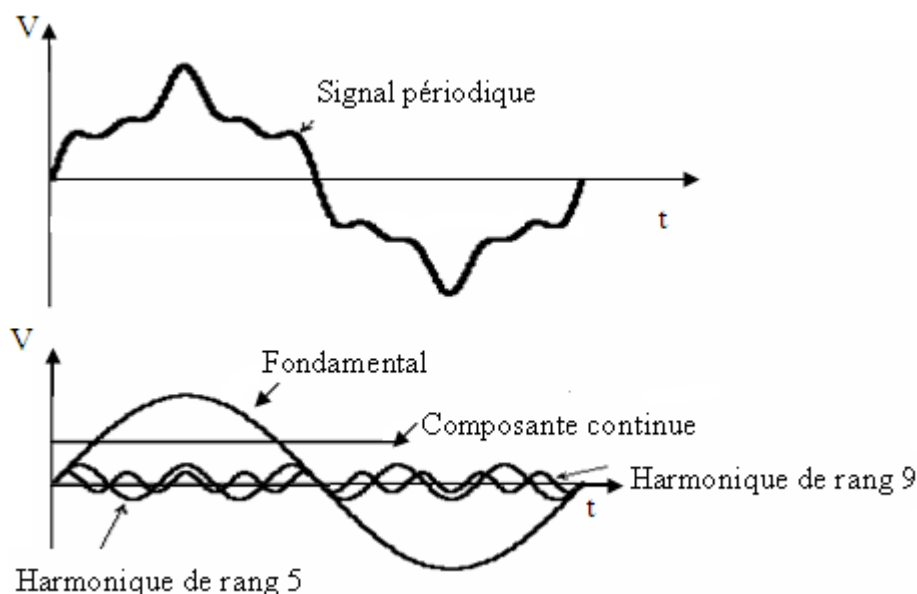


Fig .I.1 Représente la décomposition d'un signal périodique[3].

Un harmonique de rang h est la composante sinusoïdale d'un signal dont la fréquence vaut h fois la fréquence fondamentale.

La formule correspondant à la décomposition harmonique d'une fonction périodique est la suivante :

$$\text{avec : } \mathbf{y = y_0 + \sum y_n \text{Cos} (n\omega t - \varphi n)} \quad (\text{I.1})$$

- Y_0 : valeur de la composante continue généralement nulle et considérée comme telle par la suite :
- Y_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n .
- ω : pulsation de la fréquence fondamentale.
- φn : déphasage de la composante harmonique.

I.3.3 Décomposition d'un signal déformé

Un signal déformé est la résultante de la superposition des différents rangs d'harmoniques. La figure(I.2) donne l'exemple d'un courant soumis à des distorsions harmonique[3].

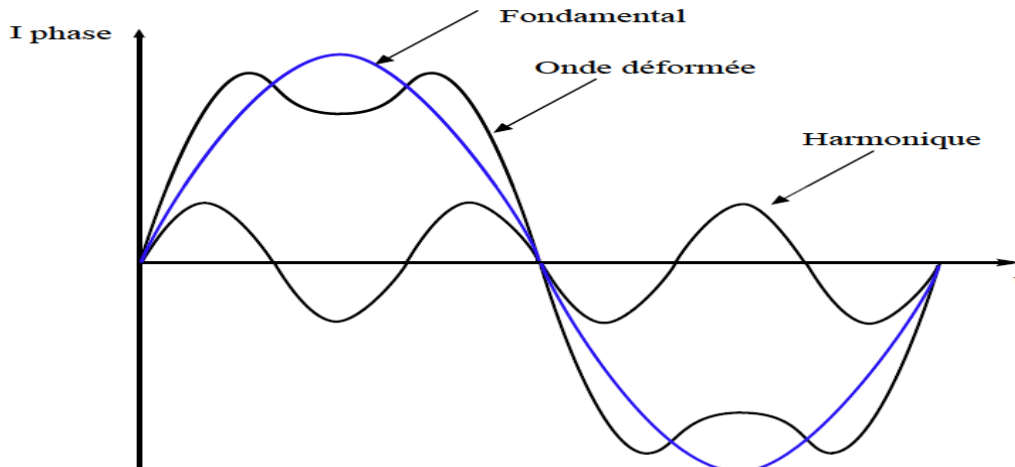


Fig. I.2 image d'une onde déformée[3].

I.4 Type des harmoniques

- a) Inter harmoniques: sont des signaux de fréquence non multiple de la fréquence fondamentale .
- b) Infra harmoniques: ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle fondamentale[4].

La figure (I.3) représenté le spectrale d'un signal périodique et type des harmoniques

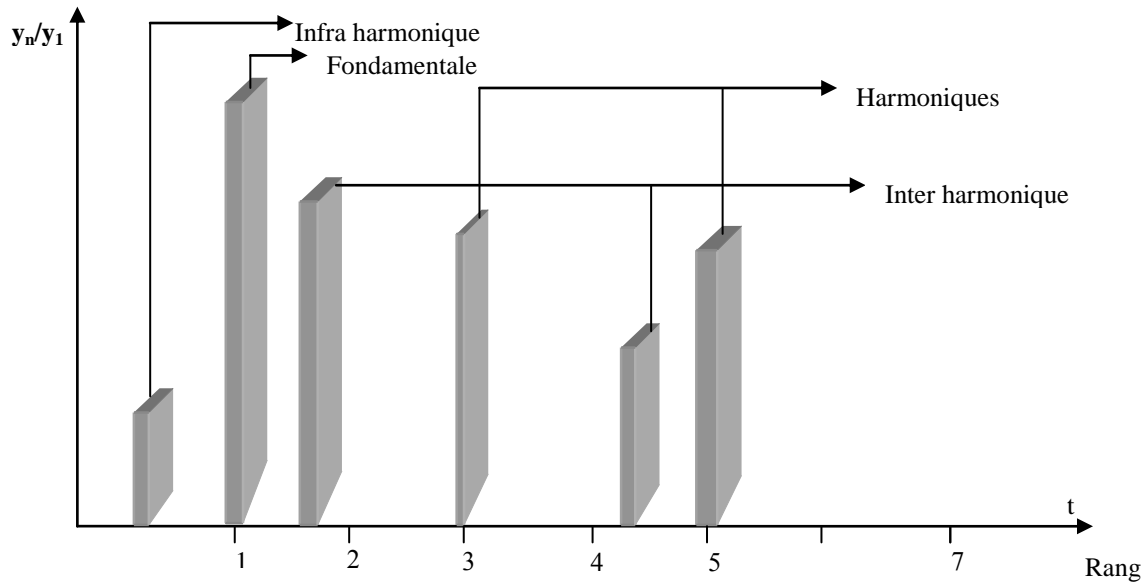


Fig. I.3 Représentation spectrale d'un signal périodique et type des harmoniques[4].

I.5 Harmonique de courant et de tension

I.5.1 Courant Harmonique

Dans la plupart des cas, les harmoniques présentés sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charge non linéaire.

On appelle « charge » un équipement ou une installation connectés au réseau électrique et consommant de l'énergie à 50 Hz. Ces charges se comportent approximativement comme des sources de courant harmonique c'est-à-dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension de réseau auquel elles sont raccordées.

Une charge passive est une charge ne comportant pas de systèmes de commutation rapide autorisant un découpage de l'onde 50 Hz, au contraire des charges actives. Les charges actives utilisent toujours des commutateurs électroniques de puissance.

I.5.2 Tension harmonique

On peut également parler de source de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire. En effet dans ce cas, si l'on s'intéresse à l'étude du raccordement d'un récepteur de faible puissance, sa connexion au réseau ne modifie pas sensiblement le niveau précédent [5].

I.6 Caractérisation des perturbations harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé. Le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés

pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

I.6.1 Le taux de distorsion harmoniques

Le facteur de distorsion harmonique noté **THD** est établi pour donner une idée sur l'amplitude de la perturbation harmonique ; il est donné par l'expression suivante :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2} \quad (I.2)$$

V_1 : Valeur efficace de la tension fondamentale.

V_h : Valeur efficace de la tension harmonique du rang h .

Ou encore par :

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

(I.3)

I_1 : Valeur efficace du courant fondamental.

I_h : valeur efficace du courant harmonique du rang h [5].

I.6.2 Puissances en présence des harmoniques

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D . Son expression est donnée par l'équation suivante :

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

S : la puissance apparente.

P : la puissance active.

Q : la puissance réactive.

D : la puissance déformante ou de distorsion.

Puissance active et réactive :

$$P = v \cdot i \cdot \cos \varphi \quad (I.5)$$

$$Q = v \cdot i \cdot \sin \varphi \quad (I.6)$$

φ : est le déphasage entre le fondamental du courant et la tension.

Le facteur de puissance noté (**FP**) est le rapport de la puissance active (**P**) à la puissance apparente (**S**). Il tient compte des harmoniques[4] [1].

$$F_p = P / S \quad (I.7)$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1.

I.7 Les principales sources d'harmoniques

La multiplication des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques, a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires qui absorbent des courant riches en harmoniques[18].

Ces principaux équipements sont:

- Démarreurs électroniques des moteurs.
- Les variateurs électroniques de vitesse.
- Les ordinateurs et autres dispositifs électroniques.
- Les éclairages électroniques.
- Les postes à souder.
- Onduleurs, hacheurs.
- Ponts redresseurs.
- Fours à arc et à induction.
- Appareils domestiques tels que téléviseurs, lampes à décharges.

I.8 Les effets des harmoniques

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforme l'allure du courant de la source, et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils occasionnent des incidents au niveau des appareillages des clients et donner lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types : les effets instantanés et les effets différés [17].

I.8.1 Effets instantanés

- Déclenchements intempestifs des protections .

- Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, télécommunication, écran d'ordinateur, téléviseur...).
- Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs).
- Destruction par surcharge thermique de condensateurs.
- Perte de précision des appareils de mesure.

I.8.2 Effets à long terme

- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements.
- Echauffement des sources : transformateurs, alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer.....).
- Fatigue mécanique (couples pulsatoires dans les machines asynchrones.....).
- Echauffement des récepteurs : des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques.
- Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs...).
- Rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire.....).

Le tableau (I.4) résume les effets des harmoniques sur les différents dispositifs utilisés dans le réseau électrique [18].

Tableau. I.1 L'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique

Nature du matériel électrique	Effet de la «pollution harmonique »
machines tournantes moteurs triphasés, alternateurs	Echauffements supplémentaires (effet joule) dans les enroulements statoriques . couples oscillatoires. augmentation du bruit.
transformateurs	pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet joule). risque de saturation en présence d'harmoniques pairs.
câbles	augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre ou s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. pertes diélectriques supplémentaires.
électronique de puissance	troubles fonctionnels lies la forme d'onde

(convertisseur statique)	(commutation, synchronisation).
Compteur d'énergie	erreurs de mesure
condensateurs de puissance	pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs
Ordinateur	dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques
Dispositifs de protection (Fusibles. Disjoncteurs)	fonctionnement intempestif
Téléviseurs	déformation d'image
Lampes à décharge	risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2

I.9 Solutions De dépollution des reseaux electriques

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre

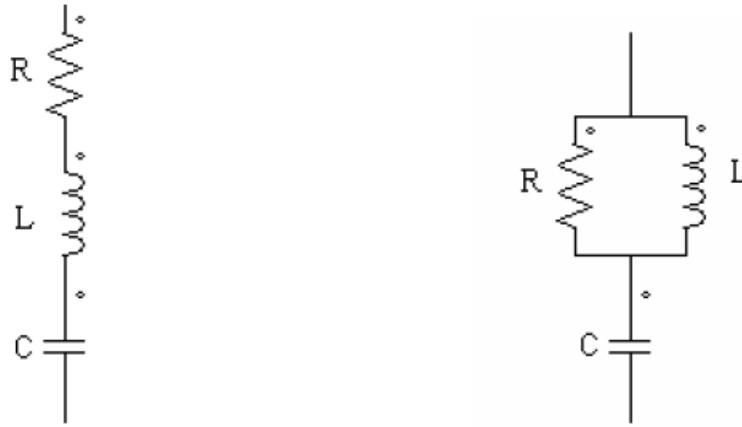
d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques . Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes[6] .

I.9.1 Solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques:

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

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut[19].



Filtre passif résonnant

Filtre passif amorti

Fig. I.4 Filtre passif résonnant et amorti[19].

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive. Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients.

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- Equipements volumineux.
- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

I.9.2 Solutions modernes

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance). Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux).
- Le filtre actif hybride (série, parallèle).

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[6].

I.9.2.1 filtre actif série (FAS)

une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau. Il se comporte comme 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[6].



Fig. I.5 Filtre actif série[6].

I.9.2.2 Filtre actif parallèle(FAP)

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[6].

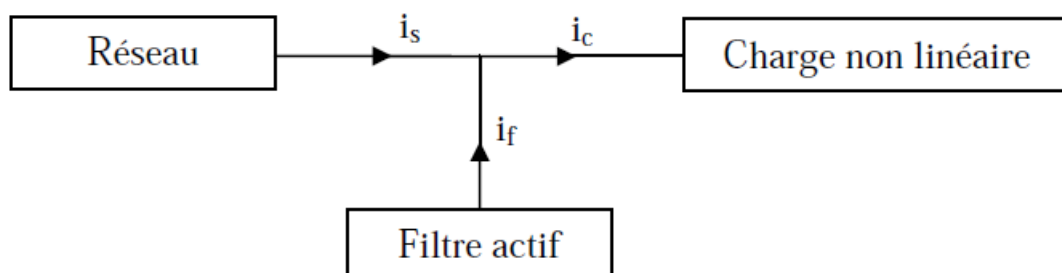


Fig. I.6 Filtre actif parallèle[6].

I.9.2.3 Combinaison parallèle-série de filtres actifs

La figure (I.3) illustre l'association de deux filtres actifs parallèle et série, Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale[10] [6].

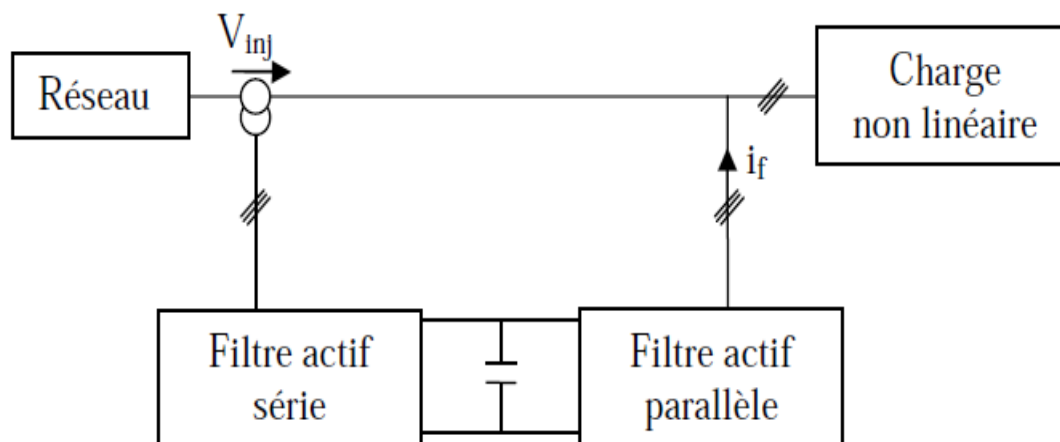


Fig. I.7 Combinaison parallèle-série de filtres actifs[6].

Les inconvénients des filtres passifs (résonances série ou parallèle avec la source et/ou la charge, détérioration des performances du filtre lors de variations de l'impédance du réseau,...) et des filtres actifs (coût élevé en raison du dimensionnement des composants de puissance) ont conduit à l'élaboration d'une nouvelle topologie de filtre actif. Il s'agit du filtre hybride qui est en réalité l'association de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs.

I.9.2.4 Filtre hybride

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. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT. De plus, du point de vue économique, Le filtre hybride présente un atout majeur : il permet de réduire le coût du filtre actif, actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de filtres actifs [6].

I.9.2.4.1 Filtre hybride combinant filtres actif et passif

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature les plus étudiées étant[1]:

I.9.2.4.1.a Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme le décrit la figure (I.8).

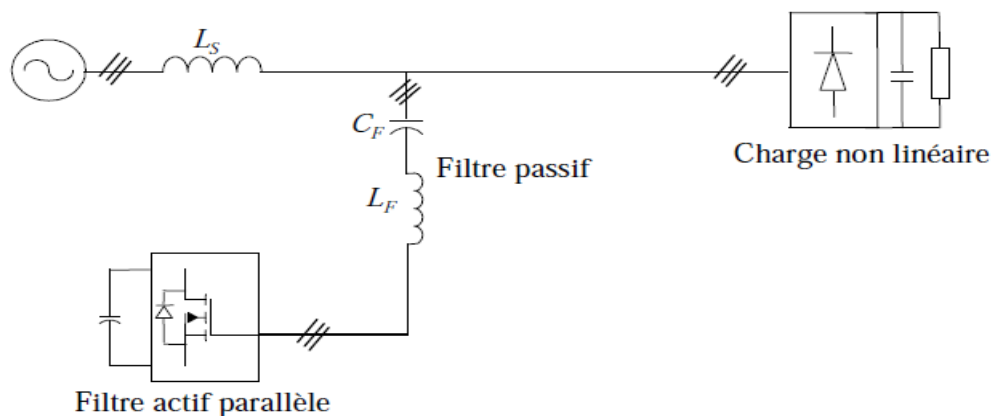


Fig. I.8 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif[6]

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge

I.9.2.4.1.b Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous deux sont également en parallèle avec la charge. Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences[20].

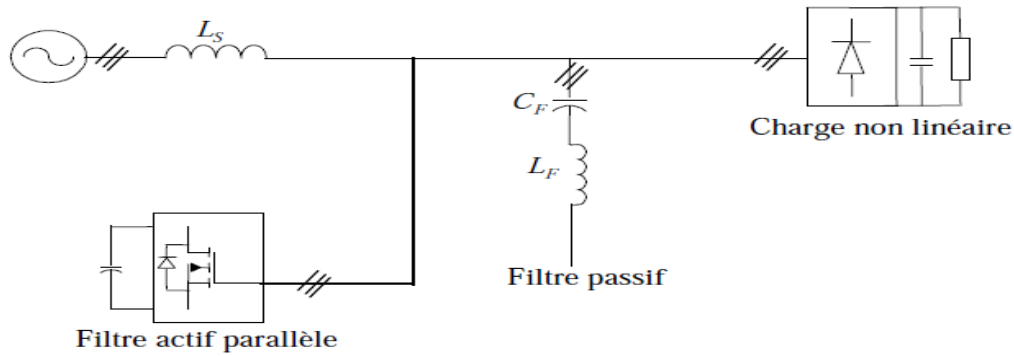


Fig. I.9 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif[20].

I.9.2.4.1.c Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif

Cette structure permet de réduire les risques d'antirésonance entre les éléments des filtres passifs et l'impédance du réseau. Dans ce cas, le filtre actif série agit comme une résistance vis-à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif, tout en restant transparent à la fréquence fondamentale. La figure (I.10) illustre cette topologie [1].

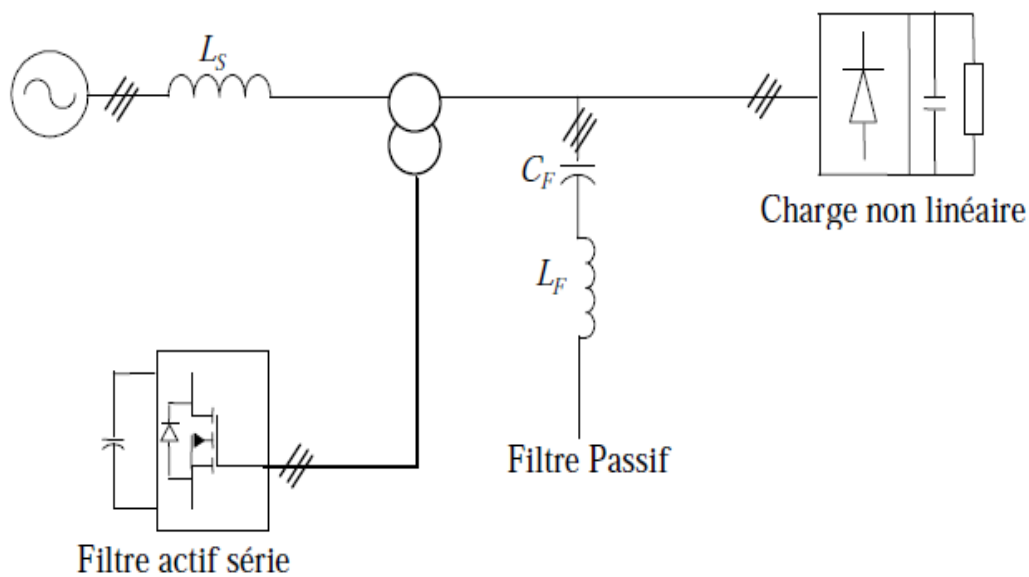


Fig. I.10 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif[1].

V.10 Conclusion

Les charges dites non-linéaire, engendrent dans le réseau de distribution, des courants non-sinusoïdaux provoquant des perturbations envahissant ce dernier. Ces perturbations se répercutent sur la qualité de l'énergie électrique et sur le bon fonctionnement des installations.

Nous avons présenté les moyens actuels et à venir pour les réduire. Les solutions existantes, notamment les techniques de filtrage et compensation à base d'éléments passifs présentent de nombreuses contraintes. La solution la plus intéressante est l'utilisation du filtrage actif.

Dans le chapitre suivant, on présentera l'étude charge non linéaire.

Chapitre II : Etude d'une charge non linéaire

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous passons à l'étude d'une charge non linéaire, qui consiste d'un redresseur à diodes (non commandé). Les redresseurs sont des convertisseurs de l'électronique de puissance, destiné à produire des tensions ou des courants continus à partir d'une source alternative de tension ou de courant, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie.

Les redresseurs ont un très vaste domaine d'application, mais malheureusement leur inconvénient major est ils envois au réseau des courants non sinusoïdaux riches en harmoniques.

Dans ce chapitre, nous étudierons un rappel sur les redresseurs monophasés (simples alternances, doubles alternances), ainsi nous détaillerons le redresseur triphasé en pont non commandé (pont de graetz) comme une charge polluante qui perturbe le réseau électrique.

II.2 Charge non linéaire

Une charge est dite "**non linéaire**" si le courant absorbé n'est pas sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Ce type de récepteur est générateur des courants harmoniques.

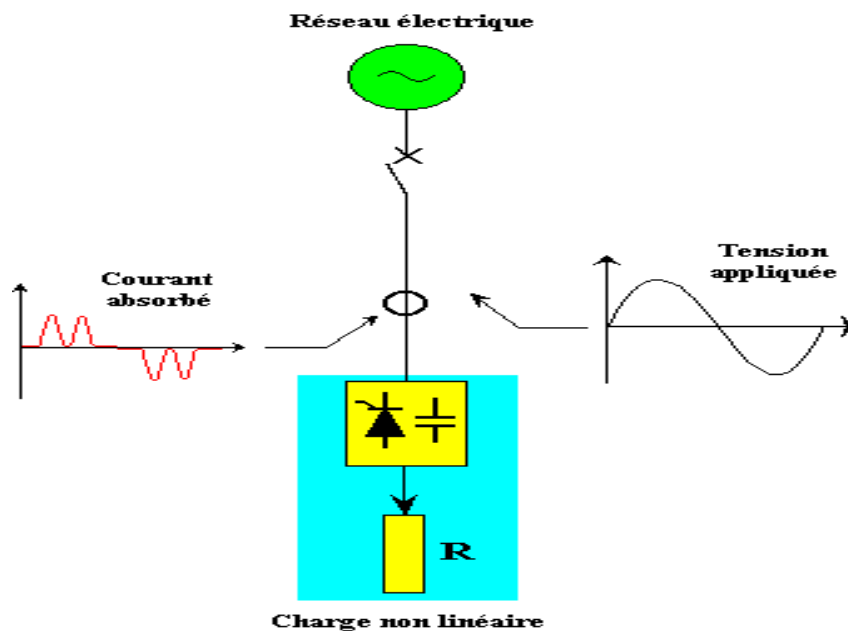


Fig.II.1 Les charges non linéaires déforment les signaux électriques du courant et de la tension[17]

II.3 Types de charges non linéaires

II.3.1 Le premier groupe (Charges monophasées) comprend

- Lampe basse consommation dite à économie d'énergie.
- Tubes fluorescent.
- Lampes à décharge gazeuse à basse et haute pression.
- Ballasts électroniques pour éclairage.
- Equipements médicaux.
- Ordinateurs.
- Imprimantes et photocopieurs.
- Onduleurs.
- Téléviseurs.

II.3.2 Le deuxième groupe (Charges triphasées) comprend

- Variateurs de vitesse pour moteurs.
- Redresseur (convertisseur alternatif –continu).
- Hacheur (Convertisseur continu -continu est un dispositif de l'électronique de puissance).
- Soudeuses.
- Four à arc utilisé dans la métallurgie.
- Chargeurs de batteries.

II.4 Redresseur à diode

II.4.1 Redresseur en monophasé

Soit le montage

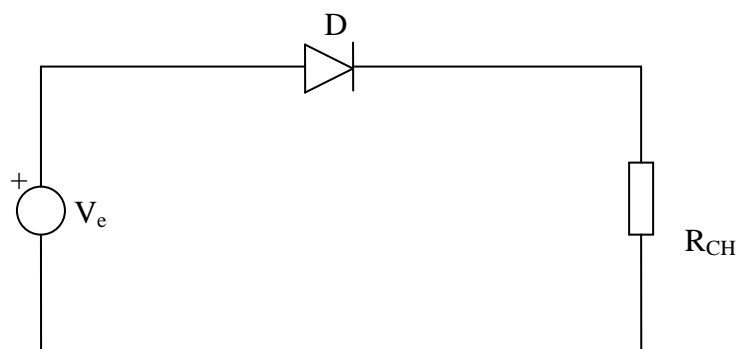


Fig. II.2 Redresseur monophasé[4]

Courbes obtenues

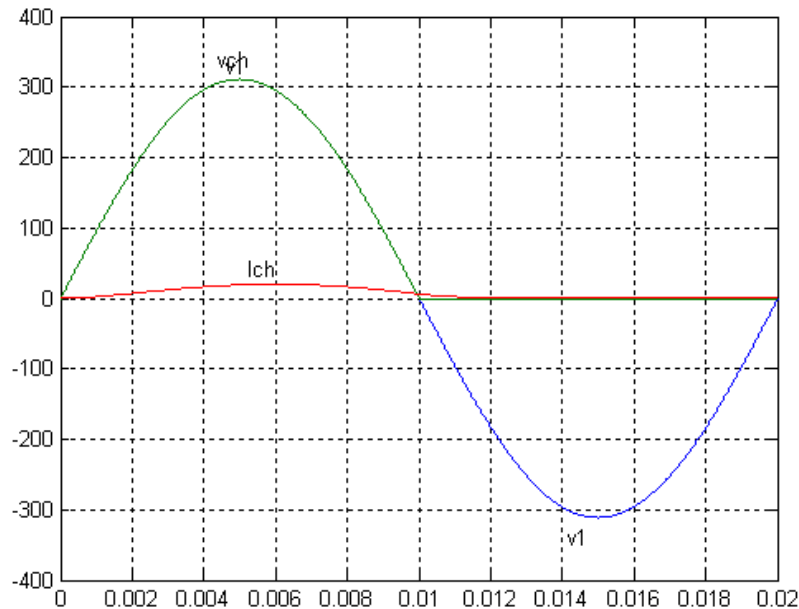


Fig .II.3 signal d'un redresseur monophasé[4]

Grandeurs caractéristiques

$$V_{S \max} = V_{e \max} - V_d \quad (\text{II.1})$$

$$V_{S \text{ eff}} = \frac{V_{e \text{ eff}}}{2} \quad (\text{II.2})$$

$$V_{s \text{ moy}} = \frac{V_{e \max}}{\pi} \quad (\text{II.3})$$

II.4.2 Redressement des (2) alternances

II.4.2.1 Redresseurs monophasé bi alternance

Il existe deux montages de bases :

La structure à pont de « GRAETZ » et la structure « A POINT MILIEU ».

► Le premier montage pont de « GRAETZ »

La tension redressée mono alternance est moins efficace que la tension alternative, puisque le courant ne circule que pendant la moitié du temps.

En utilisant 4 diodes habilement connectées, on peut redresser les 2 alternances et augmenter ainsi l'efficacité.

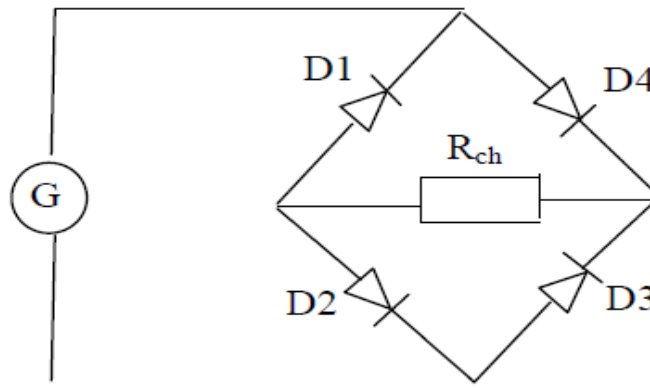


Fig.II.4 Redresseur de Graetz a diode[4]

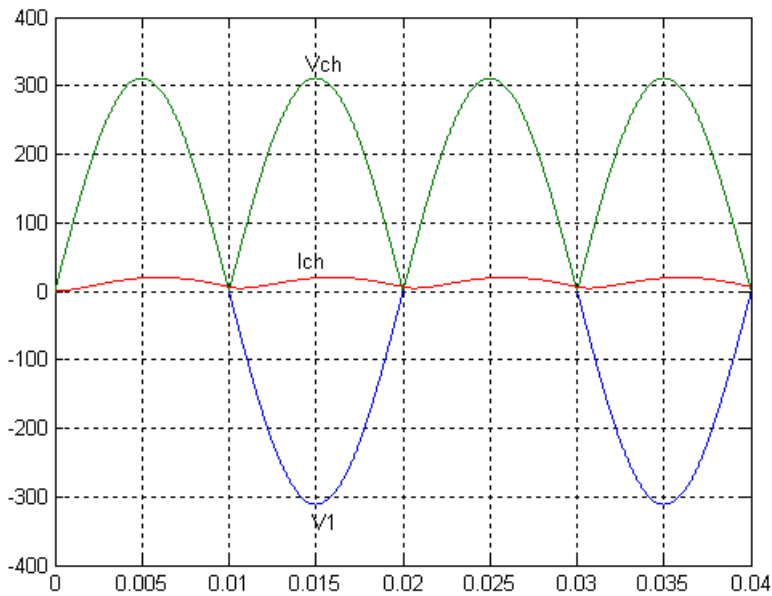


Fig.II.5 La tension ou borne de la charge[4]

Remarque

Lorsqu'une diode est traversée par le courant on observe une chute de tension de l'ordre de 0,7V à ses bornes (caractéristique d'une diode). Dans le pont de Graetz, la chute de tension sera donc de $2 \times 0,7V = 1,4V$

► Grandeurs caractéristiques

$$V_{S \max} = V_{e \max} - 2 V_d$$

$$V_{S \min} = 0 \text{ V}$$

$$V_{S \text{ eff}} \approx \frac{V_{e \max}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{S \text{ moy}} = 2 \times \frac{V_{e \max}}{\pi}$$

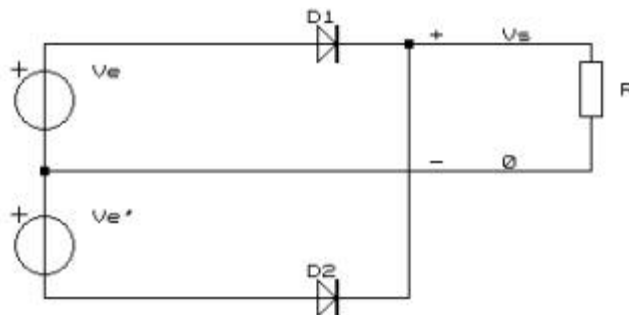
► Deuxième type Redresseur à point milieu

Fig.II.6 Redresseur à point milieu a diode[4]

II.5 Redresseur a diodes triphasées

Nous utilisons le pont triphasé à diodes alimenté par un système de tensions sinusoïdales triphasées, schématisé par la **Figure (II.7)**.

Les tensions simples des réseaux triphasés équilibrés directs sont :

$$\begin{cases} V_1 = V_m \sin(\omega t - \varphi) \\ V_2 = V_m \sin(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ V_3 = V_m \sin(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

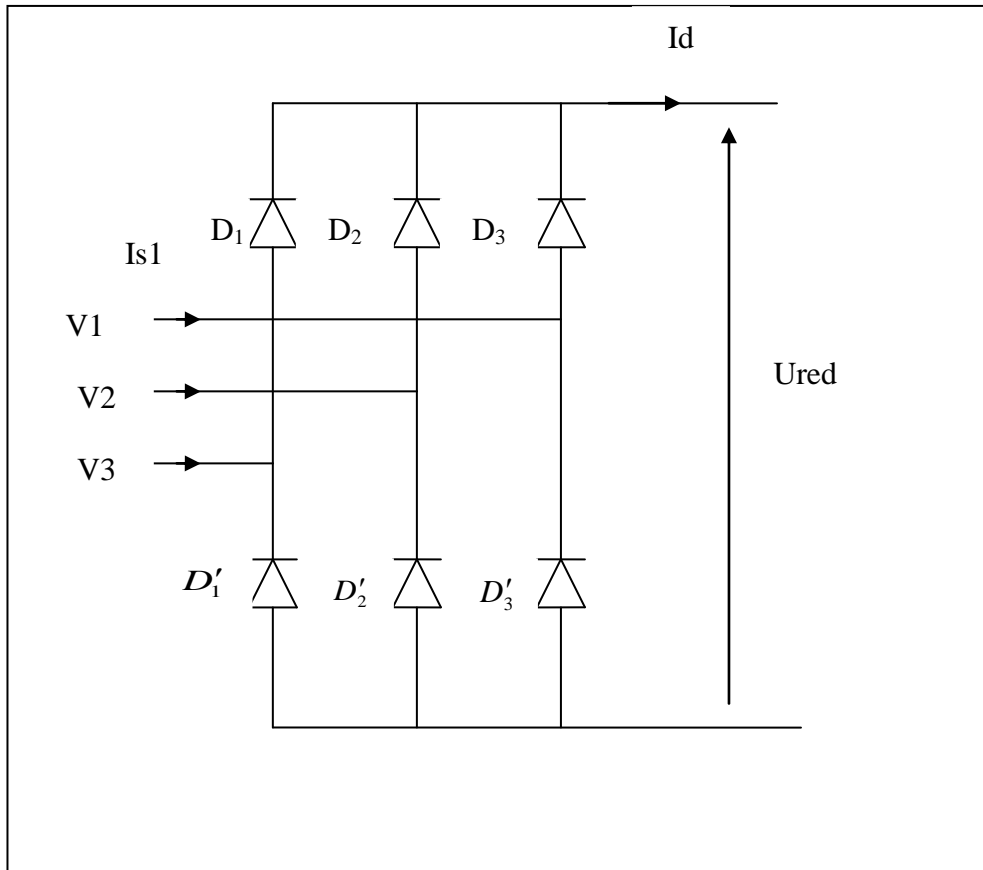


Fig.II.7 Redresseur triphasé a diode[4]

Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément. Lorsque D_1 conduit, l'une des deux diodes D'_2 et D'_3 conduit également. Il en vient que D_1 conduit lorsque V_1 est supérieur à V_2 et V_3 , ou encore :

$$V_1 = \text{Max}(V_j); j = 1,2,3. \tag{II.5}$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes

$$D_i \text{ Conduit si } V_i = \text{Max}(V_j); i = 1,2,3; j = 1,2,3. \tag{II.6}$$

$$D'_i \text{ Conduit si } V'_i = \text{Min}(V_j); i = 1,2,3; j = 1,2,3. \tag{II.7}$$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension U_d à la sortie du redresseur est :

$$U_d = \text{Max}(V_j) - \text{Min}(V_j); j = 1,2,3. \tag{II.8}$$

► Pour $0 < \theta < \pi/6$ on a $V_3 > V_1 > V_2$

V_3 Plus positive $\Rightarrow VD_3 > 0 \Rightarrow D_3$ passant

$$\Rightarrow Ud^+ = V_3$$

V_2 Plus négative $\Rightarrow VD'_2 > 0 \Rightarrow D'_2$ passant

$$\Rightarrow Ud^- = V_2$$

Donc $Ud = \text{Max}(Vi) - \text{Min}(Vi)$ (II.9)

$$Ud = Ud^+ - Ud^- = V_3 - V_2 = U_{32}$$

► Pour $\pi/6 < \theta < \pi/2$ on a $V_1 > V_3 > V_2$

V_1 Plus positive $\Rightarrow D_1$ conduit $\Rightarrow Ud^+ = V_1$

V_2 Plus négative $\Rightarrow D'_2$ conduit $Ud^- = V_2$

Donc

$$Ud = \text{Max}(Vi) - \text{Min}(Vi)$$

$$Ud = Ud^+ - Ud^- = V_1 - V_2 = U_{12}$$

(II.10)

► Pour $\pi/2 < \theta < 5\pi/6$ $V_1 > V_2 > V_3$

$$Ud^+ = V_1$$

$$Ud^- = V_3$$

(II.11)

Donc

$$Ud = Ud^+ - Ud^- = V_1 - V_3$$

$$Ud = \text{Max}(Vi) - \text{Min}(Vi) = U_{13}$$

(II.12)

► Pour $5\pi/6 < \theta < 7\pi/6$ $V_2 > V_1 > V_3$

$$Ud^+ = V_2$$

$$Ud^- = V_3$$

(II.13)

$$\begin{aligned} & Ud = \text{Max}(Vi) - \text{Min}(Vi) \\ \text{Donc} \quad & Ud = Ud^+ - Ud^- = V_2 - V_3 = U_{23} \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

► Pour $7\pi/6 < \theta < 9\pi/6$ $V_2 \succ V_3 \succ V_1$

$$V_2 \text{ plus positif} \Rightarrow D_2 \text{ Conduit} \Rightarrow Ud^+ = V_2$$

$$V_1 \text{ plus négatif} \Rightarrow D'_1 \text{ Conduit} \Rightarrow Ud^- = V_1$$

$$Ud = Ud^+ - Ud^- = V_2 - V_1 = U_{21}$$

► Pour $9\pi/6 < \theta < 11\pi/6$ $V_3 \succ V_2 \succ V_1$

$$Ud^+ = V_3$$

$$Ud^- = V_1$$

(II.15)

$$\text{Donc} \quad Ud = Ud^+ - Ud^- = V_3 - V_1 = U_{31} \quad (\text{II.16})$$

► Pour $11\pi/6 < \theta < 13\pi/6$ $V_3 \succ V_1 \succ V_2$

$$V_3 \text{ plus positive} \Rightarrow D_3 \text{ conduit} \Rightarrow Ud^+ = V_3$$

$$V_2 \text{ plus négatif} \Rightarrow D'_2 \text{ conduit} \Rightarrow Ud^- = V_2$$

$$Ud = \text{Max}(Vi) - \text{Min}(Vi)$$

$$\text{Donc} \quad Ud = Ud^+ - Ud^- = V_3 - V_2 = U_{32} \quad (\text{II.17})$$

II.5.1 La tension redressée

$$Ud = \begin{cases} U_{12} \text{ pour } \theta \left[\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{2} \right] \\ U_{13} \text{ pour } \theta \left[\frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{6} \right] \\ U_{23} \text{ pour } \theta \left[\frac{5\pi}{6}, \frac{7\pi}{6} \right] \\ U_{21} \text{ pour } \theta \left[\frac{7\pi}{6}, \frac{9\pi}{6} \right] \\ U_{31} \text{ pour } \theta \left[\frac{9\pi}{6}, \frac{11\pi}{6} \right] \\ U_{32} \text{ pour } \theta \left[\frac{11\pi}{6}, \frac{13\pi}{6} \right] \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

II.5.2 La valeur moyenne de tension redressée

$$\overline{Ud} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} U_{12}(\theta) d\theta = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} (V_1 - V_2) d\theta = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (\text{II.19})$$

Pour q phases :
$$\overline{Ud} = \frac{2q}{\pi} V_m \sin \frac{\pi}{q} \quad (\text{II.20})$$

II.5.3 Courant de redresseur

Chaque enroulement secondaire est connecté à deux diodes D_i, D_i' ($i=1, 2, 3$)

Il est parcouru par I_{ch} pendant l'intervalle (T/q) ou la diode de premier groupe débite, et par $(-I_{ch})$ pendant l'intervalle de durée (T/q) ou c'est celle du second groupe qui conduit.

Ainsi par exemple pour la première phase on donne

$$I_{s1} = + I_{ch}, \text{ quand } D_1 \text{ conduit.}$$

$$I_{s1} = - I_{ch}, \text{ quand } D_1' \text{ conduit.}$$

$$I_{s1} = 0, \text{ quand } D_1, D_1' \text{ ne conduisent.}$$

q : nombre des phases.

II.5.4 La valeur efficace de courant

$$I_{s1} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(I_{ch}^2 \frac{T}{q} \right)} \quad (\text{II.21})$$

$$I_{s1} = I_{ch} \sqrt{\frac{2}{q}} \quad (\text{II.22})$$

Courbes obtenues

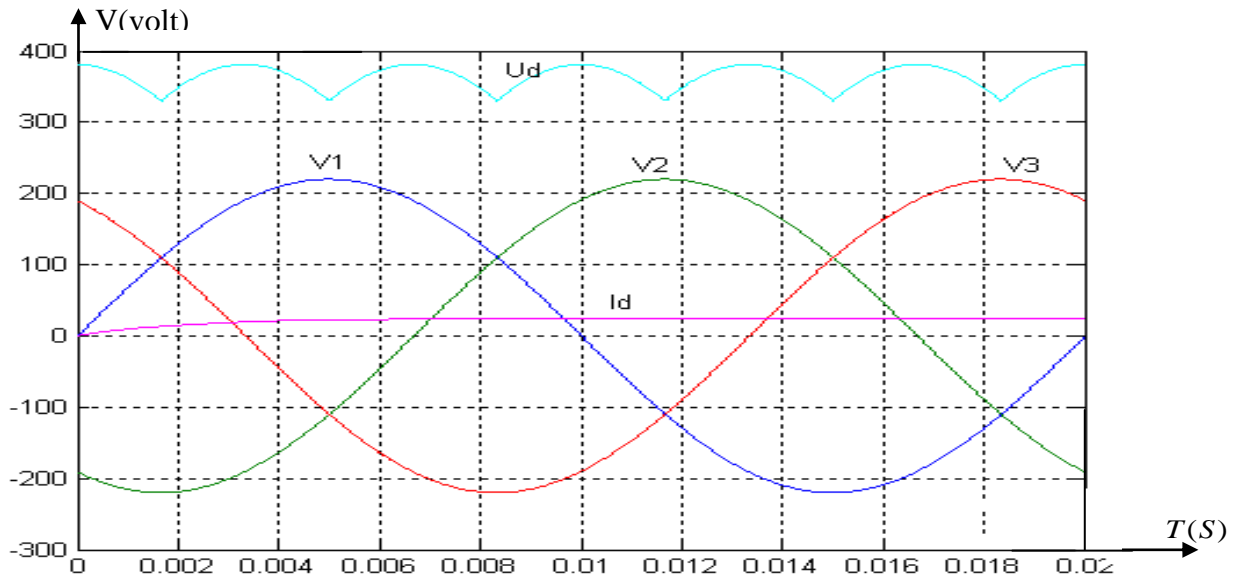


Fig.II.8 signal redresseur triphasé[4]

II.6 Développement en série de fourrier (harmonique courant)

Un réseau alimentant un montage redresseur fournit a celui- ci courant presque rectangulaire

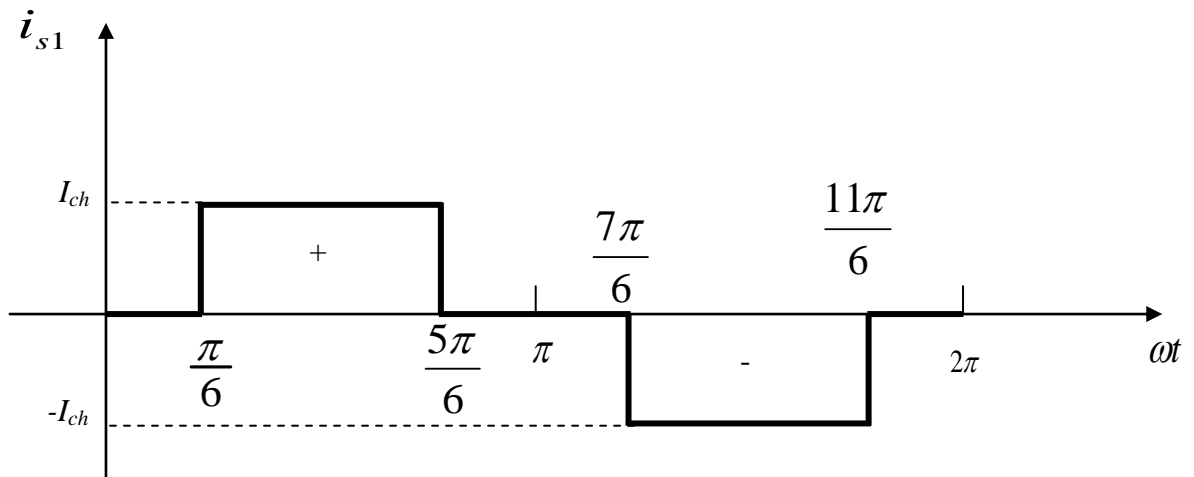


Fig .II.9 La forme rectangulaire de courant d'entrée de pont a diodes[4]

On peut On peut appliqué le théorème de fourrier :

$$Ia(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{n=\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (\text{II.23})$$

$$a_0 = \frac{1}{2T} \int_0^T Ia(t) dt \quad (\text{II.24})$$

$$a_n = \frac{1}{2T} \int_0^T Ia(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{1}{2T} \int_0^T Ia(t) \sin(n\omega t) dt \quad (\text{II.25})$$

$I_a(t)$ est impaire donc $a_0 = a_n = 0$ puisque ;

$$a_0 = \frac{1}{2T} \int_0^T I_a(t) dt = \frac{1}{2T} \left(\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_d dt + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} -I_d dt \right) = \frac{I_d}{12T} (5\pi - \pi - 11\pi + 7\pi) = 0 \quad (\text{II.26})$$

$$a_n = \frac{I_d}{2T} \left(\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \cos(n\omega t) dt - \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} \cos(n\omega t) dt \right) = 0$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (\text{II.27})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_d \sin(n\omega t) d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} (-I_d) \sin(n\omega t) d\omega t$$

Après le calcul on trouve :
$$b_n = \frac{2I_d}{n\pi} (1 - (-1)^n \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right))$$

$$b_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n \text{ pair} \\ \left(\frac{4I_d}{n\pi}\right) \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) & \text{Si } n \text{ mult} \\ 0 & \text{Si } n \text{ multiple de } 3 \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Donc:

$$n = 1, [5,7], [11,13], [17,19], [23,25], \dots, [6k-1, 6k+17], \text{ et } k = 1, 2, 3, \dots \text{ alors :}$$

$$i_a(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (\text{II.29})$$

$$i_a(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_d}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin(n\omega t)$$

$$i_a(t) = \frac{4I_d}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin(n\omega t)$$

II.6.1 Le courant d'entrée du redresseur est donné par la relation suivante

$$i5I(t) = 2I_d \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[\sin(n\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5n\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7n\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11n\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13n\omega t) \dots \right] \quad (\text{II.30})$$

II.6.2 La valeur efficace de courant d'entrée est

$$I_{eff} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (\text{II.31})$$

II.6.3 La valeur efficace de courant fondamental

$$I_{eef} = 2I_d \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sin(n\omega t) \quad (\text{II.32})$$

$$I_{eef} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\int_0^{2\pi} \left(2I_d \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sin(\omega t) \right)^2 d\omega t}$$

$$I_{eef} = I_d \frac{\sqrt{6}}{\pi}$$

II.6.4 La valeur efficace de courant harmoniques

$$I_{heff} = I_{eef} - I_{1eef} \quad (\text{II.33})$$

$$I_{heff} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}} - I_d \frac{\sqrt{6}}{\pi}$$

$$I_{heff} = 0.03I_d \cdot [17]$$

II.7 Conclusion

Les convertisseurs de puissance tels que les gradateurs, les cyclo convertisseurs, etc., ont des spectres variables et plus riches que les redresseurs. A noter qu'ils sont parfois remplacés par des redresseurs à technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions), qui travaillant avec une fréquence de découpage, sont normalement conçus pour ne générer qu'un faible niveau d'harmoniques.

Nous avons cité dans le chapitre I que le courant absorbé par la charge polluante est composé d'un fondamental et des harmoniques, a cause de ce dernier, il existe plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution. 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.

Après l'étude des équations des courants et des tensions du redresseur à diodes on passe au troisième chapitre pour expliquer et étudier les méthodes d'identifications du courant harmonique et spécifiquement la méthode $P-Q$.

Chapitre III: Identification des courants harmoniques

III.1 Introduction

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées :

- Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.
- identification à partir de la détection du courant de la source.
- identification à partir de la détection de la tension de la source.

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail[5].

III.2 Classification des méthodes d'identification

La qualité du filtrage réside dans l'efficacité de la méthode utilisée pour l'identification des courants harmoniques. Les méthodes d'identification sont classées en deux groupes « méthodes du domaine fréquentiel et méthode du domaine temporel ».

III.2.1 Méthodes du domaine fréquentiel

Les méthodes du domaine fréquentiel utilisent l'analyse de Fourier (la transformée discrète, la transformée rapide, la transformée discrète récursive,...etc.) pour identifier les harmoniques de courant [13]. Ces méthodes sont bien adaptées aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Par ailleurs, elles ont l'avantage d'identifier les harmoniques individuellement : elles permettent donc une compensation sélective. Néanmoins, les inconvénients les plus importants de ces méthodes sont des résultats moyens en régime transitoire et un volume de calcul et une allocation de mémoire très considérables.

III.2.2 Méthodes du domaine temporel

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes précédentes. Le principe de ce type de méthodes est séparation du fondamental ou de certains harmoniques du reste des harmoniques par filtrage.

Les méthodes les plus importantes sont:

- La théorie P-Q de la puissance instantanée [12], [10].
- Algorithme du Repère de Référence Synchronisé (SRF) [9].
- Algorithme de la détection synchronisée (SDA) [11].
- Algorithme Fryze-Bucholz Depenbanck (FBD) [9].
- La méthode sinusoïdale Généralisée de Fryze (SGF) [10].
- La méthode basée sur le courant actif [11], [10].
- La méthode tri-monophasée [11].
- La méthode basée sur la régulation de la tension continue [11].

III.3 Comparaison entre les méthodes d'identification des courants harmoniques

La méthode de la théorie (P-Q) a l'avantage d'être assez simple pour la mettre en application sous forme analogique puisqu'elle a besoin seulement des opérations de multiplication et de filtrage simple [1] [9]. L'inconvénient le plus évident de la méthode (P-Q) est qu'elle s'exécute mal dans des conditions non équilibrées de tension d'alimentation, parce que l'algorithme suppose que les tensions d'alimentation sont sinusoïdales et équilibrées. Un avantage de la méthode SRF est qu'elle s'exécute bien avec n'importe quelle forme d'onde du courant. Un inconvénient est que l'algorithme est assez complexe et exige un circuit PLL pour fonctionner correctement. Dans la méthode SDA, l'exécution est bonne pour les conditions de la tension d'alimentation en cas de déséquilibre. Un inconvénient de cette méthode est qu'elle suppose que les courants dans chaque phase sont égaux, ou la charge est équilibrée.

Tableau.III 1 Comparaison entre les méthodes d'identification des harmoniques[1].

La méthode	Analogique	Numérique	Avantages	Inconvénient
Théorie P-Q	Oui	Oui	Simple	Bonne pour des tensions sinusoïdales uniquement.
SRF	Non	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré avec/sans distorsion	Exige un circuit PLL.
SDA	Oui	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré.	Suppose que les courants dans les phases sont équilibrés.
SGF	Non	Oui	Utilisé pour une source déséquilibré avec/sans distorsion	Exige un circuit PLL.

Les performances de la méthode basée sur le principe du courant actif et la méthode des puissances instantanées sont parfaitement identiques, car ces deux méthodes sont en effet deux implantations différentes d'un même algorithme. Les trois méthodes (courant actif, P-Q, et tri-monophasé) permettent la compensation des harmoniques et/ou du fondamental réactif, mais la méthode basé sur la régulation de la tension continu n'est envisageable que dans le cas où le filtrage compense automatiquement les courants harmoniques et le fondamental actif. Du point de vue implantation, la méthode basée sur le courant actif est complexe. L'algorithme d'identification des méthodes régulation de la tension continu, tri-monophasé et P-Q est plus simple que la méthode basée sur le courant actif.

Toutefois, des nouvelles méthodes apparaissent en se basant sur des réseaux de neurones et sur le calcul de produit de convolution et de corrélation entre signaux. La méthode d'identification des courants harmoniques P-Q a une souplesse incomparable, un temps de réponse réduit et une implantation simple pour retourner au régime sinusoïdal [9]. D'après ces comparaisons (Tableau. III.1) on va opter à l'utilisation de la méthode P-Q pour l'identification des courants harmoniques pour la commande du filtre actif.

III.4 Méthode des puissances instantanées

III.4.1 Généralités sur les puissances instantanées

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 oeuvre de méthodes fréquentielles telle que la méthode de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète). Cette méthode a été introduite par H. Akagi [14]. 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 α - β) 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 (Annexe I). Dans la méthode classique des puissances instantanées [14], on utilise généralement, soit un filtre passe-haut (FPH), soit un filtre passe-bas (FPB) afin de ne garder que la composante harmonique du signal. La figure suivante III.2 présente le principe de cette méthode [6].

III.4.2 Principe de la méthode

La méthode d'identification des courants harmoniques, est plus simple, consiste à éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées ce qui est relativement facile à réaliser [10], [11]. 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 [10] [15] [11].

Cette théorie définit les puissances instantanée active et réactive par l'intermédiaire de la transformation de CONCORDIA, tel que :

Les puissances instantanées actives et réactives sont définies par :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

(V_a, V_b, V_c) étant les tensions simples de notre système triphasé

Et la relation des courants ci-dessous

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

(I_a, I_b, I_c) étant les courants de ligne de notre système triphasé.

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement P et q, sont définies par la relation matricielle suivante[17] :

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

$$\begin{cases} P(t) = V_{S1} I_{S1} + V_{S2} I_{S2} + V_{S3} I_{S3} = P(t) + P_o(t) \\ P(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \quad ; \quad P_o(t) = V_0 I_0 \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

$p_o(t)$: la puissance homopolaire instantanée.

L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière.

la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante [16][1] :

$$q(t) = I\sqrt{3} [(V_{S1}-V_{S2})I_3 + (V_{S2}-V_{S3})I_{S1} + (V_{S3}-V_{S1})I_{S2}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (III.5)$$

Les deux puissances instantanées p et q se décomposent en deux parties réelle et imaginaire:

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (III.6)$$

\bar{p} et \bar{q} représentent les puissances continues instantanées active et réactive liée à la composante fondamentale du courant.

\tilde{p} et \tilde{q} représentent les puissances alternatives instantanées active et réactive liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

III.4.3 Séparation des puissances perturbatrices

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Pour avoir la composante alternative, on utilise un filtre passe haut ou filtre passe bas.

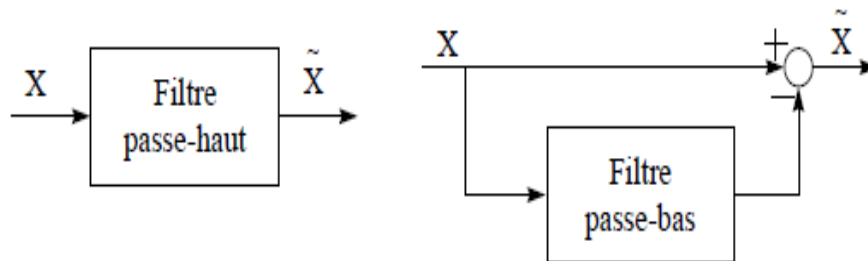


Fig. III.1 Schéma représentant le principe de séparation des puissances ($x= p$ ou q) [1].

III.4.4 Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (II.4), nous pouvons recalculer les courants dans le repère $(\alpha-\beta)$ comme le montre l'équation (II.8).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

Il est possible de séparer le courant dans le repère (α, β) en trois termes, actif, réactif à la

fréquence fondamentale et la somme des harmoniques.

tel que :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Courant actif
Courant réactif
Courant harmonique

avec : $\Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2$ (III.9)

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère $(\alpha-\beta)$ revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire. On appliquant la transformation inverse de Concordia on trouve les courants produits par charge non linéaire comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{1h} \\ i_{2h} \\ i_{3h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

On trouve la relation globale des courants harmoniques [14]:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{1har} \\ \dot{i}_{2har} \\ \dot{i}_{3har} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

III.5 Algorithme d'identification

Le schéma de la figure (III.1) illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire [03].

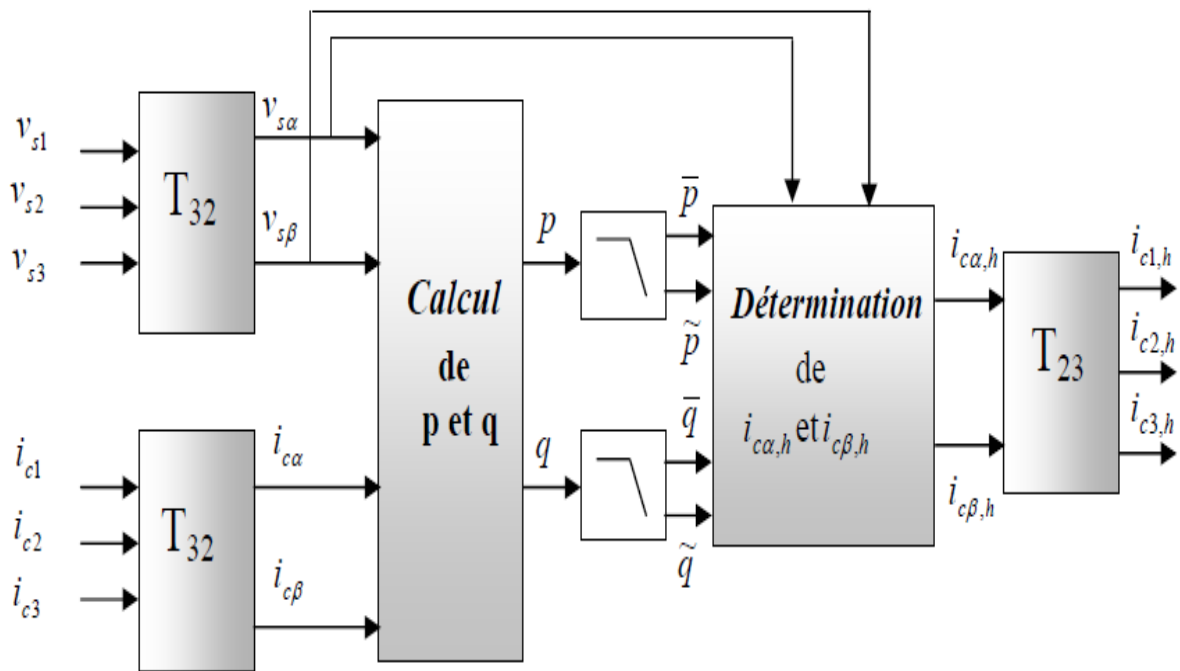


Fig.III.2 Algorithme (P-Q) D'extraction des courants harmoniques[03].

La théorie P-Q présentée auparavant est valable uniquement pour les systèmes triphasés dépourvus de composante homopolaire. L'extraction des courants des harmoniques dans des applications monophasées ne peut pas être réalisée par cette méthode.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié une méthode d'identification des courants harmoniques et son application à la détermination des courants harmoniques de référence que doit générer le filtre actif. On a aussi présenté l'algorithme du filtrage actif avec compensation de l'énergie réactive.

On a cité en suite d'autres méthodes utilisées pour l'identification des courants harmoniques.

On peut conclure que la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées est une méthode très simple à mettre en œuvre et conduit à de très bons résultats. Elle permet facilement, le passage d'un calcul des puissances active et réactive instantanées à la détermination des composantes harmoniques du courant de charge.

Chapitre IV : la commande du filtre actif parallèle

IV.1 Introduction

Le filtrage actif est une méthode moderne utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, réduction du taux de distorsion harmonique, ainsi que l'augmentation du facteur de puissance[20]. Son principe de base est d'injecter de l'énergie reactive harmonique, et y compris parfois le fondamentale lorsqu'il s'agit de viser un facteur de puissance unitaire, moyennant un montage convertisseur onduleur. D'ici vient la nomination active du filtrage[21]. A partir d'une source de tension ou de courant et avec une commande appropriée (hystérésis ou MLI), on reçoit à la sortie de l'onduleur la forme du signal à injecter dans le réseau.

L'efficacité du filtre est jugée par la forme d'onde de ce signal qui doit être l'image inversée des harmoniques à compenser, contenues dans la charge. La détection de ces harmoniques, joue un rôle déterminant dans le filtrage actif. Car le signal détecté présente une grandeur de référence pour la commande de l'onduleur.

Ce chapitre est consacré pour une étude modeste sur le filtrage actif parallèle tout en visant surtout sa présentation sous une forme très compréhensive, nous avons présenté la structure générale du filtre actif parallèle (la partie puissance et la partie commande et réglage).

IV.2 Principe du filtrage actif parallèle

Le filtrage actif parallèle des courants harmoniques consiste à ajouter en parallèle sur la charge principale une charge non linéaire constituée par un pont d'onduleur qui injecte des courants harmoniques, de telle sorte que le courant de source (réseau) soit sinusoïdal.

Une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant harmonique à fournir. L'injection peut être réalisé par différents types de convertisseurs.

Le courant harmonique I_{har} que doit fournir le filtre est égal à la différence entre le courant d'entrée I_c du convertisseur polluant et le courant sinusoïdal I_s fourni par le réseau comme le montre la fig (IV.1) [23][22].

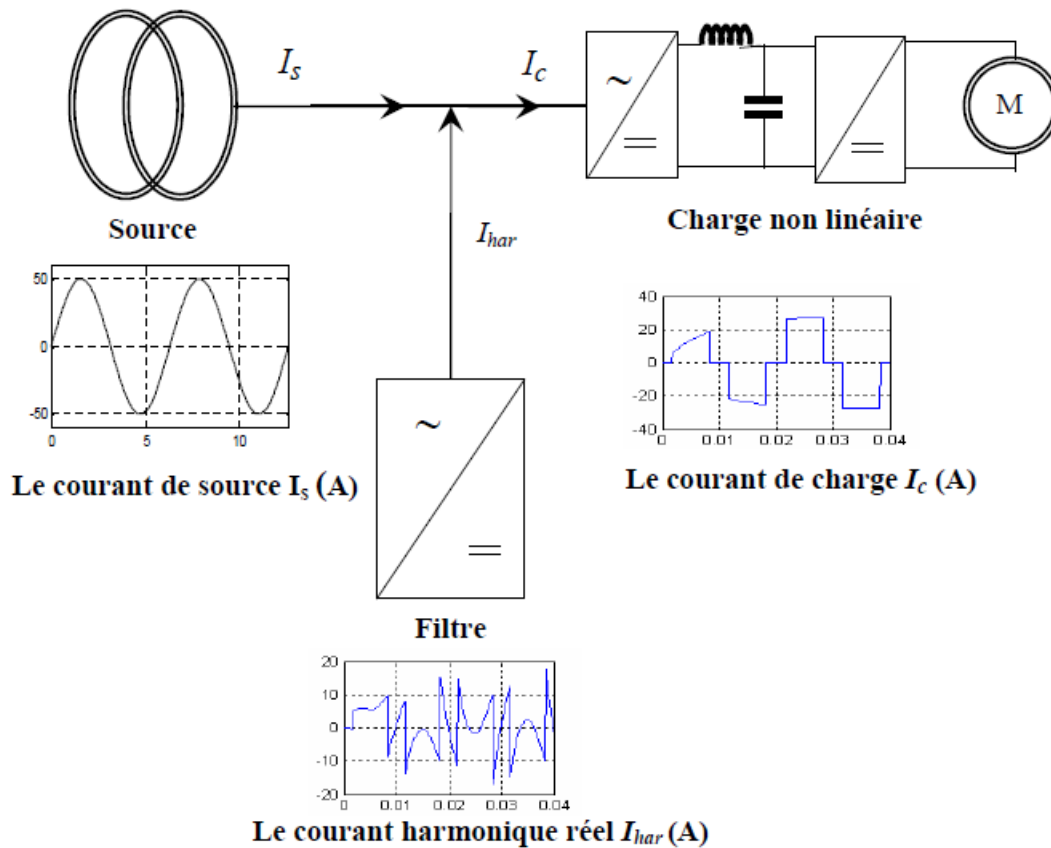


Fig. IV 1 Principe du filtrage actif parallèle

IV.3 Structure générale d'un filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle, est présenté dans la **fig(IV.2)** sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie control commande.

IV.3.1 La partie puissance et constituée

- D'un onduleur a base d'interrupteur de puissance, commandable a l'amorçage et au blocage (GTO, IGTB,...etc.) avec des diodes en antiparallèle.
- D'un circuit de stockage d'énergie.
- D'un filtre de sortie.

IV.3.2 La partie control commande est constituée

- De la méthode d'identification des courants perturbés.
- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- De la régulation du courant injecté sur le réseau a partir de l'onduleur de tension.
- De la commande de l'onduleur de tension. [3]

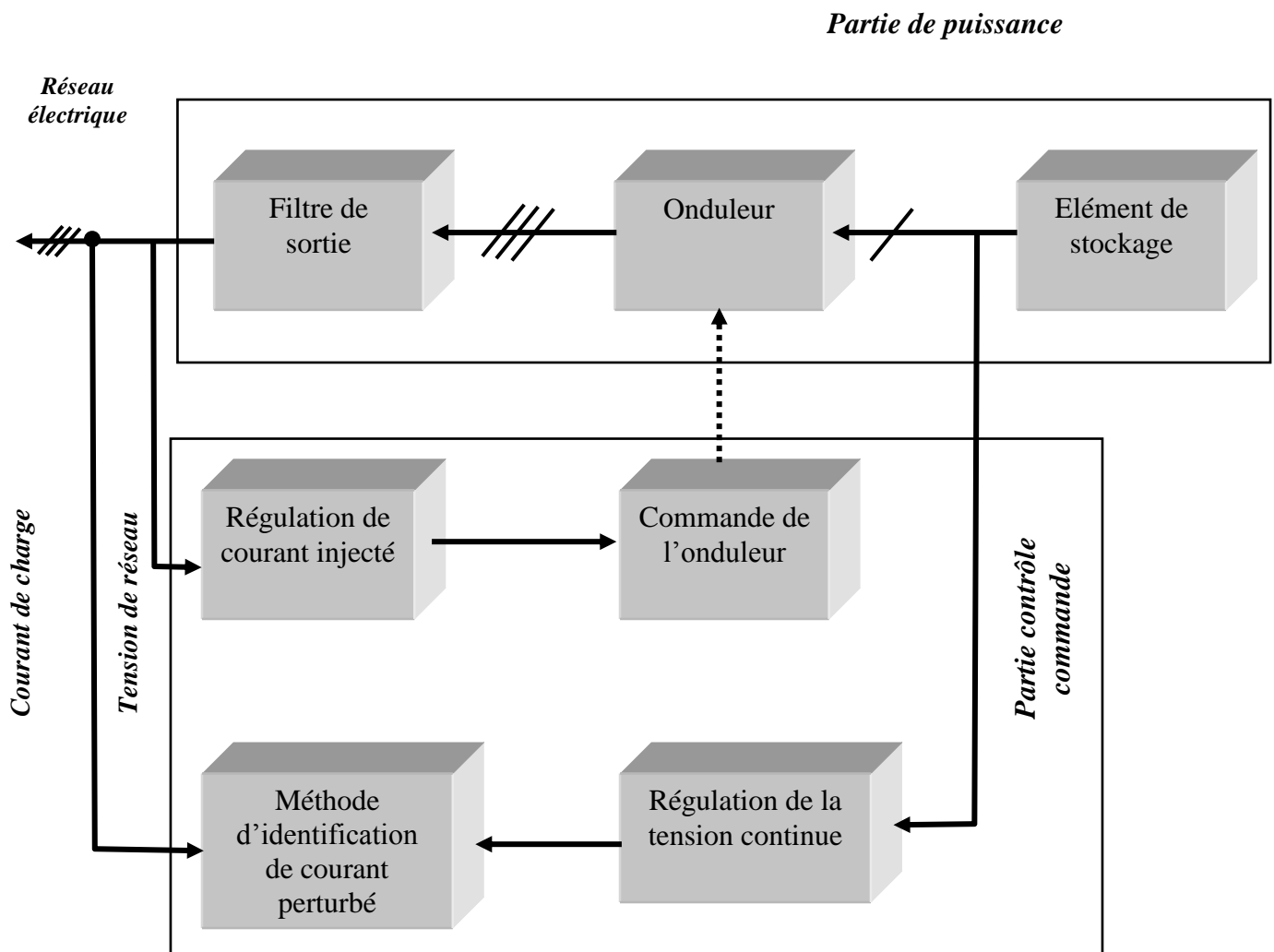
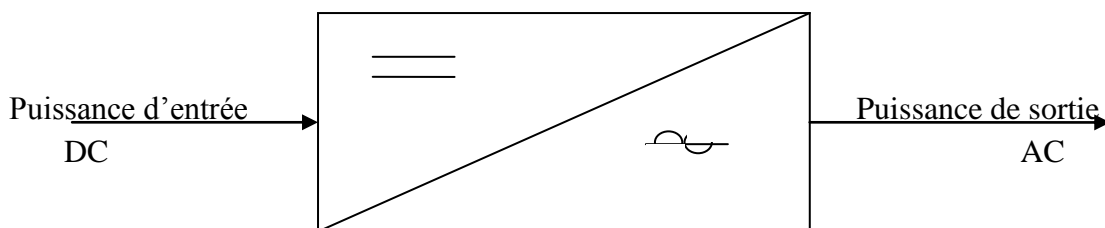


Fig. IV.2 structure générale d'un filtre active parallèle

IV.4 Généralité sur les onduleurs

IV.4.1 Les onduleurs: C'est un convertisseur statique, qui permet des échanges d'énergie entre une entrée continue et une sortie alternative.



Convertisseur continu (DC)-alternatif (AC)

Fig. IV.3 Schéma de principe de l'onduleur

IV.4.2 Propriété de l'onduleur

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et de récepteur entre les quels il est monté.

Cela conduit à distinguer :

- Les onduleurs de tension alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue.

La nature de la source est défini au point de vu des commutations, la nature de la source de tension continue imposée celle du récepteur de courant alternatif, un onduleur de courant alimente un récepteur de tension [23].

IV.4.3 Onduleur de tension

L'onduleur de tension transforme en tension alternative triphasée une tension continue. Il impose une forme de tension déterminée à la machine quelque soit le courant absorbé et travaille en commutation forcée. Une commande adéquate permet le réglage de la fréquence et de l'amplitude des grandeurs de sortie.

Les différentes structures de convertisseurs de base peuvent se ramener à deux familles [23].

IV.4.4 Domaine d'utilisation

Les onduleurs de tension à fréquence fixe sont utilisés, par exemple, pour réaliser des alimentations des sécurités, on s'efforce alors de maintenir la tension de sortie constante quelle que soit la charge.

Les onduleurs de tension à fréquence variable servent à réaliser des entraînements à vitesse variable avec moteur à courant alternatif.

Les onduleurs de courant sont utilisés dans les entraînements à vitesse variable des moteurs à courant alternatif.

IV.5 Onduleur de tension triphasé

IV.5.1 Structure générale

La Fig.(IV.4) présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté cont se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} .

Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique[24].

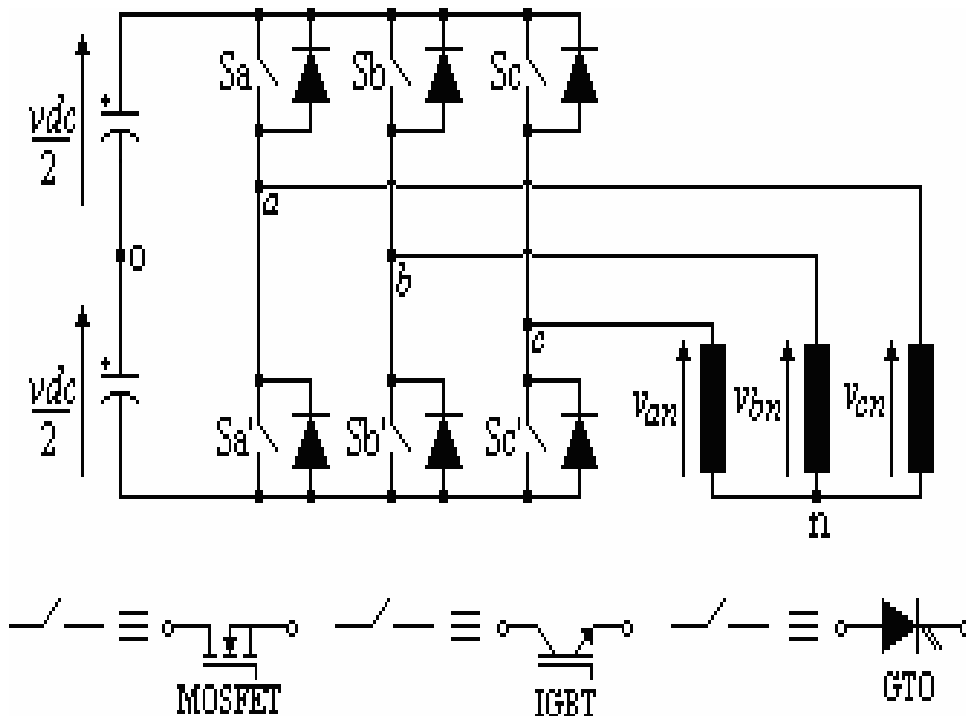


Fig. IV.4 Onduleur de tension deux niveaux et les interrupteurs pouvant le constituer

IV.5.2 Expression des tensions de sortie

L'onduleur de tension deux niveaux délivre, en sortie, deux niveaux de tensions $-v_{dc}/2$ et $+v_{dc}/2$, en fonction des états des interrupteurs comme expliqué dans le Tableau (IV.1).

Tableau IV.1

Obtention des deux niveaux de Tension, en fonction des états des interrupteurs.

C_i	S_i	S_i'	v_{io}
-1	0	1	$-v_{dc}/2$
1	1	0	$+v_{dc}/2$

Avec: i , indicateur de phase tel que $i = a, b, c$, C_i est la variable d'état de l'interrupteur prenant comme valeurs -1 ou 1, v_{io} est la tension prise entre phase et point milieu o. La tension v_{io} est obtenue en appliquant la formule suivante:

$$V_{io} = C_i \frac{V_{dc}}{2} \tag{IV.1}$$

Maintenant, si on considère tous les interrupteurs, toutes les phases (3), et tous les états possibles (2), on obtient 23 combinaisons lesquelles sont présentées dans le Tableau IV.2. Les tensions entre phases sont données par:

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{co} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \tag{IV.2}$$

Tableau IV.2

Obtention des deux niveaux de Tension pour toutes les combinaisons possibles.

N	Ca	Cb	Cc	Sa	Sà	Sb	Sb'	Sc	Sc'	vao	vbo	Vco
1	-1	-1	-1	0	1	0	1	0	1	-vdc/2	-vdc/2	-vdc/2
2	-1	-1	1	0	1	0	1	1	0	-vdc/2	-vdc/2	vdc/2
3	-1	1	-1	0	1	1	1	0	0	-vdc/2	vdc/2	-vdc/2
4	-1	1	1	0	1	1	0	1	0	-vdc/2	vdc/2	vdc/2
5	-1	-1	-1	1	0	0	1	0	1	vdc/2	-vdc/2	-vdc/2
6	-1	-1	1	1	0	0	1	1	0	vdc/2	-vdc/2	vdc/2
7	-1	1	-1	1	0	1	0	0	1	vdc/2	vdc/2	-vdc/2
8	-1	1	1	1	0	1	0	1	0	vdc/2	vdc/2	vdc/2

Si le système est équilibré, on a une somme nulle des tensions phase-neutre:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \tag{IV.3}$$

Alors, les tensions phase-neutre seront données, en fonction des tensions entre phases, par:

$$\begin{aligned}
V_{an} &= \left(\frac{1}{3}\right) \cdot (V_{ab} - V_{ca}) \\
V_{bn} &= \left(\frac{1}{3}\right) \cdot (V_{bc} - V_{ab}) \\
V_{cn} &= \left(\frac{1}{3}\right) \cdot (V_{ca} - V_{bc})
\end{aligned} \tag{IV.4}$$

Et en fonction des tensions phase-point milieu, on a:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \tag{IV.5}$$

En remplaçant les tensions v_{io} par leurs valeurs définies dans l'équation , on aboutit

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \cdot \frac{V_{dc}}{2} \tag{IV.6}$$

IV.6 Commande du filtre actif parallèle

IV.6 .1 Commande par hystérésis

IV.6 .1.1 principe

Le principe de la commande par hystérésis est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande enveloppant les courants de référence. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de références. Comme l'onduleur à deux niveaux possède deux états de commande possibles pour un bras j ,

alors nous utilisons un régulateur à hystérésis à une position[5].

IV.6.1.2 Algorithme

Nous désignons par ε l'écart entre le courant de référence i_{refj} et le courant réel i_{resj} tel que :

$$\mathcal{E}_{ai\epsilon} = i_{refi} - i_{teeli} \quad (IV.7)$$

$$i = \{1,2,3\} \quad , \quad j = \{1,2\} \quad (IV.8)$$

L'algorithme de cette stratégie est donné comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Si} & \mathcal{E}_{ai} > \Delta_i \Rightarrow \beta_{Uj} = 1 \\ \text{Si} & \mathcal{E}_{ai} \leq \Delta_i \Rightarrow \beta_{Uj} = 0 \end{array} \right. \quad (IV.9)$$

Δ_i : largeur de la bande d'hystérésis.

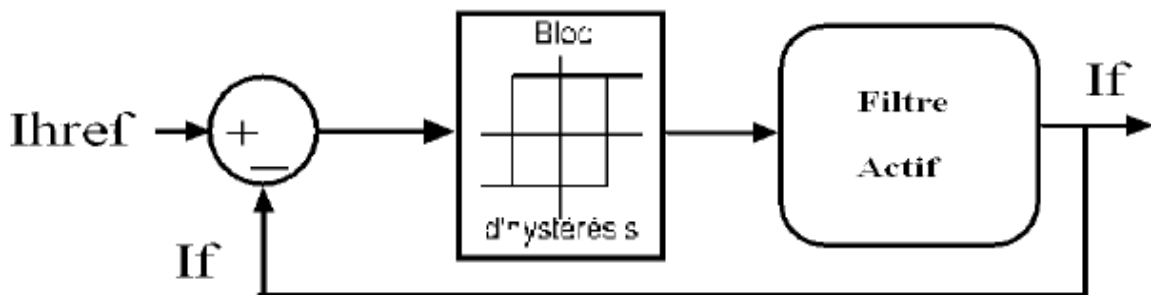


Fig. IV.5 Schéma synoptique de la commande par régulateurs à hystérésis

IV.6.2 Commande en pleine onde

a) Principe

Dans ce type de commande, la génération des signaux de commande de l'onduleur est effectuée en transformant un signal sinusoïdal en un signal carré pour chaque phase selon l'algorithme suivant .

$$\text{Ou :} \quad \left\{ \begin{array}{ll} \text{Si} & \text{sin}(\omega t) > 0 \Rightarrow c(t) = 1 \\ & \text{sin}(\omega t) < 0 \Rightarrow c(t) = 0 \end{array} \right. \quad (IV.10)$$

Sin (w.t) : est le signal sinusoïdal ;

C (t) : est le signal carré résultant de commande.

- Si le récepteur est branché en étoile sans conducteur neutre ou en triangle, les harmoniques de tension de rang trois ou multiples de trois sont absents, car ils forment des systèmes homopolaires.
- Si le neutre existe Le spectre harmonique de la tension simple V_{1N} ; montre bien que les harmoniques les plus dominants sont d'ordre 5 et 7.[2].

II.6.3 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la *commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)*. La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur [1].

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite *MLI intersective*. Cette technique de commande met en oeuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la Figure (IV.6)[1].

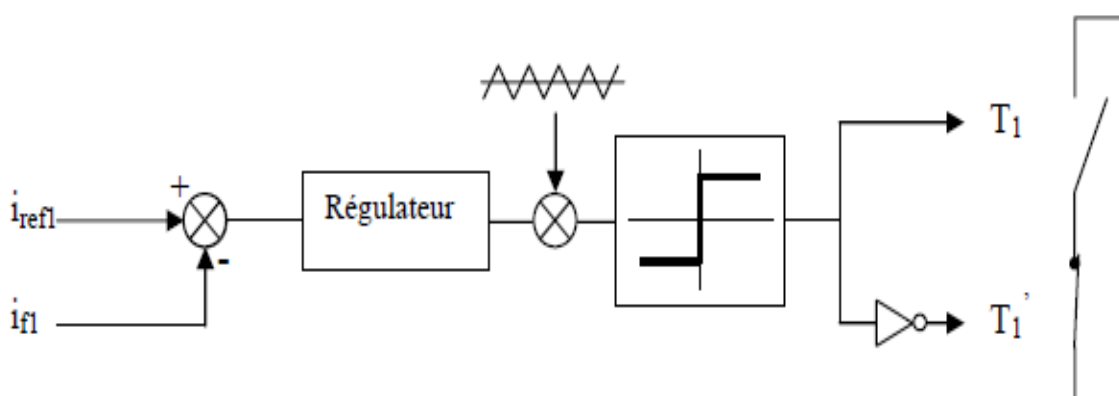


Fig. IV.6 Principe de commande des courants par MLI

Les signaux logiques C qui en résultent donnent l'ordre de commutation des interrupteurs du filtre (Fig.IV.7)[1].

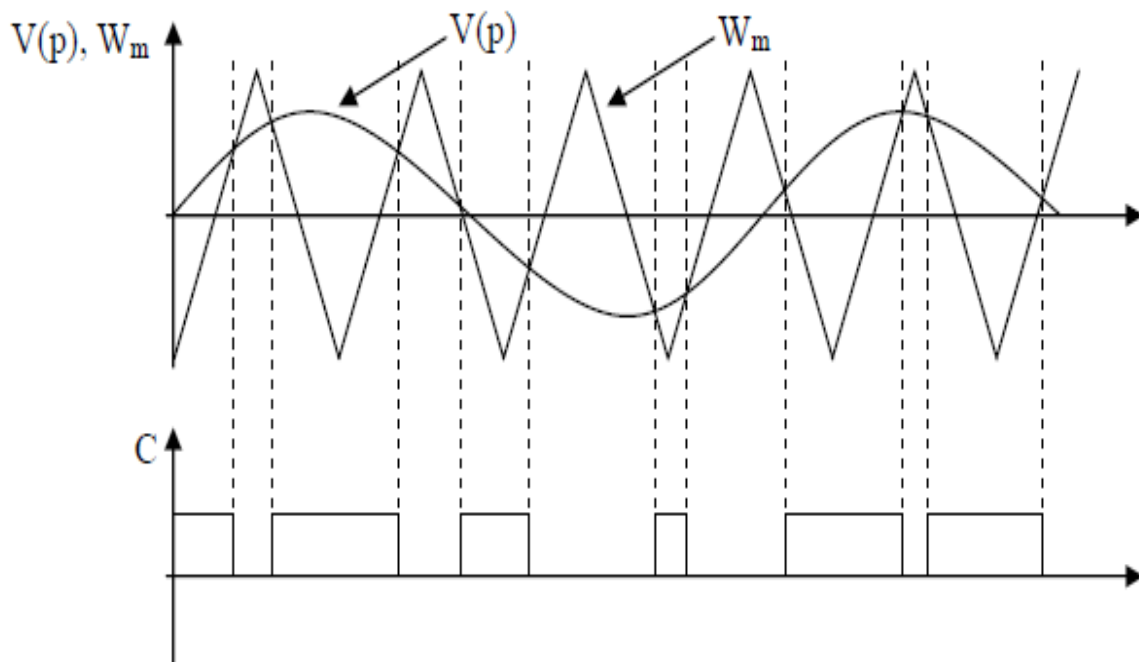


Fig. IV.7 Répartition des commutations sur un bras d'un onduleur.

D'autres commandes par MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

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

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

IV.7 Nécessité de régulation du bus continu

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge à travers le redresseur formé par la diode monté en antiparallèle aux bornes des transistors, cette source est dite source flottante.

La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante, à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance active entre la charge polluante et le réseau. En cas de déséquilibre de puissance entre la charge polluante et le réseau, c'est le filtre actif qui fournira la puissance nécessaire pour rétablir l'équilibre. Les pertes dans les composantes de puissance font aussi varier la tension aux bornes de la capacité, d'où la nécessité de réguler cette tension de la maintenir à un niveau constant.

Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont:

- Les pertes dans le filtre actif,
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante
- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.
- Les pertes par effet Joule dans les composantes passifs L_f et C_f .

IV.8 Difficulté de la régulation

De La variation de tension ΔV_c aux bornes du condensateur de stockage dépend principalement la valeur de la capacité C . En effet, une diminution de C_f entraîne l'augmentation de ΔV_c et inversement.

L'objectif principal de la régulation de tension revient donc à limiter la variation de la tension ΔV_c en utilisant une capacité de valeur aussi faible que possible. De cette façon, le dimensionnement du condensateur pourra être optimisé. En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante.

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} * V_{dc} \right) \quad (\text{IV.11})$$

Notons que la relation (IV.11) est non linéaire. Pour des faibles valeurs de la tension V_{dc} autour de la référence V_{dc-ref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes

$$\left\{ \begin{array}{l} P_c = C_{dc} * V_{dc-ref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \\ \Rightarrow V_{dc}(s) = \frac{P_c(s)}{V_{dc-ref} C_{dc} s} \end{array} \right. \quad (\text{IV.12})$$

A partir de la relation (IV.12) et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma (IV.7). Le A partir de la relation (IV.12), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma (IV.8). Le choix du paramètre K_c aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif.

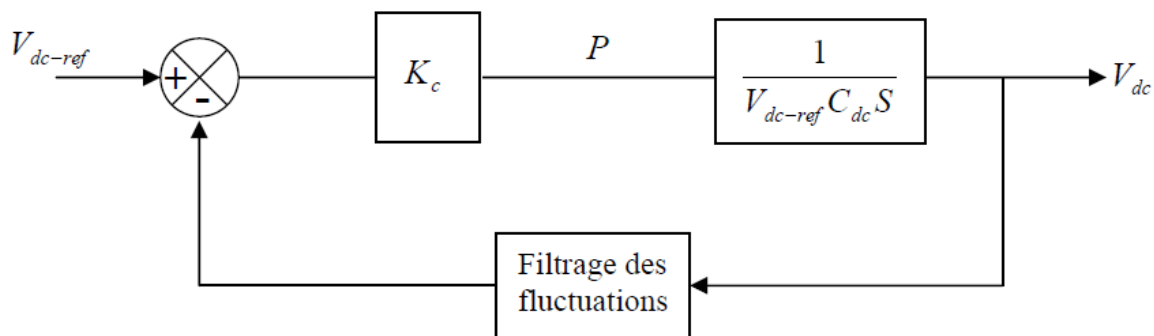


Fig. IV.8 boucle de régulation de la tension continu

Mais dans le cas de l'apparition des pics du courant ou des chutes de tensions, la régulation du bus continu devient problématique, puisque le filtre actif ne sera pas à reproduire le courant nécessaire pour la compensation des perturbations harmoniques.

IV.9 La Régulation du courant du filtre actif parallèle

Le choix du régulateur du courant du filtre actif se fait en fonction des objectifs de régulation et de l'ordre du filtre de sortie. Deux régulateurs *PI* et *RST*, correspondant respectivement aux filtres de sortie du premier et du troisième ordre, on propose pour réguler le courant du filtre actif parallèle [2] la méthode suivante :

IV.9.1 Méthode de régulation par PI

Un régulateur doit satisfaire aux objectifs généraux de la régulation ainsi qu'aux contraintes liées au rejet de perturbations. Dans le cas d'un régulateur aussi simple que le régulateur *PI*, et à cause du manque du degré de liberté que nous impose ce dernier, seule la poursuite des références pour un point de fonctionnement fixe pourra être envisagée. A cela s'ajoute le problème du compromis à trouver dans le cas d'une structure du filtre actif parallèle avec un filtre de sortie du premier ordre (choix de l'inductance) [2].

IV.10 Conclusion

Nous avons cité les différentes stratégies de commande de l'onduleur triphasé en pont complet de tension à savoir la stratégie de commande MLI et en pleine onde, et par hystérésis, et nous avons montré les performances de l'onduleur de tension et régulation.

Le contrôle par MLI est d'une complexité réduite; il garantit un fonctionnement à fréquence fixe et conduit à un contenu harmonique parfaitement identifié. Cependant, cette technique a des propriétés dynamiques qui peuvent être limitatives et la réponse du système lors d'un changement brutal des courants de référence est plus lente que celle d'une commande par hystérésis [6].

Finalement, nous avons choisi, dans la suite de notre étude, la technique de commande à hystérésis et MLI, nous allons valider les études analytiques avec des simulations sous MATLAB/SIMULINK profitant en cela de sa facilité de modélisation.

Chapitre V: Simulation

V.1 Introduction

MATLAB dont le nom provient de MATrix LABoratory est un langage de calcul scientifique basé sur le type de variable matricielle outre ses grandes capacités de calcul numérique appliqué à différents domaines scientifiques tels le traitement de signal, l'automatique, etc., MATLAB intègre des fonctionnalités graphiques de grand qualité en « 2 dimension » ou « 3 dimension ». MATLAB est divisé en deux parties programmation et simulink.

Dans ce chapitre nous sommes concernés à la partie de (SIMULINK).

SIMULINK : outil additionnel à matlab permet modélisation la simulation et l'analyse de systèmes dynamiques linéaires. Ses systèmes peuvent être analogiques discrets ou hybrides discrets avoir plusieurs parties échantillonnées à des cadences différentes.

Les paramètres régissant le fonctionnement de ces systèmes peuvent être modifiés en ligne, soit en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement.

SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphique ou de valeur numérique en cours de simulation. SIMULINK est bâti autour d'une bibliothèque de blocs classiques par catégories (système direct ou continu bloc linier ou non linier de connexion etc.) [21].

V.2 Simulation

Dans notre travail nous avons utilisé le simulink comme outil de simulation, le schéma de simulation qui représente, la charge non linéaire, l'onduleur, bloc d'identification de courant harmonique, la source et en fin le schéma de commande par *MLI* est représenté dans le schéma de la **Fig(V.1)**. Le schéma a les paramètres suivants :

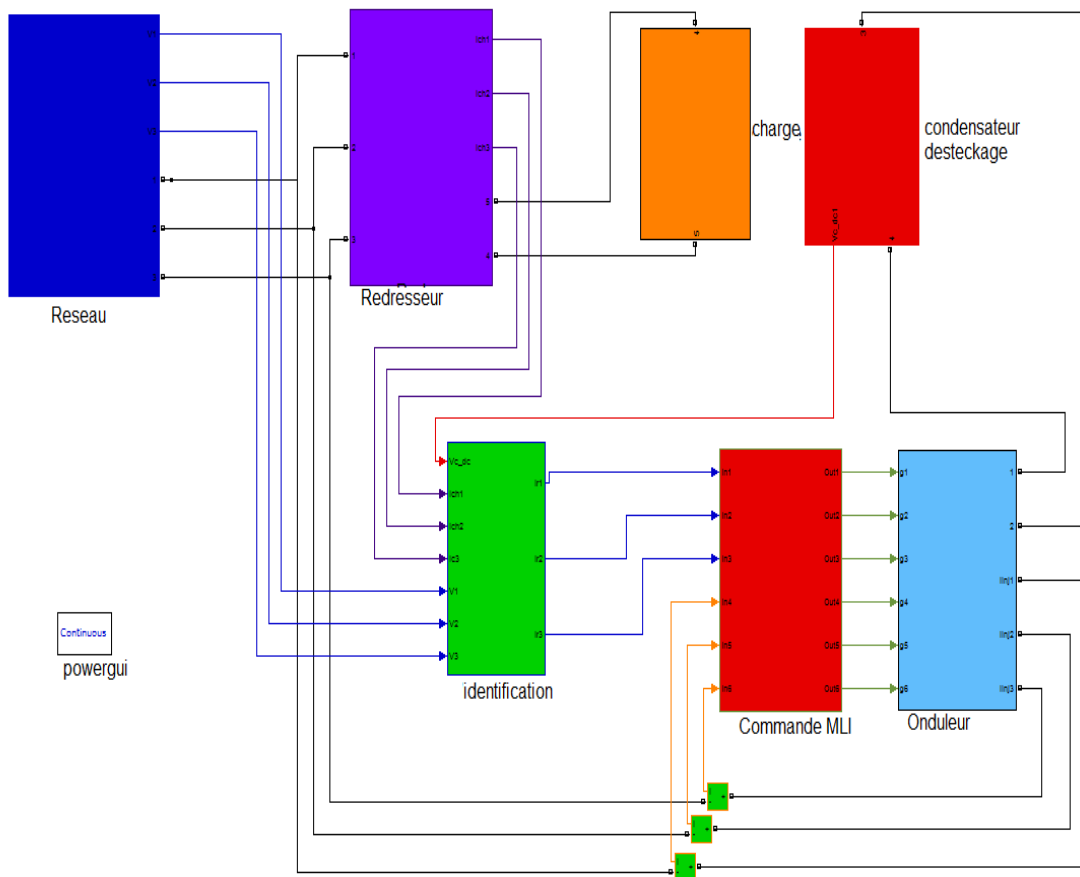


Fig .V.1 Schéma globale d'un filtre actif parallèle

V.3 Paramètres du réseau

Le réseau est un système de tension triphasé parfaitement sinusoïdal, tel que

La tension simple : $V=220 \text{ v}$ et la fréquence : $f=50 \text{ hz}$ donc :

$$V_1=220\sin (wt)$$

$$V_2=220\sin (wt +120).$$

$$V_3=220\sin (wt -120).$$

Inductance du réseau : $L_r = 15e^{-6}\text{H}$

Résistance du réseau : $R_r = 5e^{-3}\Omega$

V.4 Paramètres de la charge polluante

La charge polluante c'est un redresseur triphasé non commandé qui alimente une charge résistive inductif (L_{ch} , R_{ch}). Pour la simulation on va prendre les valeurs suivantes

$$L_{ch} = 0.55e^{-3}H$$

$$R_{ch} = 1,5\Omega$$

V.5 Paramètre du filtre actif

Le filtre actif c'est l'ensemble, onduleur de tension, filtre de sortie (L_f , R_f), et système de stockage de l'énergie avec

$$L_f = 0.0003H$$

$$R_f = 0.05\Omega$$

V.6 Résultat De Simulation

V.6.1 Les courants de charges

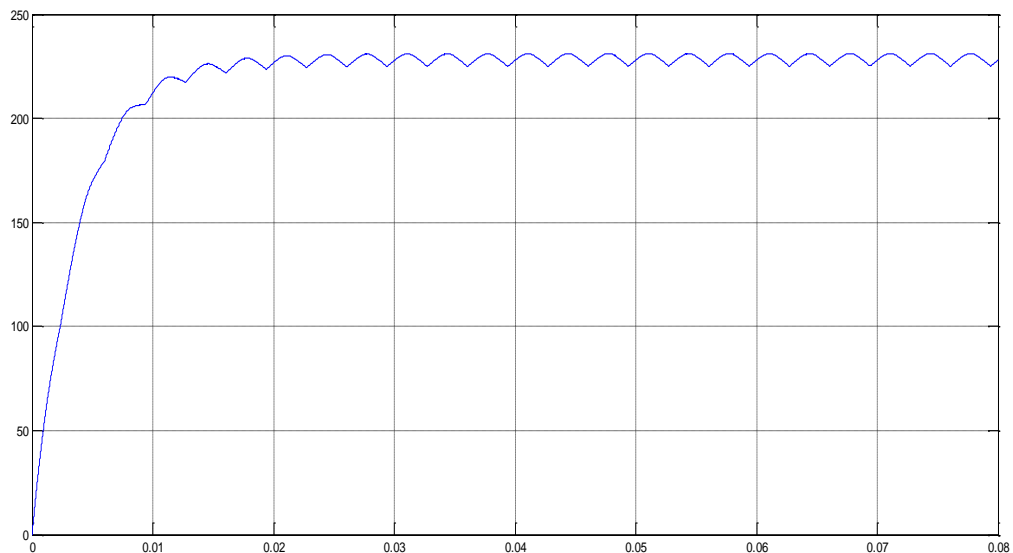


fig. V.2 courant redressé de la charge

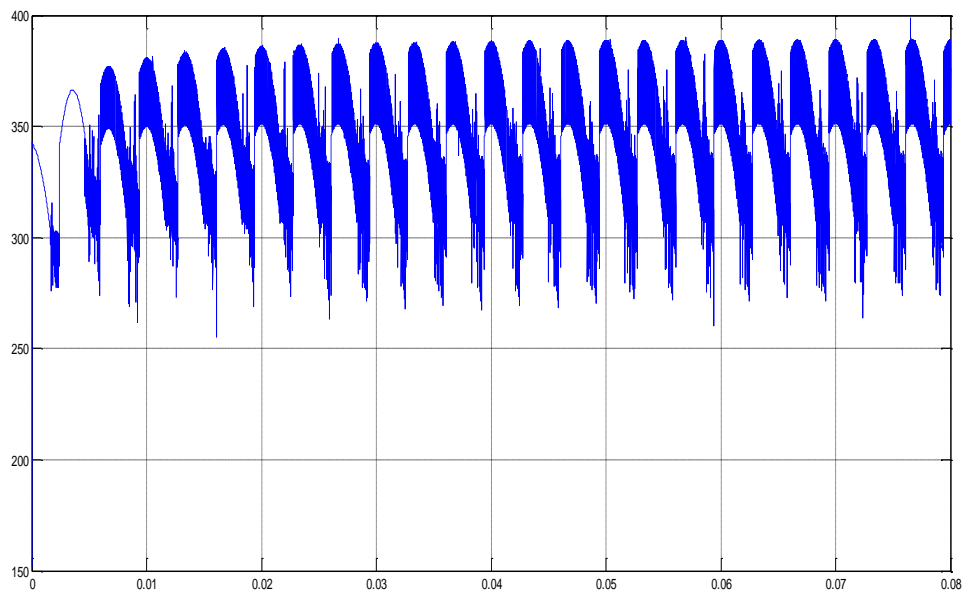


Fig. V.3 Tension redressée

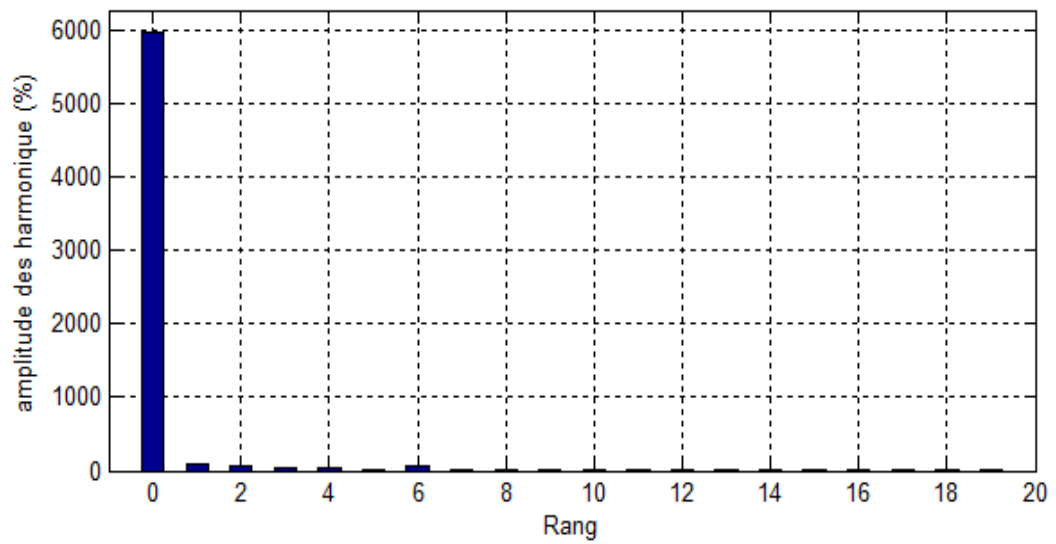


Fig . V.4 spectre de fréquence Courant de charge

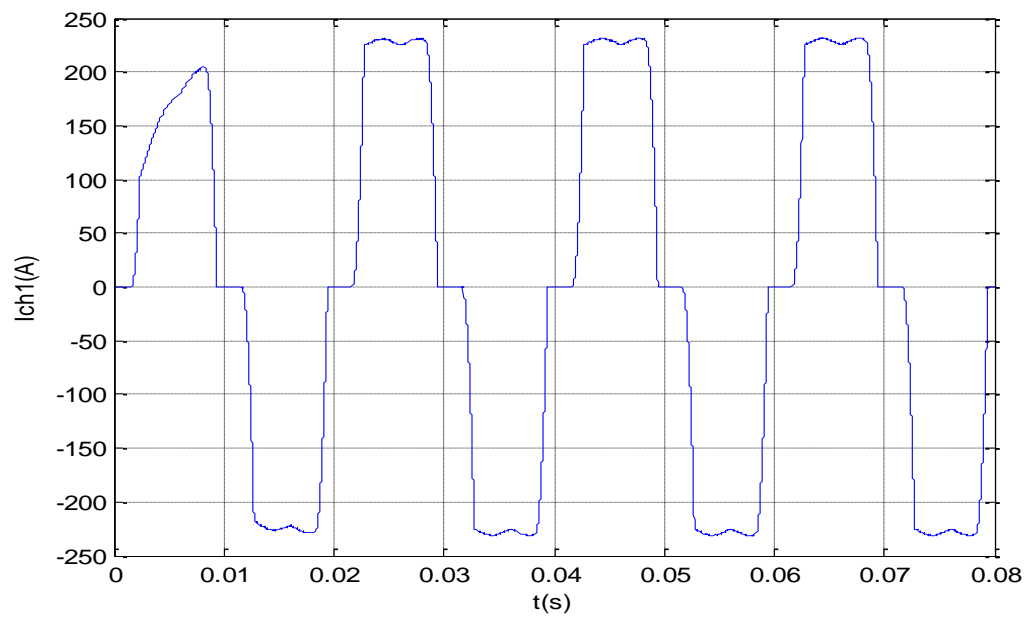


Fig .V.5 Courant de charge i_{ch1}

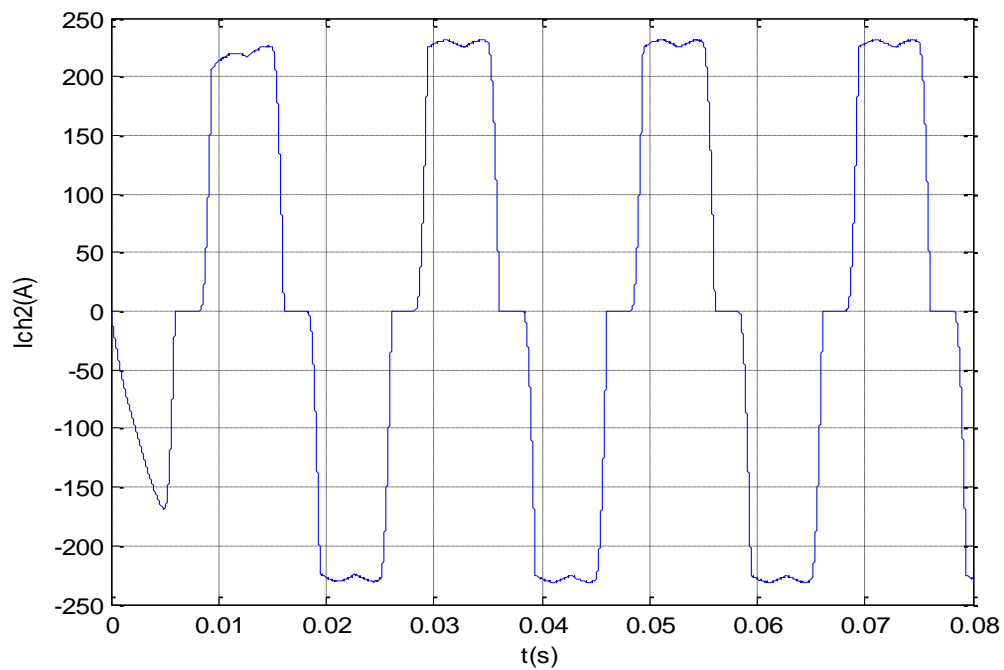


Fig. V.6 Courant de charge i_{ch2}

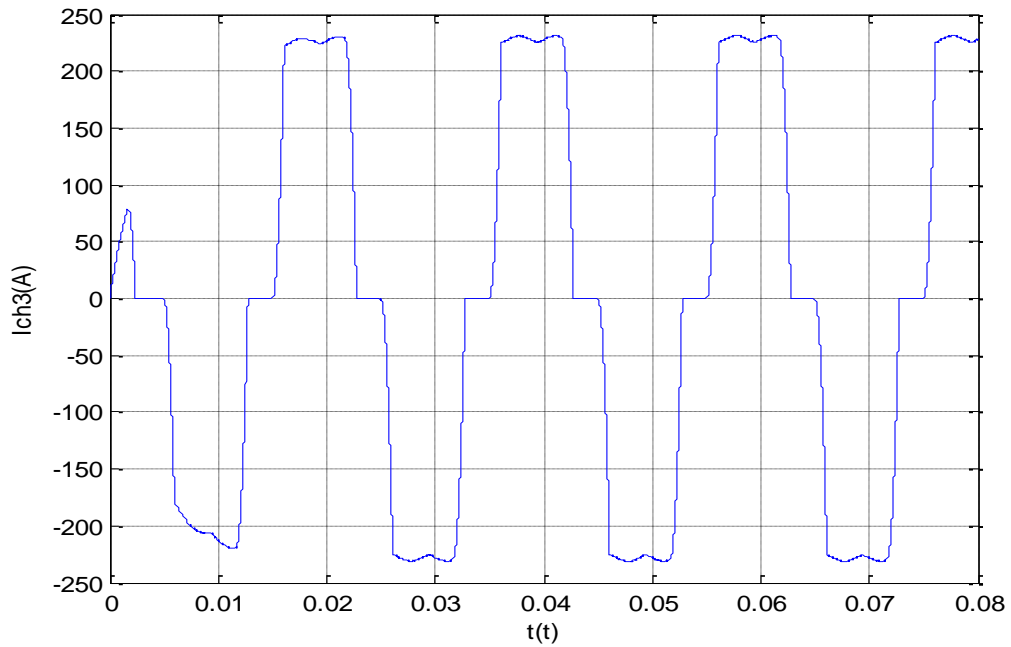
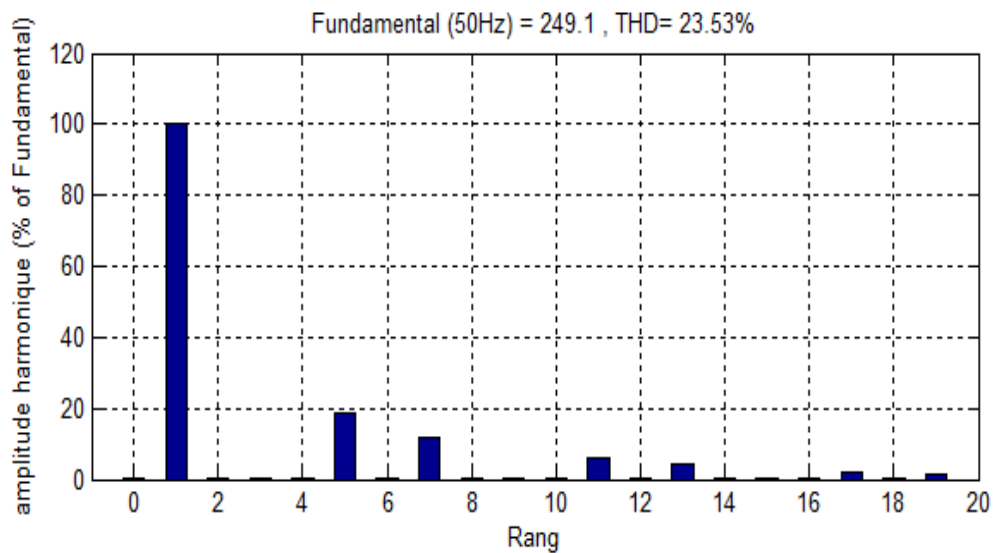


Fig.V.5.1 Courant de charge i_{ch3}



(a)

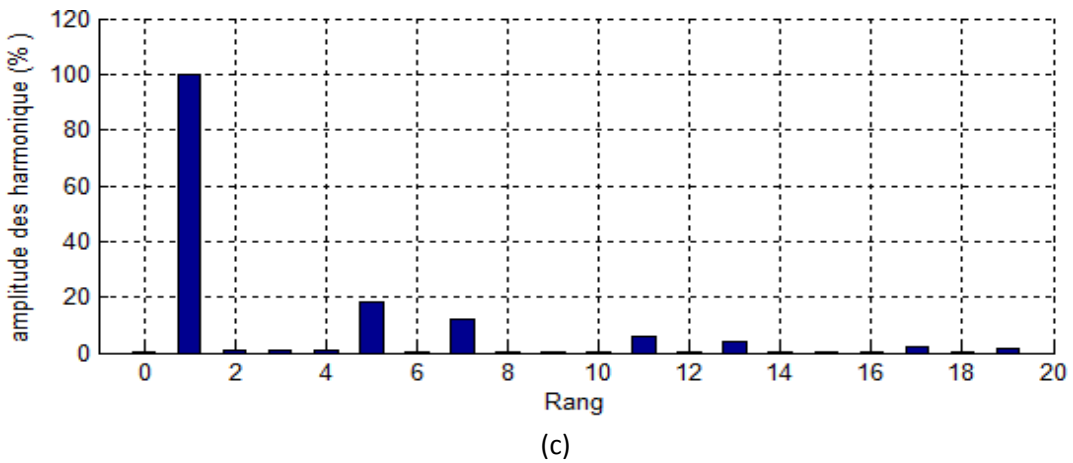
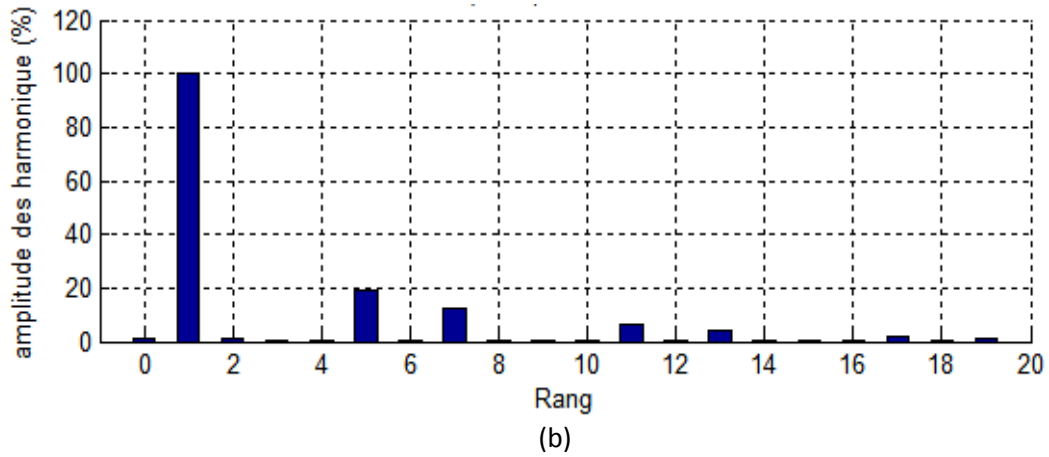


Fig.V.6 Les spectres fréquentiels des courants ich1 ich2 ich3

V.7 Résultats de simulation de l'identification

V.7.1 Les puissances instantanées

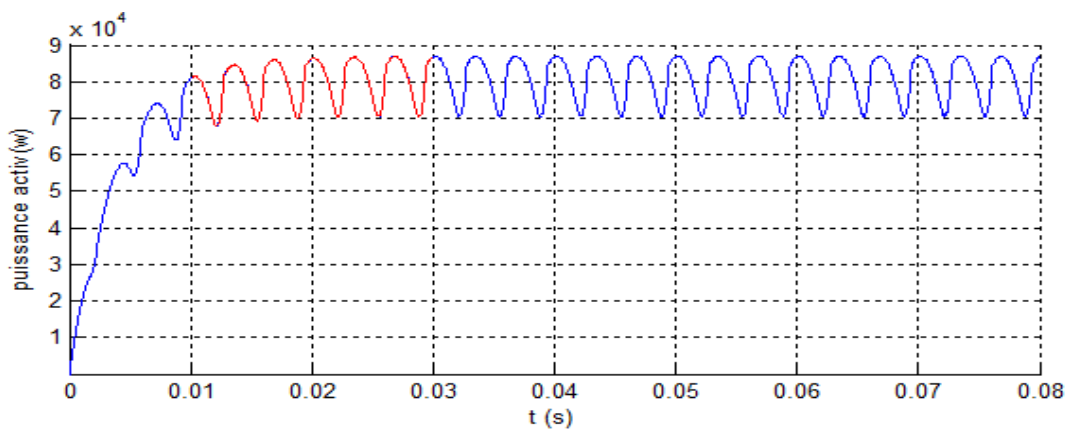


Fig. V.6 Puissance active instantanée

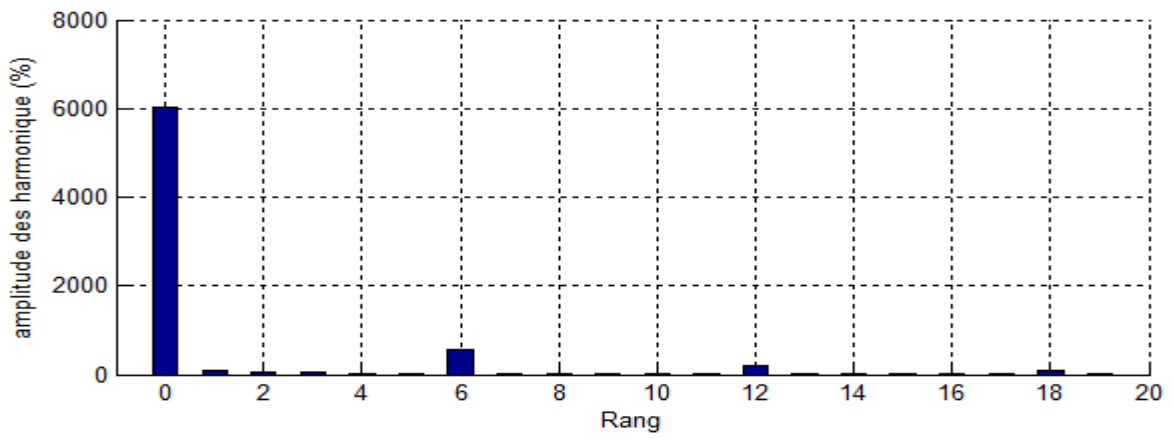


Fig.V.7 Spectre d'harmonique de Puissance active instantané

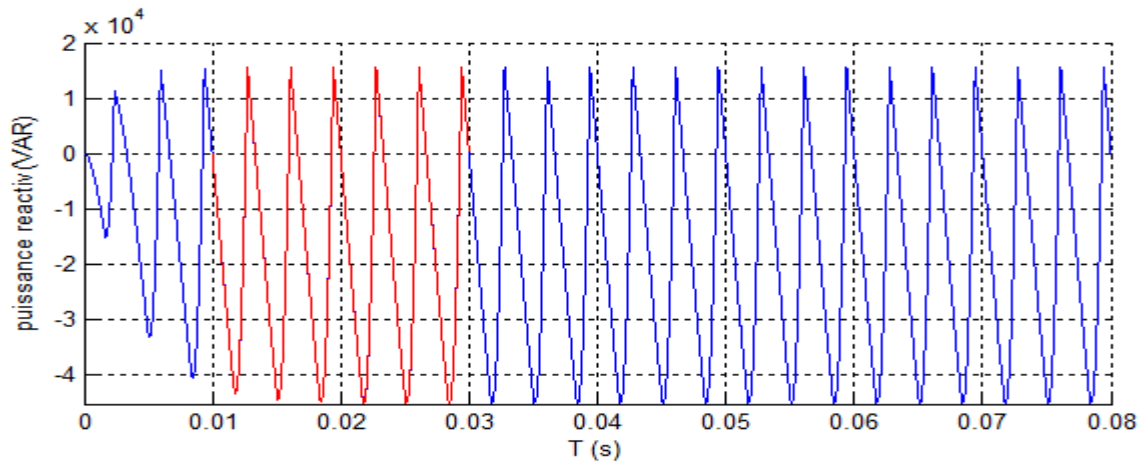


Fig. V.8 Puissance réactive instantanée

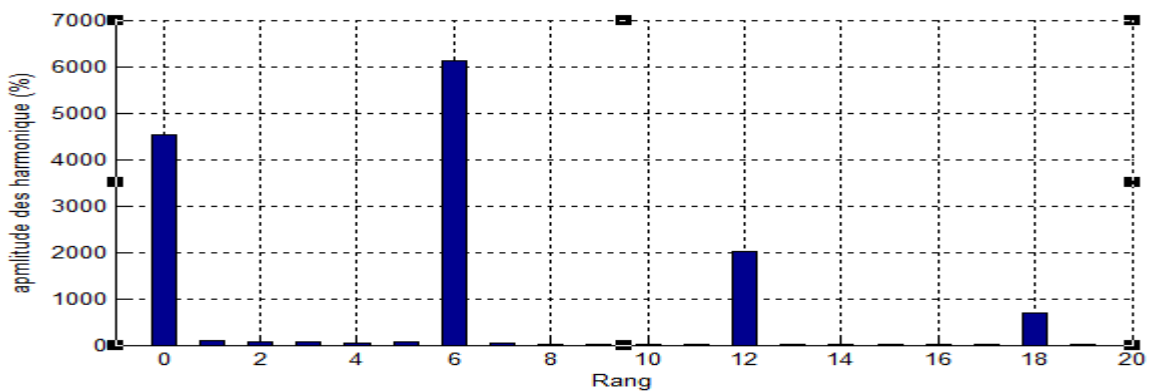


Fig.V.9 Spectres d'harmoniques de Puissance réactive instantanée

V.7.2 Identification de courant harmonique

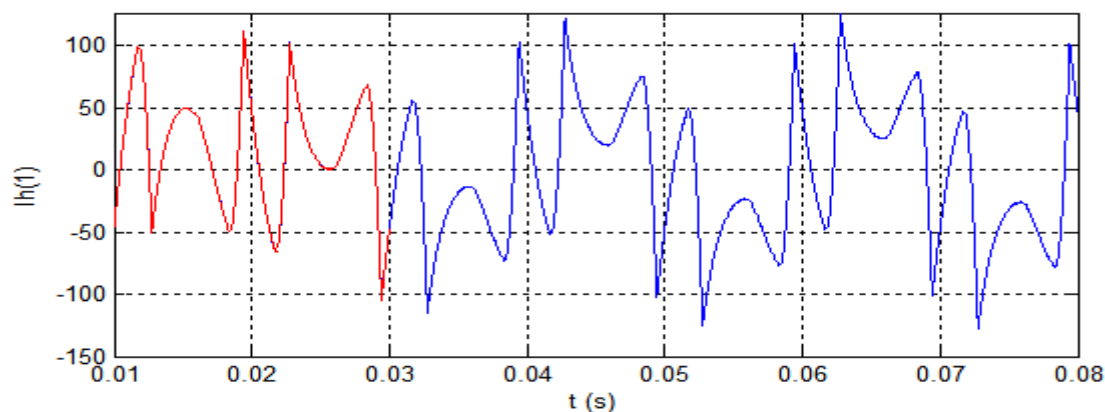


Fig. V.10 Courant harmonique de référence i_{h1}

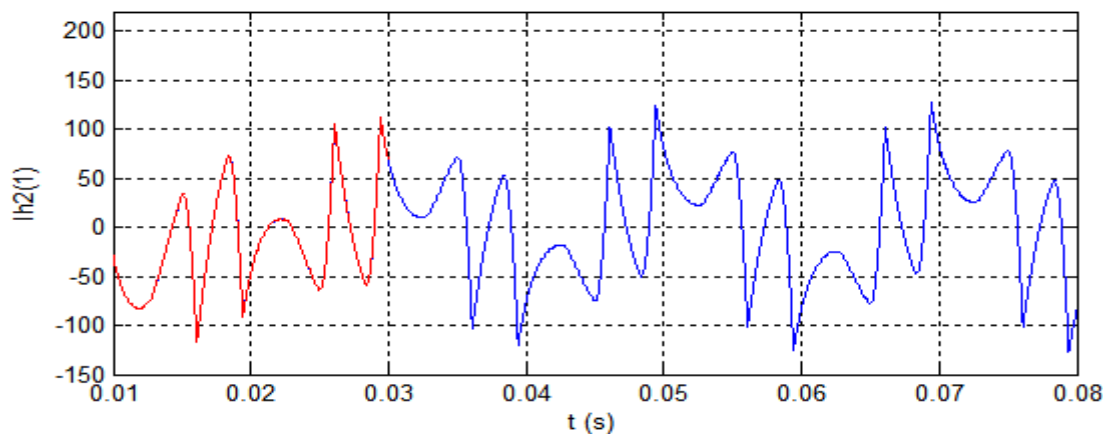


Fig. V.11 Courant harmonique de référence i_{h2}

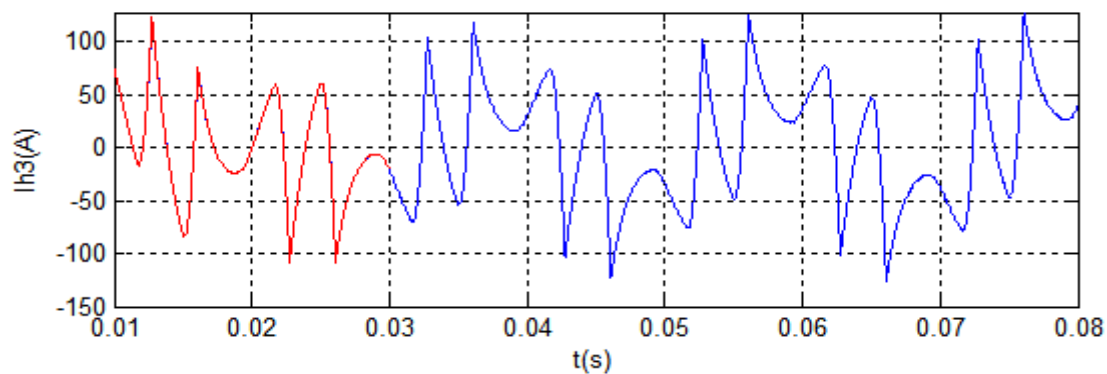
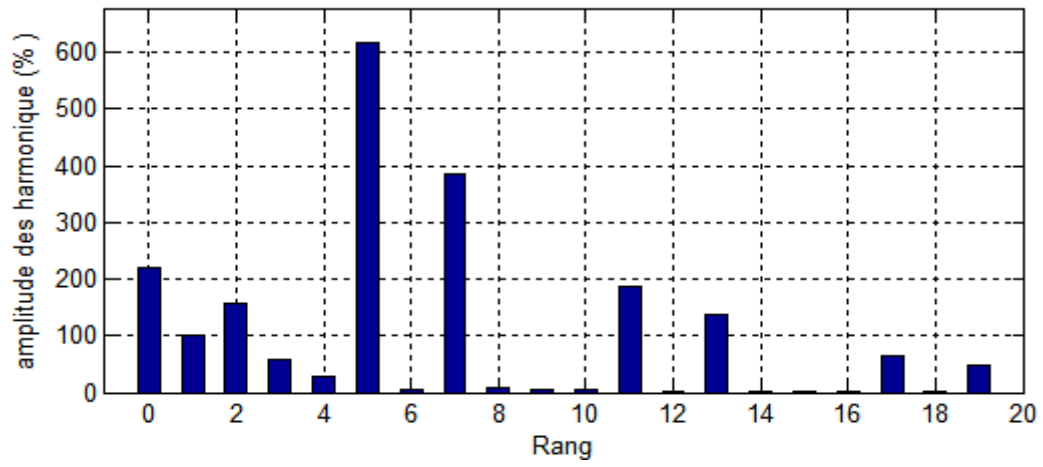
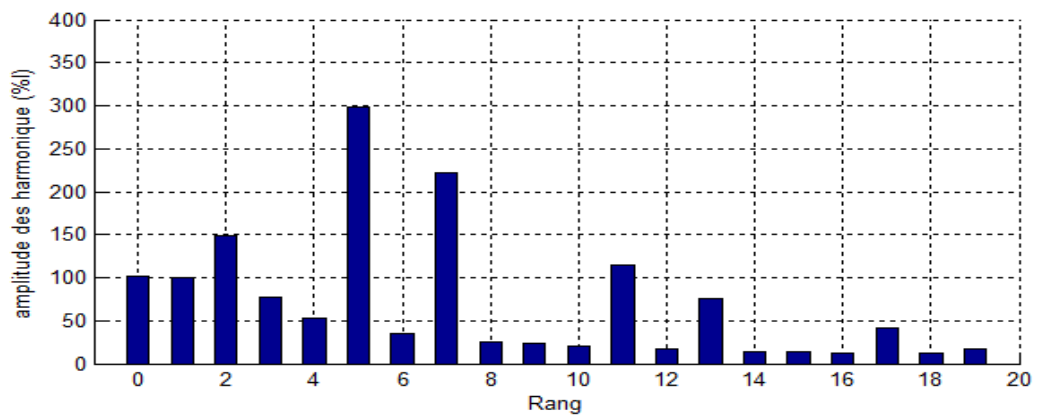


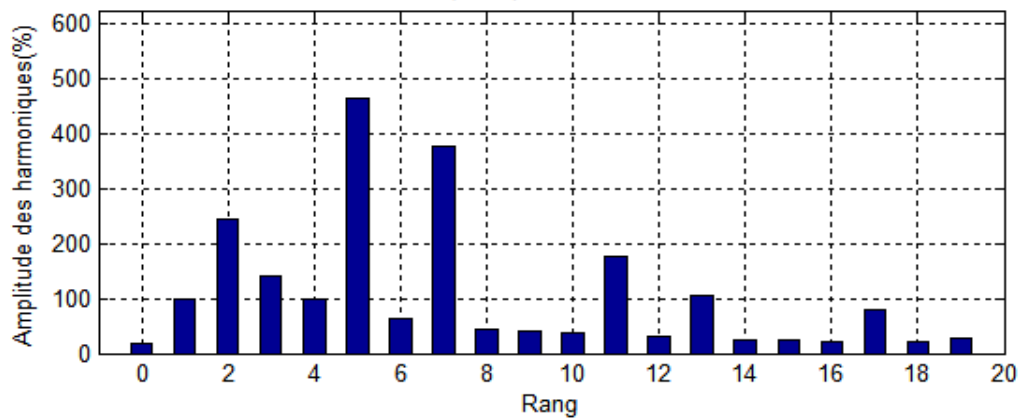
Fig. V.12 Courant harmonique de référence i_{h3}



(a)



(b)



(c)

Fig. V.13 Les spectres des courants harmoniques de référence ih1, ih2 et ih3

V.8 Résultats de la simulation par commande à commande MLI

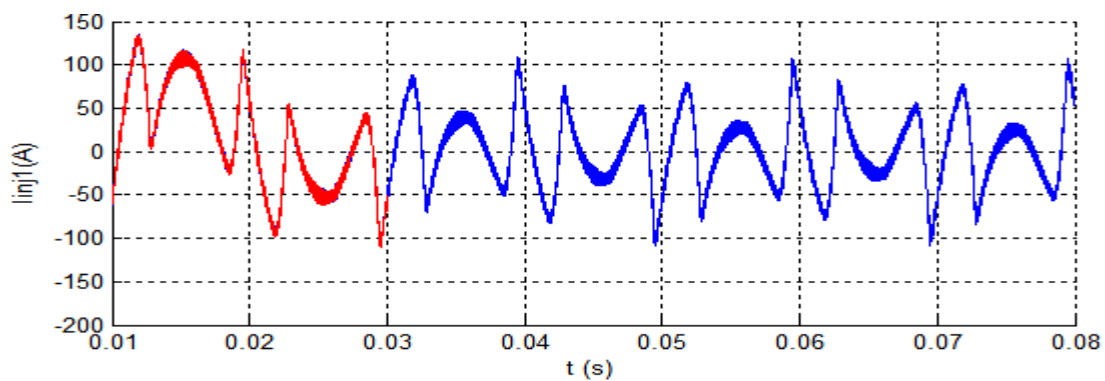


Fig. V.14 Le courant injecté par l'onduleur i_{inj1}

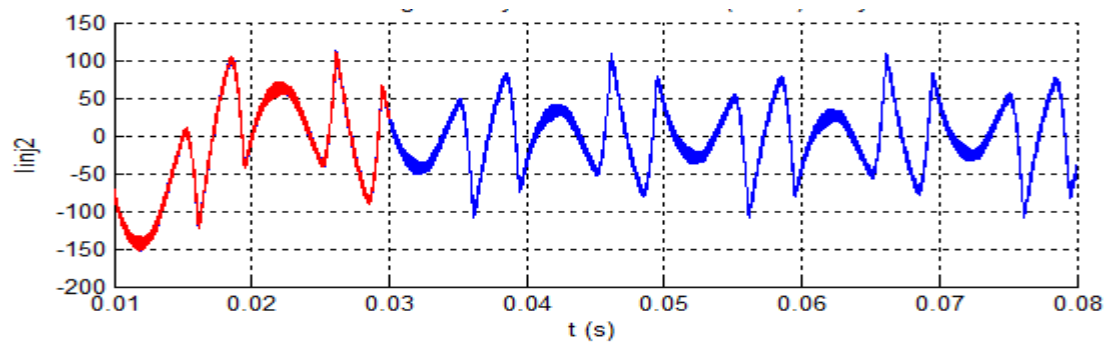


Fig V.15 Le courant injecté par l'onduleur i_{inj2}

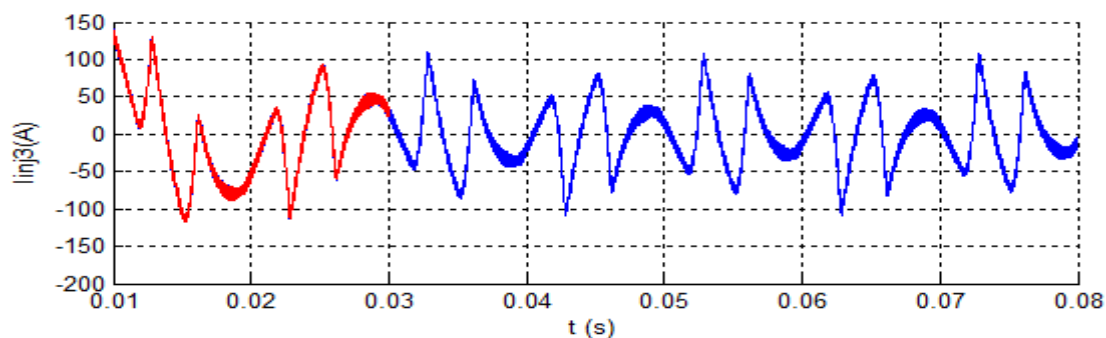
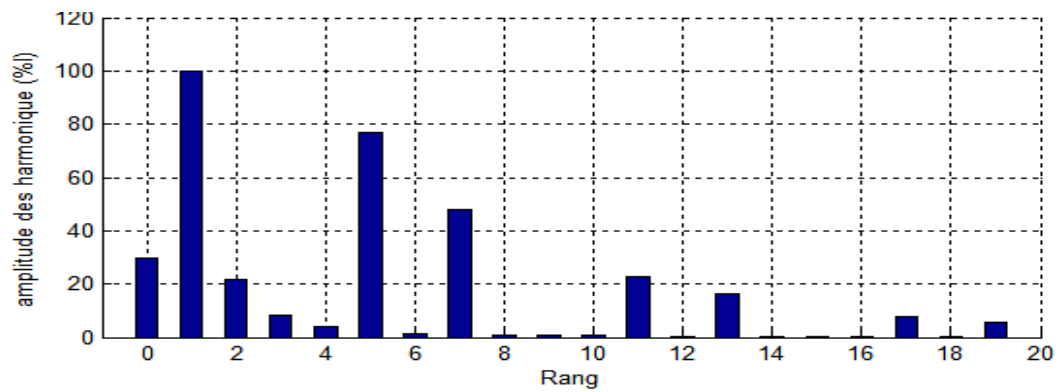
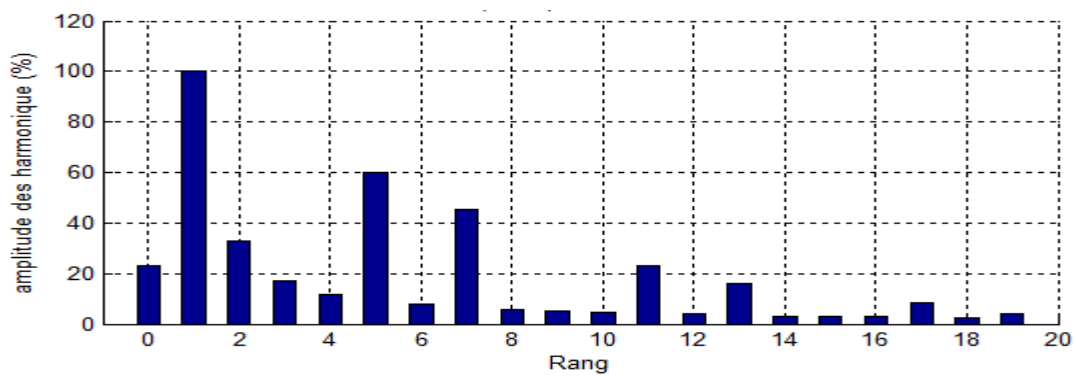


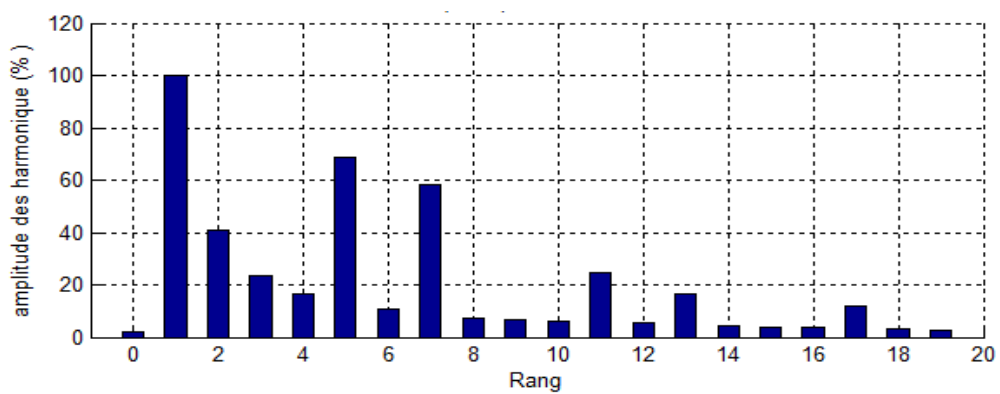
Fig V.16 Le courant injecté par l'onduleur i_{inj3}



(a)



(b)



(c)

Fig V.17 Les spectres des courants injectés par l'onduleur *if1*, *if2* et *if3*

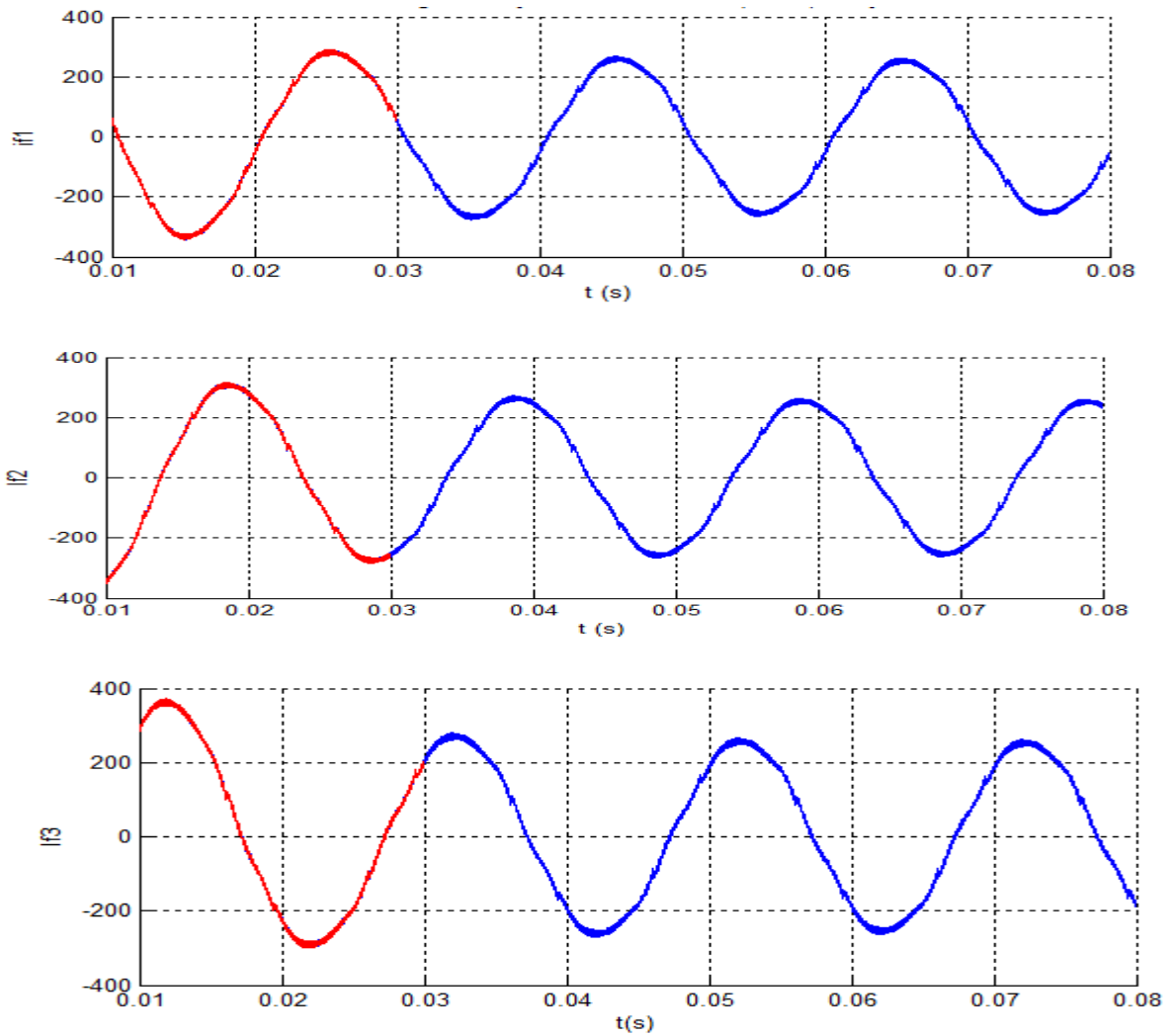


Fig. V.18 Courant de source $if1,if2,if3$ après filtrage

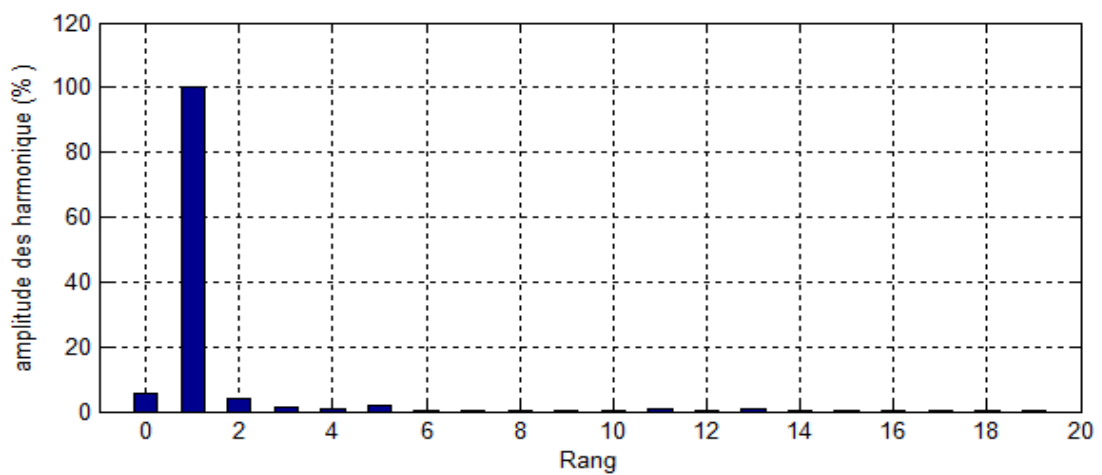


Fig. V.19 Les spectres des courants après filtrage

V.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le système pour la simulation du système filtre actif parallèle – redresseur a l'aide de méthode conventionnel par commande MLI avec L'optimisation des différents paramètres du système comprenant le réseau, la charge polluante et filtre actif permet d'aboutir à des résultats satisfaisants. Du point de vue spectre un courant de source sinusoïdale par l'élimination des courants d'harmoniques alors l'avantage principal de cette méthode est la stabilité du système.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions de dépollution des réseaux électriques.

A la lumière de l'étude bibliographique, nous avons pu constater que les recherches sur les compensateurs actifs sont bien répondues dans le monde non seulement pour la compensation des harmoniques mais également pour éliminer les différents types de perturbations pouvant affecter le réseau et aussi compenser l'énergie réactive.

Dans le chapitre I, nous avons montré l'influence des harmoniques sur le réseau électrique, cette influence est clairement vu en plusieurs points, par exemple la dégradation du facteur de puissance et l'échauffement des appareils électriques. On a également cité sans détailler les solutions pouvant remédier à ce problème de pollution harmonique.

Et Dans le deuxième chapitre on présentera la modélisation du redresseur à diode, comme charge non linéaire.

Et Pour déterminer les courants harmoniques, on a utilisé dans le chapitre III la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. La simulation numérique nous a démontré la grande efficacité et la précision de celle-ci, on a également montré et expliqué d'autres méthodes d'identification des harmoniques dans ce chapitre.

Le développement du modèle du filtre actif parallèle a été élaboré dans le chapitre IV qui englobe aussi les stratégies de commande, à savoir :

- La commande MLI.

par ce filtre actif parallèle est un onduleur triphasé à deux niveaux alimenté une tension. On a terminé ce travail par le chapitre V par les résultats de simulation de l'application de ce filtre à une charge non linéaire constituée par un redresseur à diodes.

Références bibliographiques

- [1] Mr. Tadjer Sid-Ahmed, «Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque "GPV" », mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, 2008.
- [2] Bedir Zouheir, Rhaskali Walid, Benlemlarak Bilal, «Compensation Du Courant Harmonique Genere Par Une Charge Non Lineaire», mémoire d'ingénieur, Université de Msila, 2011.
- [3] C. Collombet, J.M. Lupin, J. Schonek, « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement », Cahier technique n° 152, édition septembre 1999.
- [4] Boudache Abdelkrim, GALOUL Fayçal, « Etude Par Simulation D'un Filtre Actif Parallele », mémoire d'ingénieur, Université de Msila, 2006.
- [5] Boufassa Rabah, Mekarnia Omar, « Modelisation Et Commande D'un Upfc Utilise En Filtrage Des Courants Harmoniques D'un Reseau Electrique»,Mémoire d'ingénieur, Avenue Hassen-BADI, EL-Harrach, ALGER, Juin 2007.
- [6] Mohamed Muftah ABDUSALAM, «Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales», Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, Mai 2008.
- [7] L.Sabr et D.Abdelghani « commande MLI d'un redresseur multi niveaux »
M'sila 2004 /2005
- [8] G.tarek Systèmes d'entrainements électrique
Ecole militaire polytechnique Thèse : de magister « Etude et réalisation d'un Compensateur actif de puissance commandé par DSP » En 2004.
- [9] Aboubou A, Zouzou S.E, « Contribution à la compensation de la pollution harmonique en utilisant un filtre actif parallèle commande par logique floue », N°03, pp. 59-63, Janvier 2003.
- [10] Mohamed Alaa Eddin Alali, «Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension (Automatisation des systèmes de puissance électrique)», Thèse de Doctorat de l'université Louis Pasteur-Strasbourg, 2002.
-

-
- [11] M.C. Benslimane, « Compensation générale des harmoniques « Etude dimensionnement et commande d'un filtre actif parallèle », Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, 2002.
- [12] R.Kiffouche, « Identification des harmoniques et génération de courants de référence 'Application au convertisseur statiques' » Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Juillet 2006.
- [13] L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen. « Evaluation of Harmonic Detection Methods for Active Power Filter Applications». Conférence APEC'05, vol. 1, p. 635-641, Mars 2005.
- [14] Hideaki Fujita and Hirohmi Akagi, "A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-Series Connection of Passive and Active Filters", IEEE Transaction On Industry Applications, VOL. 27, NO. 6, pp.1020-1025, NOVEMBER /DECEMBER 1991.
- [15] R.Kiffouche, « Identification des harmoniques et génération de courants de référence 'Application au convertisseur statiques » Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Juillet 2006.
- [16] Djaffar Ould Abdeslam, Patrice Wira, Jean Mercklé, Yves-André Chapuis, Damien Flieller, « Stratégie neuromimétique d'identification et de commande d'un filtre actif parallèle », RS - RIGE. Vol. 9, n°. 1, pp 35-64, 2006.
- [17] Hamouda Noureddine, «Etude Comparative des Techniques de Filtrage des Harmoniques de Courant», Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS-SETIF,2010.
- [18] ZEBIRI Malek ET RAHALI Antar«Compensation des harmoniques par filtre hybride» M'sila : 2005/2006
- [19] Abdelmalek Boulahia, « Etude de convertisseur statique destinés à la qualité de l'Energie Electrique », Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2009.
- [20] H. Kouara, « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » Mémoire de magister de Batna 2006.
- [21] M.Mokhtar: « MATLAB 5.2 & 5.3 et simmulink 2&3 pour étudiants et ingénieurs ». (Édition springer 2000).
-

[22] Merabet Leila, «Etude d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des courants harmoniques générés par un pont redresseur triphasé».

Thèse de Magister de l'université Badji Mokhtar Annaba, 2001.

[23] Ait Hammouda. I, Cherouat. H, «Commande non linéaire d'un filtre actif parallèle à trois niveaux».Mémoire d'ingénieur, école nationale polytechnique, juin 2000.
