

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande électrique

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Filtrage actif d'un réseau

Électrique

Présenté par :
Boucif Abdelmalek
Soutenu le : 04 Juin 2014

Devant le jury composé de :

Mr. Bourek Amor

Mr. Golea Ammar

Mr. Ghamri Ahmed

Maitre conference. A

Professeur

Maitre conference. B

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2013 / 2014

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Filtrage actif d'un réseau
Électrique

Présenté par :
Boucif Abdelmalek

Avis favorable de l'encadreur :
Golea Ammar

Avis favorable du Président du Jury
Bourek Amor

Cachet et signature



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande électrique

Thème :

Filtrage actif d'un réseau électrique

Proposé par : **Boucif Abdelmalek**

Dirigé par : **Golea Ammar**

RESUMES (Français et Arabe)

Résumé :

Les récents développements apparus dans plusieurs domaines de l'utilisation de l'énergie électrique surtout dans le domaine de l'électronique de puissance, ont causée de la détérioration de la qualité de l'onde de courant fournie, en raison de l'apparition des harmoniques dans le réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique, ayant ainsi des effets néfastes sur les charges sensibles alimentées par ce même réseau.

Puisque la présence de ces harmoniques est due à l'utilisation croissante de ces appareils pollueurs, leur traitement donc revient à exiger aux consommateurs pollueurs de réduire à des valeurs acceptables les taux des harmoniques qu'ils injectent dans le réseau.

Plusieurs solutions adoptées pour l'élimination de ces harmoniques : le filtrage passif et le filtrage actif. L'utilisation du filtre actif est la plus efficace et la plus appropriée.

Dans ce travail nous avons abordé le principe de fonctionnement du filtre passif. Nous avons examiné les deux types de ce filtre : filtre passif résonnant, filtre passif amorti. En deuxième partie nous avons traité le redresseur MLI à absorption sinusoïdale et le filtre actif parallèle. Pour le filtre actif shunt deux méthodes d'identification des courants perturbateurs sont présentées : méthode des courants et méthode des puissances instantanées. Pour la régulation du courant nous avons utilisé les deux méthodes, qui sont la commande MLI sinus triangle et la régulation par hystérésis. Les résultats de simulation sont obtenus en utilisant le logiciel (PSIM).

ملخص:

إن التطورات الأخيرة التي ظهرت في عدة ميادين أدت إلى ازدياد استعمال الطاقة الكهربائية خاصة في ميدان إلكترونيك الاستطاعة (القوة) الشيء الذي أدى إلى تسببت في تدهور نوعية موجة التيار الكهربائي. بسبب ظهور و تضاعف تواجد التوافقيات في شبكة نقل و توزيع الطاقة الكهربائية و بالتالي إفساد و تعطيل بعض الأجهزة المربوطة بالشبكة و ازدياد استهلاك الطاقة الغير فعالة. بما إن معظم هذه التوافقيات مصدرها يكمن في الاستعمال المتزايد لتلك الأجهزة الملوثة فان مكافحتها تعود إلى إرغام مستعمليها على اتخاذ إجراءات لتخفيض و تقليص نسبة هذه التوافقيات إلى ما هو مقبول من طرف المعايير الدولية. هناك عدة طرق من أجل التخلص من هذه التوافقيات: استعمال المصفاة (filtre) الغير فعالة و المصفاة الفعالة حيث أن هذه الأخيرة تعتبر الأمثل و الأنجع. قمنا في دراستنا هذه بشرح طريقة عمل كل من المصفاة الغير فعالة و استعراض نوعين منها كما قمنا بدراسة المصفاة الفعالة المتوازية من أجل الحصول على التيارات المرجعية استخدمنا طريقة التيارات الكهربائية و طريقة الاستطاعة الآتية. لهذا قمنا باستعمال البرنامج في الإعلام الآلي (PSIM) من أجل استعراض النتائج المختلفة و تقييم الايجابيات و السلبيات لكل طريقة.

Dédicaces

A mes parents qui m'ont donné le jour et m'ont apporté le soutien financier et moral si nécessaires à mes études ;

A mes sœurs qui sont un prolongement de ma personnalité ; à mon promoteur le professeur GOLEA OMmAR grâce à qui ce travail a vu le jour ;

A mes amis, qui par leur affection exemplaire et leurs conseils ont aplani devant moi les difficultés de la vie et des études ;

A tous ceux qui, mus par l'humanisme et l'amour du savoir, ont consacré leur vie

A éloigner le spectre terrible de l'ignorance, pour faciliter la vie de l'homme, guérir ses maux ou du moins les soulager ; je dédie humblement mon travail.

ABD ELMALEK

BOUCIF

Remerciements

Je remerciement les plus sincères ;

A monsieur le professeur GOLFA OMAR, pour le soutien qui j'apporté pendant la période de réalisation de ce modeste travail ainsi pour ses conseils précieux et surtout pour la totale confiance qui j'accordé.

A département de génie électrique

Dont ce travail est réalisé, pour leur accueil familial, et de plus pour leurs directives objectives.

Et en fin je remercier tous mes ami(e)s, chacun à son nom.

Liste des figures :

Figure (I.1) : Pont redresseur triphasé à diodes alimentant une charge résistive.

Figure (I.2) : Courants absorbés par un redresseur à diodes.

Figure (I.3) : le filtre passif a) Filtre passif résonnant b) Filtre passif amorti.

Figure(I.4) : Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Figure(I.5) : Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Figure (I.6) : Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.

Figure (II.1) : Filtre passif résonant.

Figure (II.2) : Filtre passif amorti.

Figure (II.3) : Raccordement d'une inductance anti-harmonique.

Figure (II.4) : schéma bloc du pont à diodes.

Figure (II.5) : les allures des courants de la source avant le filtrage.

Figure (II.6) : le spectre d'harmonique avant le filtrage.

Figure (II.7) : le THD de courant avant le filtrage.

Figure (II.8) : schéma du pont a diodes avec filtre résonnant accordé sur le rang 5.

Figure (II.9) : Allures des courants de la source après le filtrage de l'harmonique 5.

Figure (II.10) : le spectre d'harmonique après le filtrage de l'harmonique 5.

Figure (II.11) : le THD de courant après le filtrage de l'harmonique 5.

Figure (II.12) : Allures des courants de la source après le filtrage de l'harmonique 7.

Figure (II.13) : le spectre d'harmonique après le filtrage de l'harmonique 7.

Figure (II.14) : le THD de courant après le filtrage de l'harmonique 7.

Figure (III.15) : Schéma unifilaire d'un pont redresseur connecté au réseau.

Figure (III.16) : Pont redresseur.

Figure (III.17) : Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

Figure (III.18) : Principe de la stratégie sinus-triangulaire.

Figure (III.19) : Principe du Contrôle par hystérésis.

Figure (III.20) : schéma de régulation du redresseur MLI.

Figure (III.21) : schéma de contrôle simplifié.

Figure (II.22) : schéma bloc du redresseur MLI sinus-triangulaire sans régulation du bus continu.

Figure (III.23) : Allure des tensions V_{ref} et V_{tria} (référence et porteuse).

Figure (III.24) : Allure du courant I_a de la source.

Figure (III.25) : Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source.

Figure (III.26) : Le THD de courant du réseau.

Figure (III.27) : Tension d'entrée du pont convertisseur V_{an} .

Figure (III.28) : schéma bloc du redresseur MLI à hystérésis sans régulation du bus continu.

Figure (III.29) : Allure du courant I_a de la source.

Figure (III.30) : Allure du courant de référence I_{aref} .

Figure (III.31) : Allures des courants I_a , $I_{aref}+\Delta i$ et $I_{aref}-\Delta i$.

Figure (III.32) : Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source.

Figure (III.33) : Le THD de courant du réseau.

Figure (III.34) : Tension d'entrée du pont convertisseur V_{an} .

Figure (III.35) : schéma bloc du redresseur MLI avec régulation du bus continu.

Figure (III.36) : Allure des tensions V_{dc} et V_{dcref} .

Figure (III.37) : Allure du courant I_a de la source.

Figure (III.38) : Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source.

Figure (III.39) : Le THD de courant du réseau.

Figure (III.40) : Tension d'entrée du pont convertisseur V_{an} .

Figure (III.41) : Allure des tensions V_{dc} et V_{dcref} .

Figure (III.42) : Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source.

Figure (IV.1) : Structure générale du filtre actif parallèle.

Figure (IV.2) : Schéma représentant le principe d'identification de courant harmonique.

Figure (IV.3) : Algorithme de la méthode des courants associé au filtre actif parallèle.

Figure (IV.4) : Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

Figure (IV.5) : Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances.

Figure (IV.6) : Schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par MLI sinus-triangulaire.

Figure (IV.7) : Allures des courants de la source après compensation.

Figure (IV.8) : Allure du courant de la charge.

Figure (IV.9) : Allure du courant injecté par le filtre actif.

Figure (IV.10) : Allures du courant harmonique de référence et le courant injecté par le filtre actif.

Figure (IV.11) : Allures du courant et de la tension de la source.

Figure (IV.12) : le THD de courant de la source après compensation.

Figure (IV.13) : schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par hystérésis.

Figure (IV.14) : Allures des courants de la source après compensation.

Figure (IV.15) : Allure du courant de la charge.

Figure (IV.16) : Allure du courant injecté par le filtre actif.

Figure (IV.17) : Allures du courant harmonique de référence I_{ah-ref} et I_{ainj} le courant injecté par le filtre actif.

Figure (IV.18) : Allures du courant et de la tension de la source après compensation.

Figure (IV.29) : le THD de courant de la source.

Figure (IV.20) : Allure de la tension aux borne du condensateur à l'entrée de l'onduleur.

Liste des tableaux :

Tableau (I.1) : Limites des composantes harmoniques en courant.

Tableau (I.2) : Limites des émissions de courants harmoniques.

Tableau (I.3) : Niveaux de compatibilité des harmoniques de tension (CEI-1000-2-2).

Tableau (II.1) : paramètre de simulation du filtre passif.

Tableau (III.2) : les huit états possibles des interrupteurs de redresseur MLI.

Tableau (III.3) : paramètres de simulation où redresseur MLI est commandé par MLI sinus-triangulaire.

Tableau (III.4) : paramètres de simulation où redresseur MLI est commandé par hystérésis.

Tableau (III.5) : paramètres de simulation où redresseur MLI est commandé par hystérésis avec régulation de la tension du bus continue.

Liste des abréviations :

THD : Taux de distorsion harmonique

F_p : Le facteur de puissance.

F_{dis} : Le facteur de distorsion.

CEM : Les normes définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique.

- **CEI** : au niveau international.
- **CENELEC** : au niveau européen.
- **l'UTE et le CEF** : au niveau français.

FAP : filtre actif parallèle.

FAS : Filtre actif série.

MLI : Modulation en largeur d'impulsions.

GTO : Le thyristor à extinction par la gâchette, en anglais *Gâte Turne-Off Thyristor*.

IGBT : Le transistor bipolaire à grille isolée, en anglais *Insulated Gate Bipolar Transistor*.

Sommaire

Chapitre I : Généralités sur la pollution harmonique

Introduction générale.....	1
I.1 Introduction	2
I.2 Les sources d'harmoniques	2
I.3 Problèmes liés aux harmoniques	2
I.3.1 Décomposition d'un Courant Distordu Périodique en Série de Fourier.....	3
I.4 conséquences des harmoniques.....	4
I.4.1 Effets instantanés.....	4
I.4.2 Effets à terme	5
I.5 Caractérisation des perturbations harmoniques.....	5
I.5.1 Le taux de distorsion harmoniques THD.....	6
I.5.2 Le facteur de puissance lié à la consommation de l'énergie réactive.....	6
I.6 les normes imposées sur le THD	7
I.7 Solutions de filtrage des harmoniques.....	9
I.7.1 Les méthodes classiques (Le filtrage passif).....	9
I.7.2 Les méthodes modernes (Le filtrage actif).....	10
I.7.2.1 les filtres actifs parallèles FAP.....	10
I.7.2.2.Filtre actif série FAS.....	11
I.7.2.3 filtres hybrides actifs et passifs.....	11
I.7.3.1.la configuration des filtres hybrides	11
I.8 conclusion	13

Chapitre II : Filtrage passif

II.1 Introduction	14
II.2 Filtrage passif	14
II.2.1 Types des filtres passifs.....	14
II.2.2 Avantages et inconvénients des filtres passifs.....	17
II.2.3 Simulation du filtre passif.....	18
II.2.4 Interprétation des résultats.....	22
II.3 Conclusion	23

Chapitre III : redresseur à commande MLI

III.1 Introduction	24
III.2 Redresseur à commande MLI	24
III.2.1 Le principe de fonctionnement.....	24
III.2.2 Modélisation du redresseur MLI.....	25
III.2.3 Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé	27
III.3 Les techniques de commande de redresseur MLI	28
III.3.1 redresseur MLI sinus-triangulaire sans régulation de la tension du bus continu.....	28
III.3.1.1. Le principe de la commande sinus-triangulaire.....	28
III.3.1.2. Les inconvénients de la MLI.....	30
III.3.2 redresseur MLI a hystérésis sans régulation de la tension du bus continu.....	30
III.3.2.1. Le principe de la commande par hystérésis en courant.....	30
III.3.2.2. Inconvénients de la commande par hystérésis.....	31
III.3.3 redresseur MLI avec régulation de la tension du bus continu.....	31
III.3.3.1 Principe du redresseur MLI à absorption sinusoïdale.....	32
III.3.3.2 Régulateur proportionnel-intégral PI.....	34

III.4 simulation du redresseur MLI	34
III.4.1 redresseur MLI sinus-triangulaire sans régulation de la tension bus continu	34
III.4.1.1 résultats de simulation	35
III.4.1.2 interprétation des résultats	37
III.4.2 Redresseur MLI à hystérésis sans régulation de la tension du bus continu	37
III.4.2.1 résultats de simulation.....	38
III.4.2.2 interprétation des résultats	30
III.4.3 redresseur MLI à hystérésis avec régulation de la tension du bus continu	41
III.4.3.1 résultats de simulation	42
III.4.3.2 interprétation des résultats	43
III.4.3.3 variation de la tension de référence	44
III.5 Conclusion	45

Chapitre IV : filtre actif parallèle

IV.1 Introduction	46
IV.2 Filtre actif parallèle.....	46
IV.2.1 La structure générale du filtre actif parallèle	46
IV.2.2 Onduleur de tension triphasé	47
IV.2.3 Principe des onduleurs MLI.....	47
IV.3 Méthodes d'identification des courants harmoniques.....	48
IV.3.1 Généralités sur les méthodes d'identification	48
IV.3.2 Méthode des courants	48
III.3.2 .1 Algorithme de la méthode des courants.....	49
IV.3.3 Méthode des puissances instantanées.....	50
IV .3.3.1 Généralités sur les puissances instantanées.....	50
IV .3.3.2 Séparation des puissances perturbatrices	52
IV.4 Stratégie de l'identification	52
IV .4.1 Calcul des courants perturbateurs	52
IV .4.2 Algorithme d'identification	53
IV-5 Modélisation et simulation du filtre actif parallèle	53
IV.5.1 Méthode des courants	54
IV.5.1.1 résultats de simulation	54
IV.5.1.2 interprétation des résultats	59
IV.5.1.3 Utilisation d'une capacité comme élément de stockage d'énergie.....	60
IV.6 Conclusion	61
Conclusion Générale.....	62
Bibliographie.....	63
Annexe.....	64

Introduction générale :

Ces dernières années, l'utilisation des convertisseurs statiques dans les systèmes de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué aux progrès aux niveaux des performances et de l'efficacité de ces systèmes. Ces convertisseurs absorbent des courants non sinusoïdaux même s'ils sont alimentés par des tensions sinusoïdales. Ils se comportent alors comme des générateurs de courant perturbateur et consomment généralement de l'énergie réactive.

Dans le premier chapitre nous allons présenter les problèmes liés aux harmoniques et leur influence sur le réseau électrique. Ensuite nous présentons les solutions pour dépolluer le réseau. Pour faire face à ce problème, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation de filtre passif.

Dans le deuxième chapitre on présente le dimensionnement du filtre passif, cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère mais elle présente deux inconvénients majeurs. Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle du réseau. Le deuxième inconvénient est la dépendance des performances du filtre passif aux caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté. Dans ce chapitre aussi on présente le détail du redresseur commandé MLI, qui est classé comme une solution de ce problème.

Cependant, les progrès remarquables réalisés au cours des dernières années, dans le domaine des semi-conducteurs de puissance entièrement commandable, les thyristors et les transistors en particulier, ont permis de concevoir des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptable appelés compensateurs actifs d'harmoniques, ou encore filtre actif, dont l'objectif est l'élimination des problèmes intrinsèques des filtres passifs.

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier le filtre actif parallèle avec une structure d'un onduleur de tension.

Finalement, une conclusion générale est présentée, résumant les résultats obtenus.

I.1 Introduction :

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive.

Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde du courant du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale. Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les sources des harmoniques, l'influence du raccordement des convertisseurs statiques sur les réseaux électriques et leurs environnements et ensuite les normes. Enfin, nous présentons les solutions pour dépolluer les réseaux électriques.

I.2 Les sources d'harmoniques : [5]

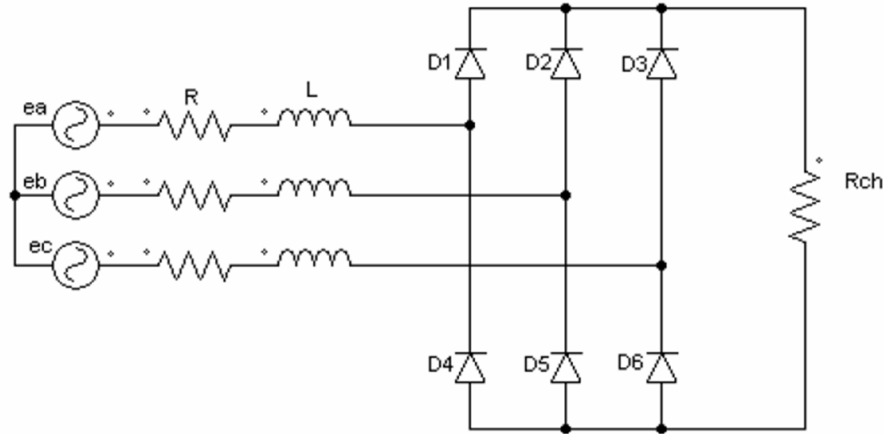
L'utilisation des équipements électriques comportant des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique. Ils ont contribué à la détérioration de la qualité du courant et de la tension des réseaux de distribution.

Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés.

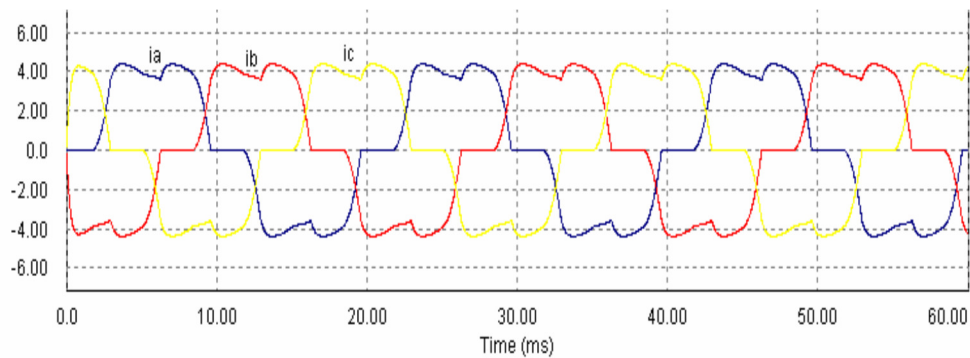
I.3 Problèmes liés aux harmoniques : [1] [4]

Certains appareils, contenant en général des éléments d'électronique de puissance, les différents convertisseurs sont vus comme étant des charges non linéaires qui injectent des courants harmoniques sur le réseau électrique, et absorbent un courant qui n'est pas sinusoïdal. sont principalement à l'origine de la distorsion harmonique présente sur le réseau. la Figure (I.1)

et (I.2) illustre les courants non sinusoïdaux absorbés par la charge non linéaire la plus répandue : le redresseur à diodes ou à thyristors. Ce dispositif génère les harmoniques impairs non multiples de 3 (dans le cas triphasé) $n = k6 \pm 1$, Les plus importants étant les harmoniques 5, 7, 11 et 13, La figure I-2 représente les courants absorbés par un redresseur à diode. [1]



Figure(I.1) : Pont redresseur triphasé à diodes alimentant une charge résistive



Figure(I.2) : Courants absorbés par un redresseur à diodes.

I.3.1 Décomposition d'un Courant Distordu Périodique en Série de Fourier: [4]

Avec les charges non-linéaires, les courants ne sont pas sinusoïdaux et peuvent être considérés comme la somme d'un courant sinusoïdal de 50/60Hz appelé fondamental et d'une série de courants sinusoïdaux de fréquences multiples de la fréquence fondamentale appelés harmoniques.

Le courant alternatif périodique déformé absorbé par une charge non-linéaire peut être décomposé en série de Fourier comme :

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

Avec : a_0, a_n, b_n , sont les coefficients de Fourier.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t \quad (\text{I.2})$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (\text{I.3})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (\text{I.4})$$

L'expression du courant d'une charge non-linéaire est :

$$i(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{I.5})$$

Où : n est un nombre entier.

φ_n est le déphasage de la composante harmonique à l'instant initial ($t = 0$).

D'une autre manière :

$$i(\omega t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{I.6})$$

$$I_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{et} \quad \varphi_n = \text{Arctg}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

Les harmoniques se distinguent par leur rang, de type pair ou impair. Les harmoniques de rang pair (2, 4, 6, 8...), très souvent négligeables en milieu industriel, s'annulent en raison de la symétrie du signal. Ils n'existent qu'en présence d'une composante continue. Par contre, les harmoniques de rang impair (3, 5, 7, 9...) sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique.

I.4 conséquences des harmoniques :[1]

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déformant l'allure du Courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donnent lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux type : les effets instantanés et les effets à terme.

I. 4.1 Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques :**

En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.

- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs :**

Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.

- **Erreurs dans les appareils de mesure :**

Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.

- **Vibrations et bruits :**

Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électro-magnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

I .4.2 Effets à terme :

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel et des lignes.

- **Echauffement des câbles et des équipements :**

Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du suréchauffement du neutre et les matériels bobines comme les transformateurs ou les moteurs.

- **Echauffement des condensateurs :**

L'échauffement est causé par les pertes dues au cycle d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont aussi sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

- **Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs :**

Un échauffement est causé par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, Circuits magnétiques) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques.

I.5 Caractérisation des perturbations harmoniques:[1]

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime de forme. 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.5.1 Le taux de distorsion harmoniques THD :

L'étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformé. Il est donné par l'expression suivante :

$$\text{THD (\%)} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n i_{ci}^2}}{i_{c1}} \quad (\text{I.7})$$

Avec i_{c1} la valeur efficace du courant fondamental et i_{ci} les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence.

I.5.2 Le facteur de puissance lié à la consommation de l'énergie réactive :

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 :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.8})$$

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant avec :

$$D = 3V \sqrt{I_c^2 + I_{c1}^2} \quad (\text{I.9})$$

Où I_c est la valeur efficace du courant de la charge.

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance F_p est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.10})$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1, en posant:

$$P = 3V I_{c1} \cos \Phi \quad (\text{I.11})$$

On aura

$$F_p = \frac{I_{c1}}{I_c} \cos \Phi = F_{dis} \cos \Phi \quad (\text{I.12})$$

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît. Φ représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension. Afin d'éviter les désagréments causés par la présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposées aux utilisateurs.

I.6 les normes imposées sur le THD : [5]

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

- au niveau international par la CEI,
- au niveau européen par le CENELEC,
- au niveau français, par l'UTE et le CEF,

En effet, ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré.

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs,...etc. Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de :

- faciliter les échanges dans le monde en supprimant les barrières techniques,
- assurer la qualité des produits,
- contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits,
- contribuer à la protection de l'environnement et à la qualité de vie.

Au niveau international (CEI), les normes CEI 61000 publiées dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM) sont divisées en plusieurs parties, conformément à la structure suivante:

- 1- Généralités,
- 2- Environnement,
- 3- Limites,
- 4- Techniques d'essais et de mesures,
- 5- Guide d'installation et d'atténuation,
- 6- Normes génériques.

Chaque partie est divisée en plusieurs sous-parties dont certaines ont été rendues obligatoires par la directive 89/336/CEE dans l'Union Européenne et retranscrites dans les droits nationaux sous l'appellation NF EN 61000 (en France). L'application de ces directives est obligatoire pour bénéficier du marquage CE (Communauté Européenne). L'apposition de marquage indique donc la conformité du produit aux exigences essentielles de ces directives afin d'avoir le droit de commercialiser les produits concernés dans l'Union Européenne. Pour les réseaux électriques, les recommandations d'EDF pour les tensions sont :

- Pour un harmonique pair : $\frac{v_h}{v_1} \leq 0.6 \%$
- Pour un harmonique impair : $\frac{v_h}{v_1} \leq 1 \%$
- Pour le taux de distorsion global de tension : THD < 1,6 %.

Il s'agit de limitations qui sont maintenant très anciennes (plus de 20ans). Ci-dessous, nous allons détailler les normes internationales les plus récentes concernant les courants et les tensions.

Au niveau international (CEI), les normes CEI-1000 définissent les niveaux des courants et des tensions harmoniques à respecter. Le tableau. I.1 présente la norme CEI-1000- 3-2 qui fixe la limitation des courants injectés dans un réseau public basse tension pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi, du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme.

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 * 8 / h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 * 15 / h$		

Tableau (I.1) Limites des composantes harmoniques en courant.

La norme (CEI-1000-3-4) spécifie les limites d'émissions de courants harmoniques des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales comprises entre 230 V (monophasé) et 600 V (triphase).

Rang	Courant harmonique en % du fondamental
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2.0
15	0.7
17	1.2
19	1.1
21	≤ 0.6
23	0.9
25	0.8
27	≤ 0.6
29	0.7
31	0.7
≥33	≤ 0.6
pair	≤ 0.6 ou 0.158/h

Tableau (I.2) Limites des émissions de courants harmoniques.

Les normes CEI-1000-2-2 et CEI-1000-2-4 précisent le niveau des harmoniques de tension à respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution basse tension, public et industriel respectivement. Le tableau I.3 présente les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension.

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang	Tension harmonique en % du fondamental	Rang	Tension harmonique en % du fondamental	Rang	Tension harmonique en % du fondamental
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			> 12	0.2
25	1.5				
> 25	0.2+0.5*25/k				

Tableau (I.3) Niveaux de compatibilité des harmoniques de tension (CEI-1000-2-2).

I.7 Solutions de filtrage des harmoniques : [1]

On peut regrouper les solutions visant à réduire les perturbations harmoniques en deux groupes : les solutions classiques et les solutions modernes.

I.7.1 Les méthodes classiques (Le filtrage passif) : [2.3]

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, résistance) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation.

ce 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.

Ce filtre sera étudié en détail au chapitre II.



Figure (I.3) a) Filtre passif résonnant

b) Filtre passif amorti

I.7.2 Les méthodes modernes (Le filtrage actif): [2], [4]

Les solutions traditionnelles de dépollution ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs de puissance (Active Power Filters) sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur [4].

I.7.2.1 les filtres actifs parallèles FAP: [2]

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau est le plus souvent contrôlé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseaux sera ainsi sinusoïdal, cependant la tension au point de raccordement ne le sera que si la tension ne contient pas d'harmoniques. Ainsi l'objectif d'un filtre parallèle générateur de courant consiste à empêcher les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre. Le dimensionnement du

filtre actif est lié au courant harmonique à générer. La majorité des filtres actifs parallèles actuellement installés sur les réseaux électriques fonctionne selon ce principe.

I.7.2.2. Filtre actif série FAS : [2]

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose à une éventuelle tension harmonique venant de la source et également à celle provoquée par la circulation du courant harmonique de la charge polluante à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge polluante est purement sinusoïdale, ce qui n'est pas le cas du courant dans le réseau car celui-ci est traversé par la totalité du courant de la charge.

I.7.2.3 filtres hybrides actifs et passifs : [2]

Malgré la grande attention portée sur les filtres actifs, leur application industrielle reste limitée à certains pays où les solutions traditionnelles sont inefficaces face à la prolifération des équipements polluants de fortes puissances sur un réseau qui n'est pas assez puissant partout. L'application industrielle de ces nouveaux dispositifs de filtrage est freinée par leur coût.

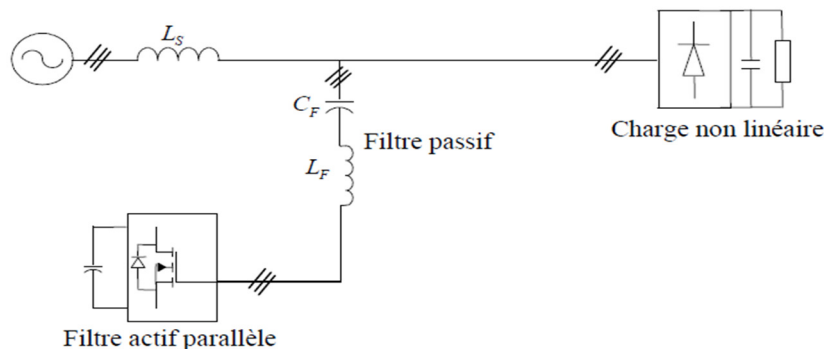
Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs et ainsi augmenter leur potentialité d'application, l'association de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs semble être une solution prometteuse. Donc on peut trouver plusieurs configurations, en voici quelque une :

- Filtre actif série associée à un filtre passif parallèle ;
- Filtre actif en série avec filtre passif parallèle ;
- Filtre actif parallèle associée à un filtre passif parallèle.

I.7.3.1. la configuration des filtres hybrides : [5]

- **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.4).

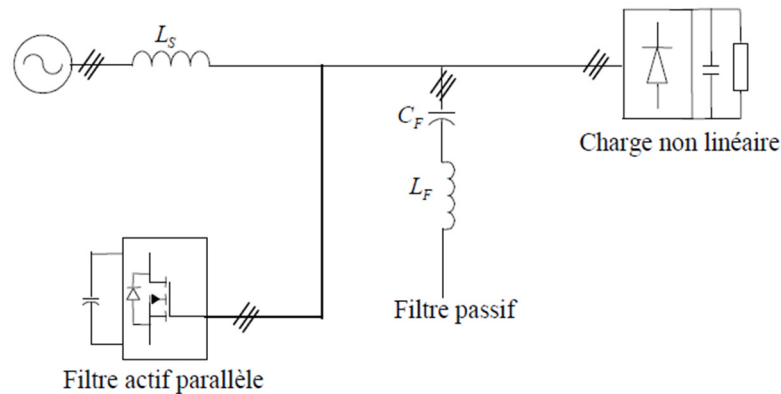


Figure(I.4) Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

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.

- **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.



Figure(I.5) Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

- **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.6) illustre cette topologie.

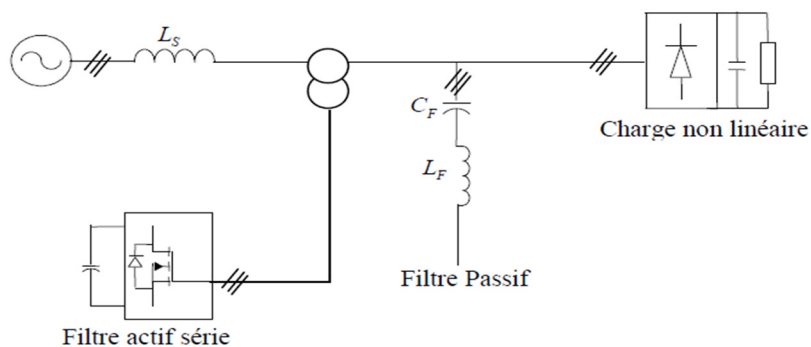


Figure (I.6) Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.

I.8 conclusion :

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Lorsque la forme d'onde n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau. Dans ces conditions, des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau.

Dans ce chapitre, nous avons vu l'origine, les effets ainsi que les normes qui s'appliquent au phénomène des harmoniques sur les réseaux électriques. Cette pollution est principalement causée par la présence croissante des convertisseurs statiques qui sont vus par le réseau comme des charges non linéaires. Les dommages causés par la présence des harmoniques peuvent être plus ou moins importants selon la configuration du réseau et les équipements présents.

Différentes normes existent afin d'établir les limites permises d'harmoniques sur les réseaux.

II.1 Introduction :

Avec l'augmentation ces dernières années du nombre et de la puissance unitaire des charges non linéaires telles que les sources d'alimentations statiques et les entraînements électriques à vitesse variable dans les réseaux électriques, les harmoniques qu'ils génèrent deviennent de plus en plus préoccupantes, tant pour les distributeurs d'énergie que pour les consommateurs vus les effets nocifs et les coûts qu'ils engendrent. En conséquences, il est important que des solutions de dépollution harmoniques soit mises en œuvre. Parmi les solutions existantes :

- Le filtrage passif qui consiste à installer un circuit L, C série accordé sur la fréquence de la composante à éliminer.

II.2 Filtrage passif : [2]

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

II.2.1 Types des filtres passifs :

a. Les Filtres résonants :

Le principe des filtres résonnants est de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique d'un rang déterminé. Un filtre passif résonnant est un circuit RLC en série, accordé à la fréquence d'une harmonique généralement d'un rang inférieur. On installe très souvent plusieurs filtres résonnants en parallèle, correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer.

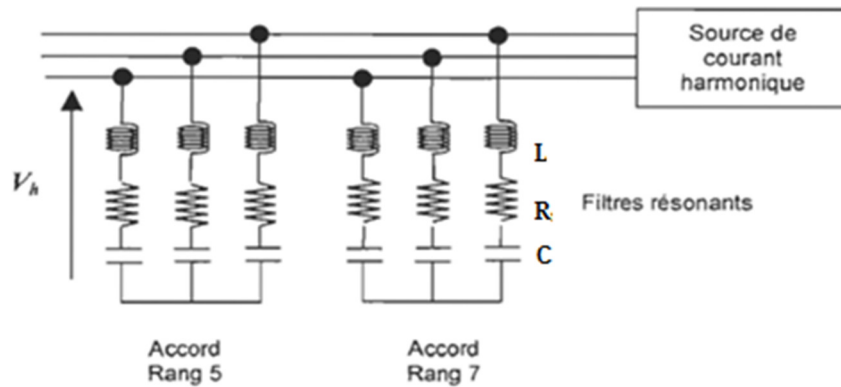


Figure (II.1) Filtre passif résonant.

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

$$z = R + \frac{LC\omega^2 - 1}{C\omega} \quad (\text{II.1})$$

La fréquence de résonance du filtre est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{II.2})$$

A la fréquence de résonance l'impédance du filtre est réduite à R .

Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance ou de la capacité ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble. [2]

b. Les Filtres amortis :

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

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

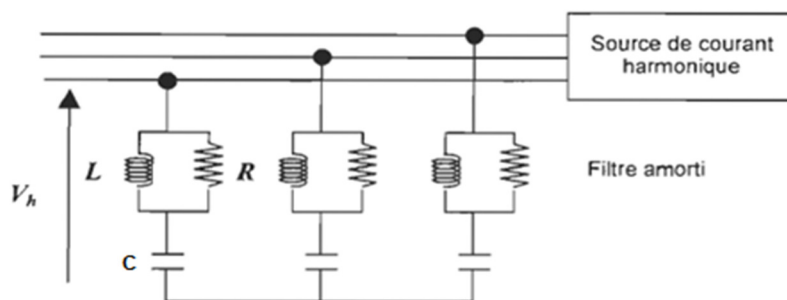


Figure (II.2) Filtre passif amorti.

La fréquence d'accord de ce filtre amorti est donnée par l'expression suivante :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C}} \quad (\text{II.3})$$

Le filtre amorti est moins sensible aux variations de ses éléments qu'un filtre résonant. L'utilisation des filtres amortis rend nécessaire le filtrage des rangs harmoniques inférieurs à f_r . D'ailleurs lors du choix des filtres, très souvent plusieurs filtres résonants pour les rangs harmoniques inférieurs et un filtre amorti sont utilisés, tous montés en parallèle avec la charge polluante[2]

C. Inductance anti-harmonique :

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

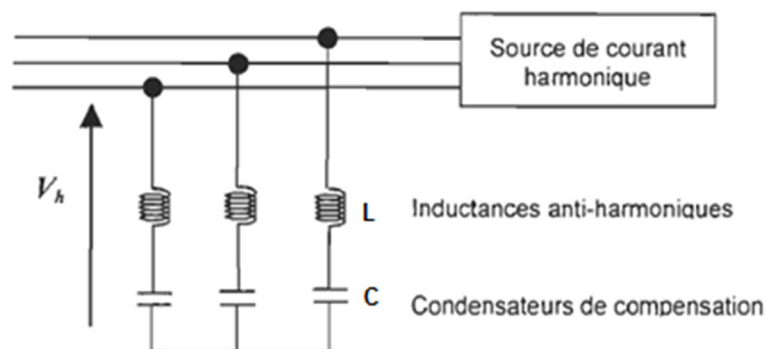


Figure (II.3) Raccordement d'une inductance anti-harmonique.

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

Pour éviter que ce filtre présente une résonance parallèle (anti-résonance) avec l'inductance du réseau sur lequel ils sont raccordés, on les accorde sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique. A noter aussi que l'installation d'inductances anti-harmoniques accroît la tension permanente à la fréquence fondamentale aux bornes des condensateurs qui doivent donc être dimensionnés en conséquence.[3]

II.2.2 Avantages et inconvénients des filtres passifs

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

Les inconvénients suivants:[3]

La présence sur un même réseau de deux filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, mais en pratique légèrement différent, provoque entre eux la circulation de courants harmoniques très importants qui provoque rapidement leur destruction. Ce cas se rencontre facilement en raison du fait que la fréquence d'accord varie lentement avec le vieillissement des éléments du filtre. Il faut absolument éviter de raccorder des filtres harmoniques de même rang sur un même réseau.

- La mise en parallèle d'un filtre anti-harmonique et d'une batterie de condensateurs provoque une contrainte pouvant amener la destruction des condensateurs.
- Lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants. Ce problème peut être résolu en adoptant un filtre à large bande qui atténue plusieurs rangs harmoniques; ce avec un facteur d'atténuation moindre.
- L'implantation de filtres passifs sur un réseau nécessite une étude poussée et précise. En outre, il n'est pas toujours possible de connaître tous les paramètres du réseau, nécessaires à l'étude, lorsqu'il est de grande dimension.
- Finalement, l'amortissement de la résonance dans les systèmes de puissance par les filtres passifs peut introduire des résonances additionnelles indésirables pouvant conduire à la destruction de ces filtres. L'amortissement utilisant la commande et l'électronique de puissance se présente comme solution pour améliorer efficacement le mode opératoire du réseau.

II.2.3 Simulation du filtre passif :

II.2.3.1 Pont a diodes :

- le schéma de simulation :

Les paramètres de simulation sont résumés au tableau suivant :

résistance de la ligne de réseau R_S	0.5 Ω
l'inductance de la ligne de réseau L_S	0.01 H
condensateur de bus continue C	0.0002 F
Résistance de charge R_{ch}	20 Ω
l'inductance De charge L_{ch}	0.02 H
tension de réseau V_S	380 v
la fréquence de tension de réseau f	50 Hz
la résistance de filtre (filtrage de l'harmonique 5, 7) R_f	0.1 Ω
l'inductance de filtre (filtrage de l'harmonique 5, 7) L_f	0.01 H
Le condensateur de filtre (filtrage de l'harmonique 5) C_f	0.00004 F
Le condensateur de filtre (filtrage de l'harmonique 7) C_f	$2.06 \cdot 10^5$ F

Tableau (II.1) : Les paramètres de simulation.

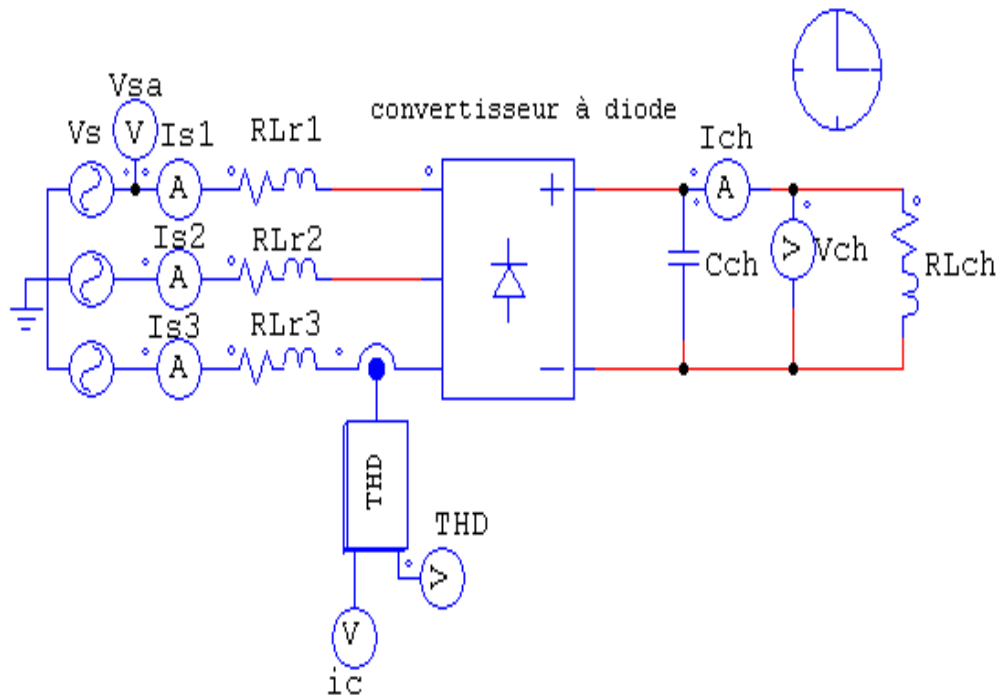


Figure (II.4) Schéma bloc du pont à diodes.

• résultats de simulation :

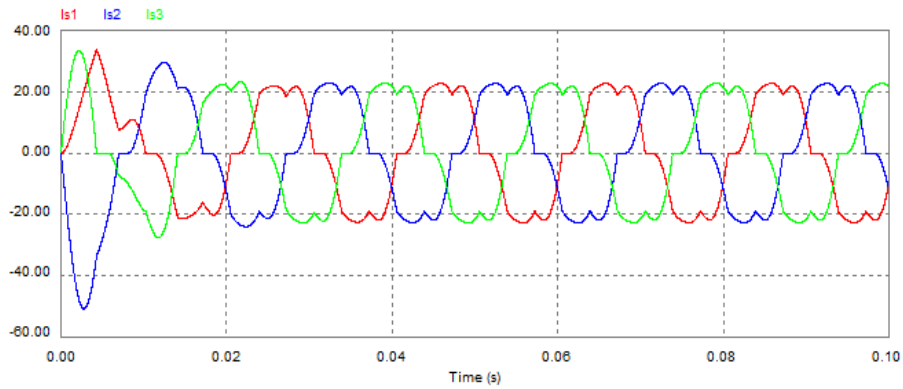


Figure (II.5) Les allures des courants de la source avant le filtrage.

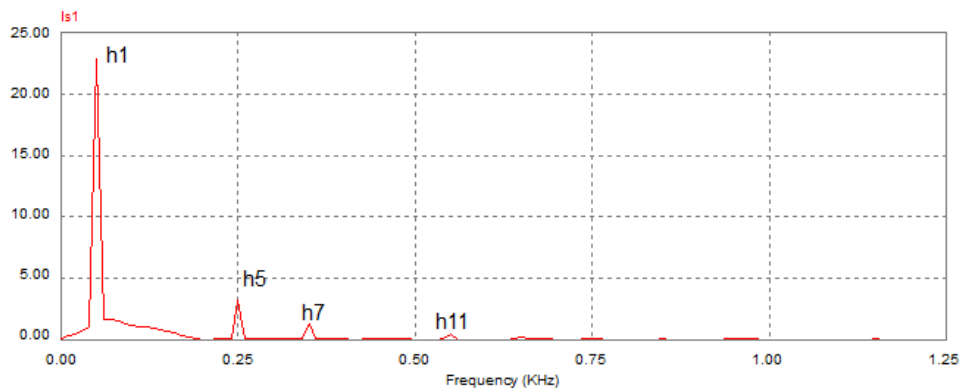


Figure (II.6) Le spectre d'harmonique avant le filtrage.

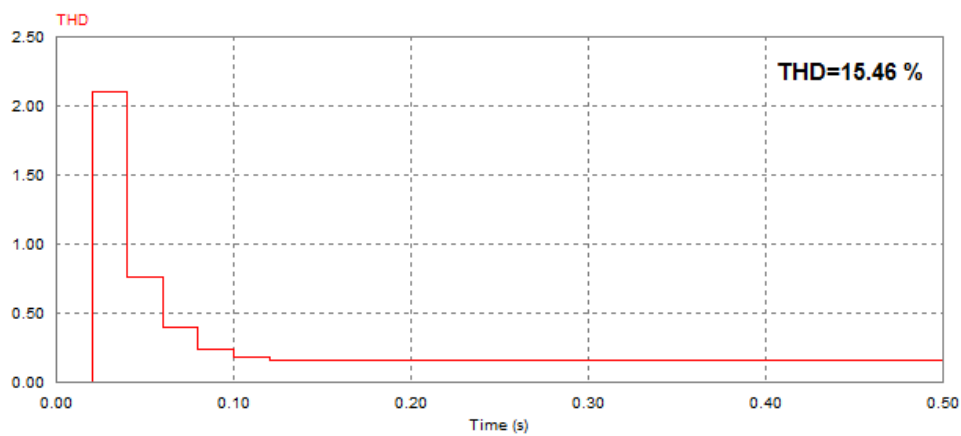


Figure (II.7) Le THD de courant avant le filtrage.

II.2.3.2 Le filtre résonnant :

- **le schéma de simulation :** est le suivant, en utilisant le logiciel PSIM.
Le filtre est accorde sur le rang 5

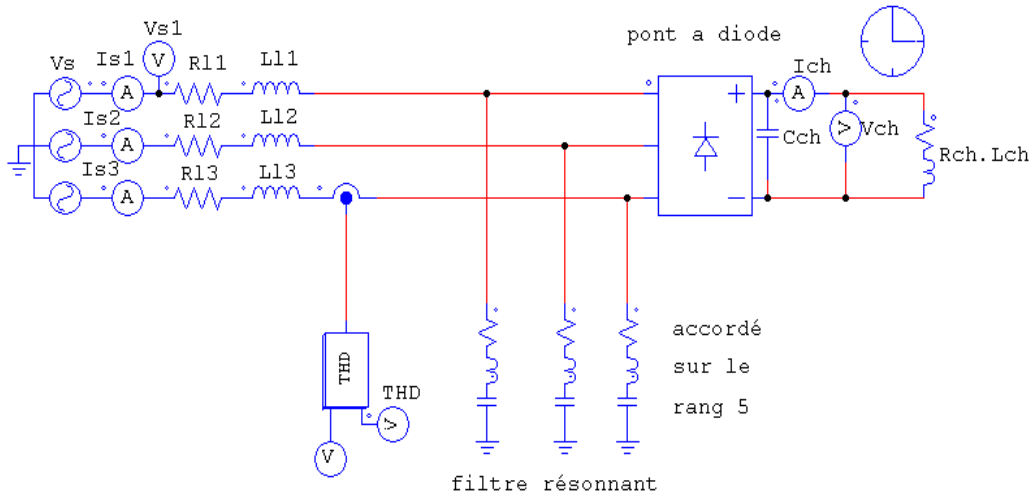


Figure (II.8) Schéma du pont a diodes avec filtre résonnant accordé sur le rang 5.

- **Résultats de simulation :**

Minimisation de l'harmonique 5 : les résultats montrent le courant du réseau ainsi que son spectre. En éliminant l'harmonique 5 on constate une amélioration de la forme d'onde du courant.

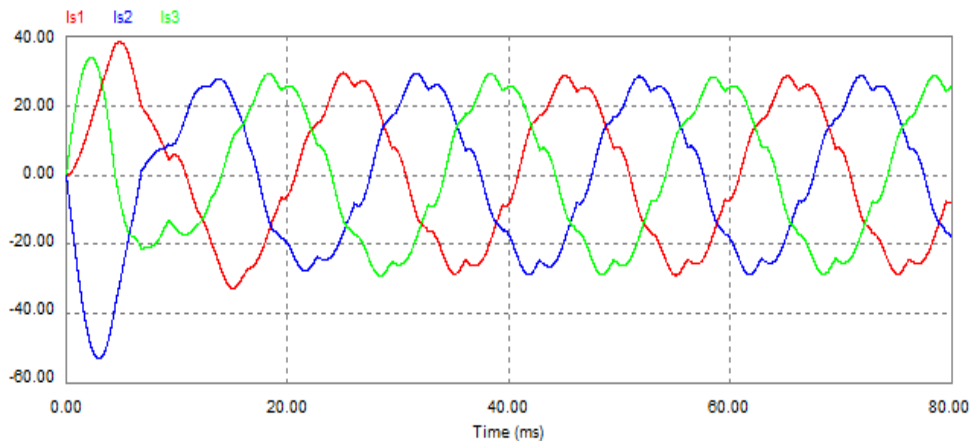


Figure (II.9) Allures des courants de la source après le filtrage de l'harmonique 5.

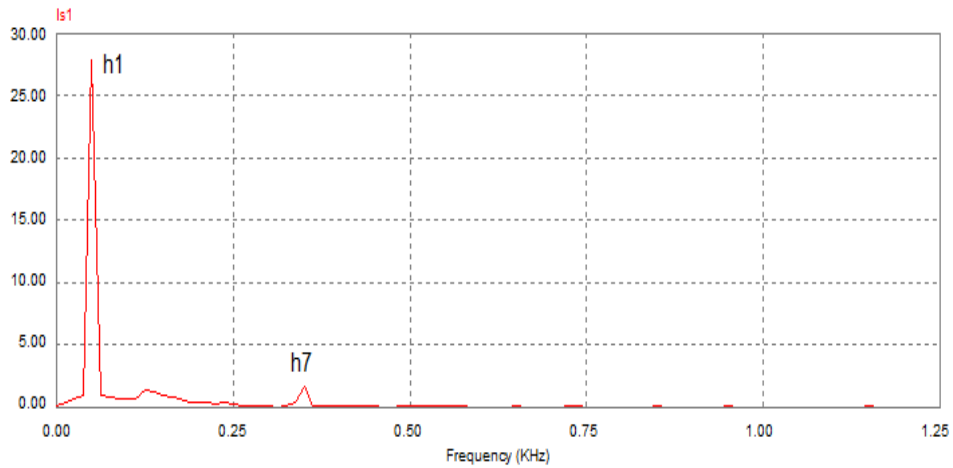


Figure (II.10) le spectre d’harmonique après le filtrage de l’harmonique 5.

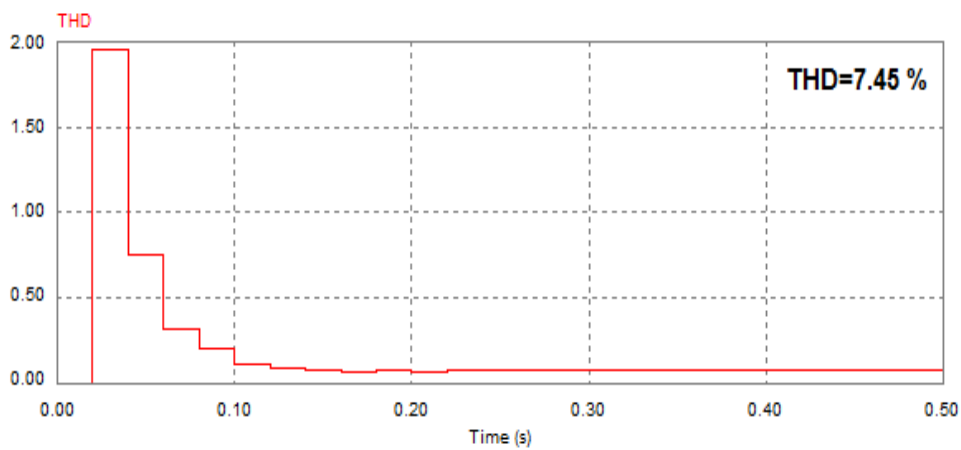


Figure (II.11) le THD de courant après le filtrage de l’harmonique 5.

Minimisation de l’harmonique 7 :

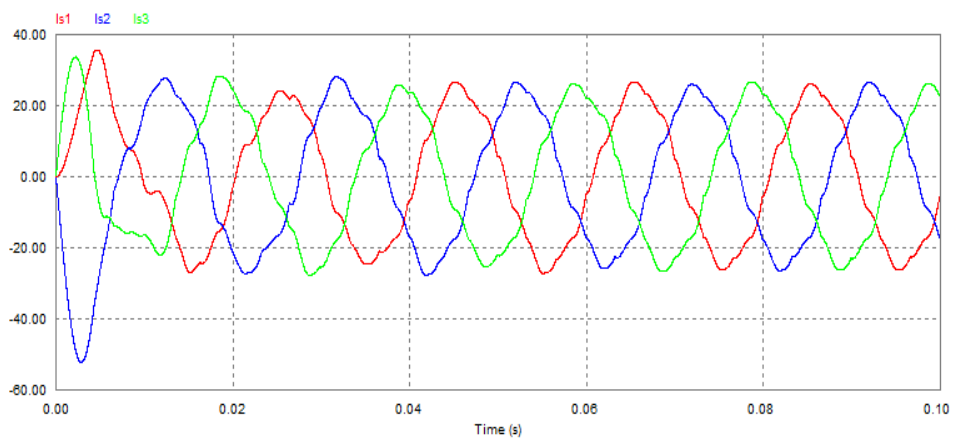


Figure (II.12) Allures des courants de la source après le filtrage de l’harmonique 7.

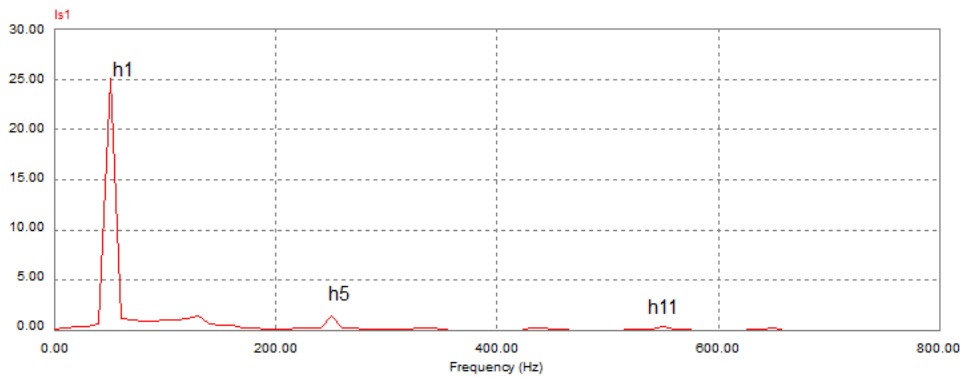


Figure (II.13) Le spectre d'harmonique après le filtrage de l'harmonique 7.

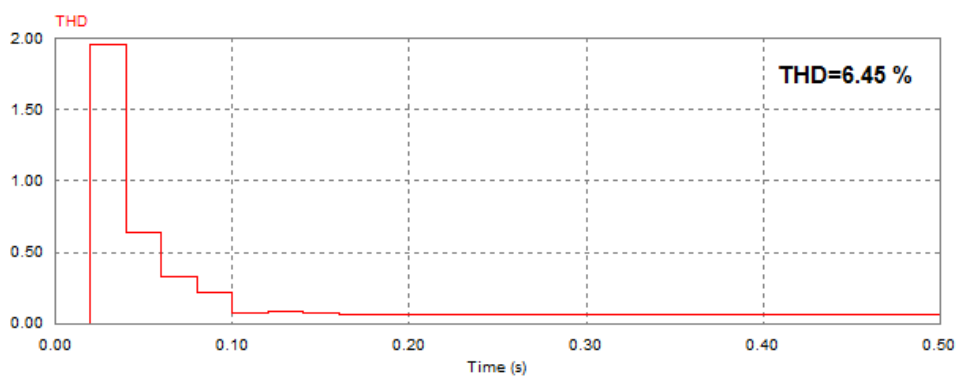


Figure (II.14) le THD de courant après le filtrage de l'harmonique 7.

II.2.4 Interprétation des résultats :

Avant le filtrage :

La figure (II.5) représente la forme d'onde des courants d'alimentation. On remarque une distorsion des courants ce qui rend la présence des harmoniques dans le réseau.

La figure (II.6) représente le spectre d'harmonique de courant avant le filtrage, on remarque la présence des harmoniques 5,7 et 11. Le redresseur absorbe donc un courant non sinusoïdal et se comporte comme une charge non linéaire.

La figure (II.7) Le THD de courant du réseau avant le filtrage 15.46%.

Après le filtrage :

La figure (II.9) représente la forme d'onde des courants d'alimentation après le filtrage de l'harmonique 5, on remarque que les distorsions des courants sont plus atténuées que dans le cas des courants présentés dans la figure (II.5).

La figure (II.12) représente la forme d'onde des courants d'alimentation après le filtrage de l'harmonique 7, on remarque que les distorsions des courants sont plus atténuées que dans le cas des courants présentés dans les figures (II.5) et (II.9).

La figure (II.10) représente le spectre d'harmonique du courant après le filtrage de l'harmonique 5, on remarque la présence des harmoniques 7, et la minimisation de l'harmonique 5.

La figure (II.13) représente le spectre d'harmonique de courant après le filtrage de l'harmonique 7, on remarque la présence des harmoniques 5,11 et la minimisation de l'harmonique 7.

La figure (II.11) Le THD de courant du réseau après le filtrage de l'harmonique 5,
THD= 7.45%.

La figure (II.14) Le THD de courant du réseau avant le filtrage de l'harmonique 7
THD= 6.45%.

II.3 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre le filtrage passif et leurs principes de fonctionnements. Certains de ces filtres ont des inconvénients: Les filtres passifs présentent un inconvénient majeur, celui des résonances qui est la principale cause de plusieurs désagréments, et la sensibilité aux variations de l'inductance et de la capacité.

III.1 Introduction :

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique participe à détériorer la "qualité" du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, les paragraphes suivants présentent une synthèse des redresseurs commande MLI, qui sont classés comme une solution de ce problème.

III.2 Redresseur à commande MLI :

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de la commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commuté, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée.

III .2.1 Le principe de fonctionnement : [1], [6]

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, Sa tension de sortie est toujours supérieure a celle d'entrée. Pour accomplir cette tâche, a travers une commande en boucle fermée, une comparaison entre la tension de bus continu V_{DC} et la tension de référence V_{ref} produit un signale d'erreur, ce signal servira a la commutation des interrupteurs du redresseur en ouverture et en fermeture. Ainsi, la puissance pourra donc de s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu V_{DC} mesurée aux bornes du condensateur C . [6]

Quand le courant i_{ch} est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande de plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement plus de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupérée. Inversement, quand i_{ch} devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au block de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative. [1]

De plus, ce type du redresseur permet la correction du facteur de puissance et le contrôle ne se fait pas seulement sur la puissance active, la puissance réactive sera également contrôlée. En outre, les formes d'onde des courants de la source peuvent être maintenu comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source. [6]

III .2.2 Modélisation du redresseur MLI [1]:

Le schéma unifilaire d'un pont redresseur connecté au réseau, \bar{e} est tension de la source et R, L sont les paramètres de la ligne, \bar{V} est la tension d'entées de redresseur.

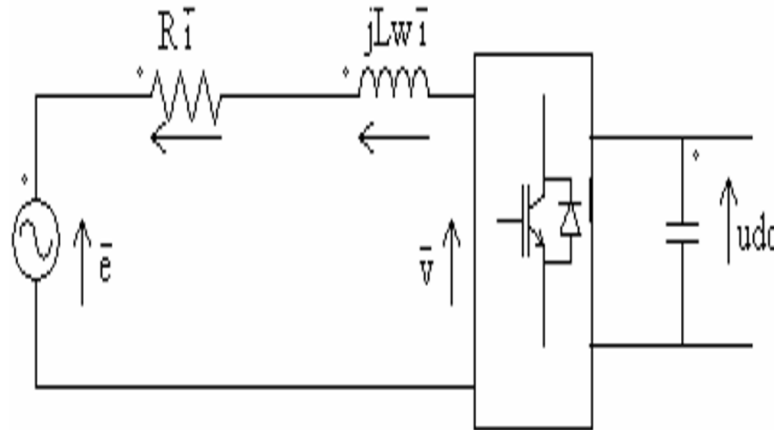


Figure (III.15) Schéma unifilaire d'un pont redresseur connecté au réseau.

Le courant de ligne i est commandé par la chute de tension produite par l'inductance L , et la résistance R de la ligne et la tension d'entrée de redresseur v . Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors bipolaires antiparallèle avec des diodes (figure III 16), qui sont présentés comme des interrupteurs peuvent être commandées en ouverture '1' et en fermeture '0'. La tension d'entrée V est en fonction des états de ces interrupteurs.

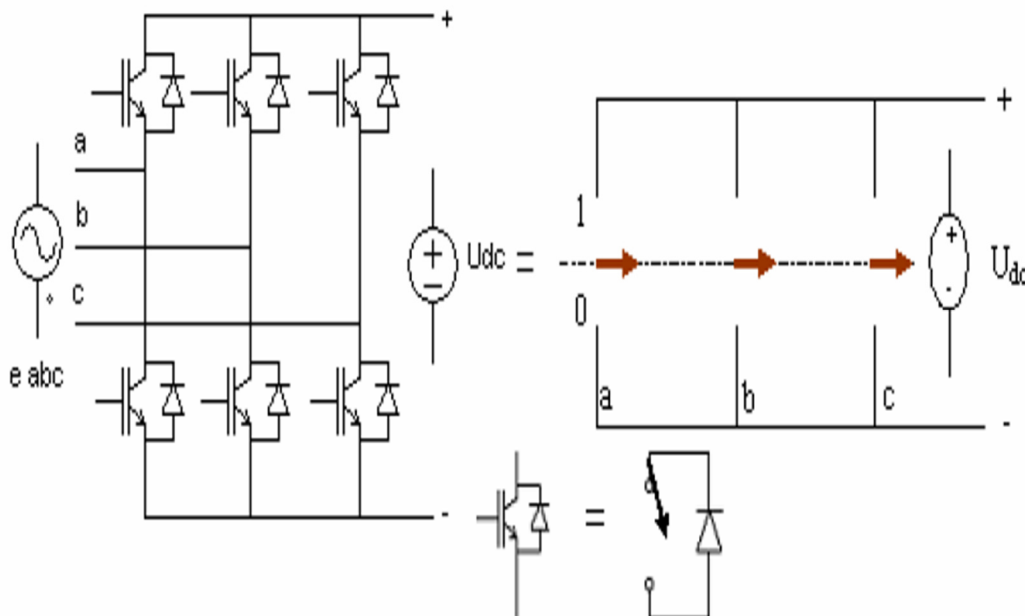


Figure (III.16) Pont redresseur.

La figure (II-17) représenté les différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

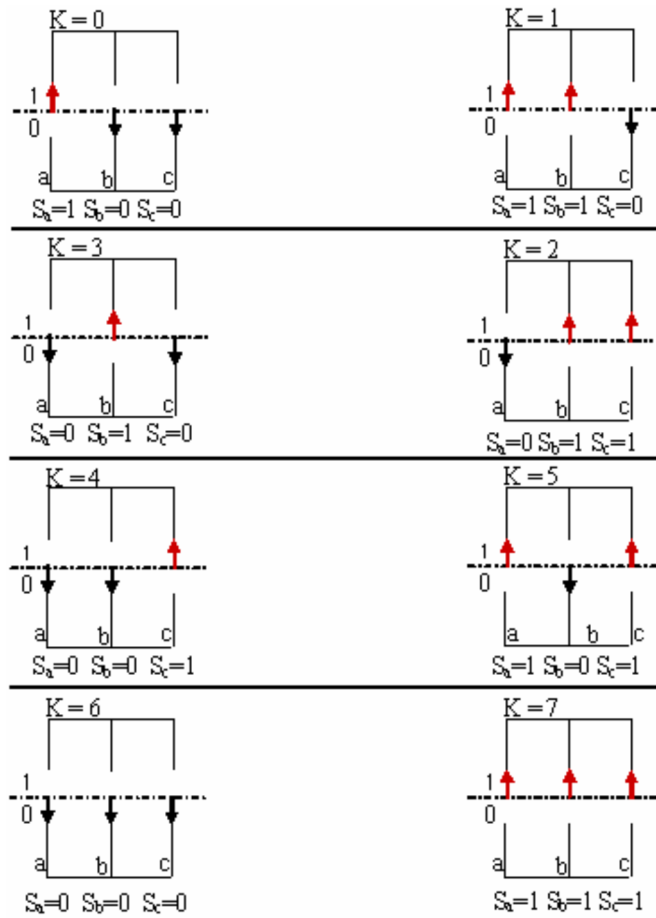


Figure (III.17) Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

K	s _a	s _b	s _c	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}
0	1	0	0	u _{dc}	0	- u _{dc}
1	1	1	0	0	u _{dc}	- u _{dc}
2	0	1	0	- u _{dc}	u _{dc}	0
3	0	1	1	- u _{dc}	0	u _{dc}
4	0	0	1	0	- u _{dc}	u _{dc}
5	1	0	1	u _{dc}	- u _{dc}	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

Tableau (III.2) les huit états possibles des interrupteurs.

De cette table on peut écrire les tensions d'entrée du redresseur d'une manière générale comme suit :

$$\begin{aligned} v_{ab} &= (S_a - S_b) U_{dc} \\ v_{bc} &= (S_b - S_c) U_{dc} \\ v_{ca} &= (S_c - S_a) U_{dc} \end{aligned} \quad (\text{III.1})$$

D'où on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{aligned} v_a &= f_a u_{dc} \\ v_b &= f_b u_{dc} \\ v_c &= f_c u_{dc} \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Avec

$$\begin{aligned} f_a &= \frac{2s_a - (s_b - s_c)}{3} \\ f_b &= \frac{2s_b - (s_a - s_c)}{3} \\ f_c &= \frac{2s_c - (s_a - s_b)}{3} \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

III .2.3 Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé : [1]

Les équations de tensions pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites comme figure (III.15):

$$\bar{e} = \bar{v}_1 + \bar{v} \quad (\text{III.4})$$

$$\bar{e} = R\bar{i} + L\frac{d\bar{i}}{dt} + \bar{v} \quad (\text{III-5})$$

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

La tension d'entrée du redresseur peut être écrite comme suit

$$v_n = u_{dc} (s_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n) \quad (\text{III.7})$$

Où $s_n = 0$ ou 1, sont l'état des interrupteurs, et (n=a, b, c).

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_c \quad (\text{III.8})$$

Le courant dans la capacité peut aussi être donner par :

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (\text{III.9})$$

d'où :

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - i_{ch} \quad (\text{III.10})$$

Donc, du coté alternatif du redresseur on peut écrire :

$$\begin{aligned} L \frac{di_a}{dt} + Ri_a &= e_a - u_{dc} (s_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n) = e_a - u_{dc} (s_a - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c)) \\ L \frac{di_b}{dt} + Ri_b &= e_b - u_{dc} (s_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n) = e_b - u_{dc} (s_b - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c)) \\ L \frac{di_c}{dt} + Ri_c &= e_c - u_{dc} (s_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n) = e_c - u_{dc} (s_c - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c)) \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

Où les tensions du réseau sont exprimées par :

$$\begin{aligned} e_a &= E_m \sin wt \\ e_b &= E_m \sin(wt - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c &= E_m \sin(wt + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

le système d'équation (III.11) peut se résumer comme suit :

$$(L \frac{di_n}{dt} + R) i_n = e_n - u_{dc} + (s_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n) \quad (\text{III.13})$$

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \sum_{k=a}^c i_n s_n - i_{ch} \quad (\text{III.14})$$

III.3 Les techniques de commande de redresseur MLI :

III.3.1 redresseur MLI sinus-triangulaire sans régulation de la tension du bus continu [7].

III.3.1.1. Le principe de la commande sinus-triangulaire:

Son principe général est de comparer une tension de référence à une porteuse triangulaire ou en dent de scie (figure III-19).

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de modulation **m** est défini comme le rapport de la fréquence de modulation **fp** de la porteuse à la fréquence **f** de la tension de référence $\left[\mathbf{m} = \frac{\mathbf{fp}}{\mathbf{f}} \right]$
- Le coefficient de réglage ou le taux de modulation **r** est le rapport de l'amplitude (valeur crête) **Vm** de la tension de référence à l'amplitude **Upm** de la porteuse

$$\left[\mathbf{r} = \frac{\mathbf{Vm}}{\mathbf{Upm}} \right]$$

On note qu'une M.L.I est synchrone si m est entier. Dans ce cas, la grandeur de sortie est périodique de période $\frac{1}{\text{fréquence}}$. Elle est dite asynchrone dans le cas contraire, en

particulier quand l'onde de référence varie continûment (commande vectorielle ...) Pour le redresseur triphasé la porteuse la plus adaptée aux onduleurs (redresseurs) est la triangulaire bipolaire.

Le principe de génération des impulsions de commande d'un bras k d'un redresseur à et l'algorithme de cette stratégie est illustré par la figure (III.18).

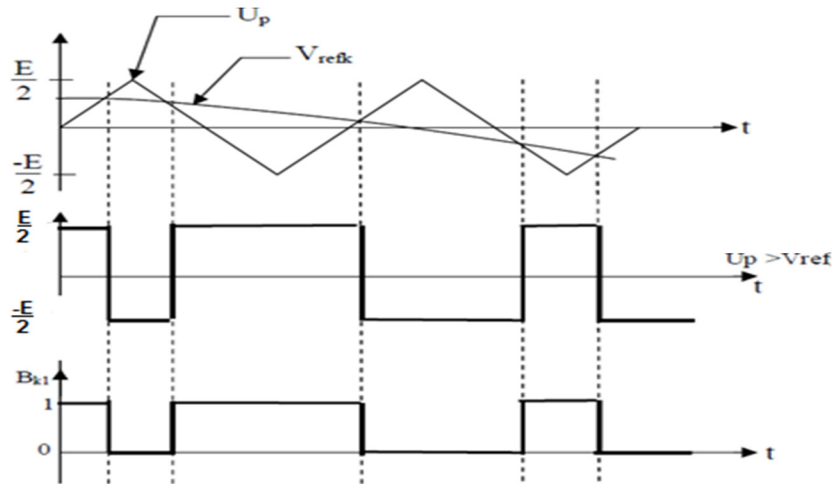


Figure (III.18) Principe de la stratégie sinus-triangulaire.

En modulation synchrone, si m est impair, on trouve dans le spectre de la tension uniquement des harmoniques impairs. Dans le cas de m pair, on trouve une valeur moyenne non nulle (signal non symétrique) et des harmoniques pairs et impairs. C'est pourquoi, on choisit des indices de modulation impairs.

Pour le triphasé, les harmoniques de rang multiple de trois des tensions simples et composées sont nuls, ainsi afin d'annuler les raies de fréquence mf , $3mf$, $5mf$, ...etc., on choisit pour le triphasé des indices de modulation impairs et multiples de trois.

On montre qu'avec cette stratégie l'augmentation de m rejette les premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées, facilitant ainsi le filtrage. Cependant m est limitée par les temps de commutation des interrupteurs et donc par la largeur minimale des impulsions. Si m est assez grand ($m > 6$), la valeur efficace V_1 du fondamental de la tension d'entrée du redresseur V_a est pratiquement égale à l'onde de référence pour $r = 1$:

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} r \frac{u_c}{2} \quad (\text{III.15})$$

Donc par action sur r on peut théoriquement accroître l'amplitude du fondamental de 0 jusqu'au maximum. Les tensions de référence du redresseur triphasé permettant de générer un système de tension triphasé équilibré direct ou inverse sont :

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{ref2} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{ref3} = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

III.3.1. 2. Les inconvénients de la MLI : [7]

Malgré la diversité de ses techniques et leur grande habilité à éliminer les harmoniques désirés, la M.L.I est imparfaite.

En effet, le contenu harmonique généré par une onde M.L.I entraîne des pertes dans le Réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes Joule et pertes par courants de Foucault). Elle génère dans les machines tournantes des oscillations de couple, des bruits acoustiques et des résonances électromécaniques.

Elle injecte du bruit sur la commande et introduit des non linéarités qui peuvent déstabiliser le système.

III.3.2 redresseur MLI à hystérésis sans régulation de la tension du bus continu [7].

III.3.2.1. Le principe de la commande par hystérésis en courant :

Le principe général de cette stratégie est de comparer le courant de référence I_{ref} au courant réel, et à partir de l'écart entre ces deux courants, on déduit la commande des interrupteurs du convertisseur.

Le principe du contrôle par hystérésis, consiste à maintenir le courant à l'intérieur d'une bande en cadrent sa référence. La différence entre le courant et sa référence est comparée à une bande fixe de largeur Δi appelée bande ou fourchette d'hystérésis. Chaque violation de cette bande entraîne un ordre de commutation des interrupteurs comme le montre la figure (III.19).

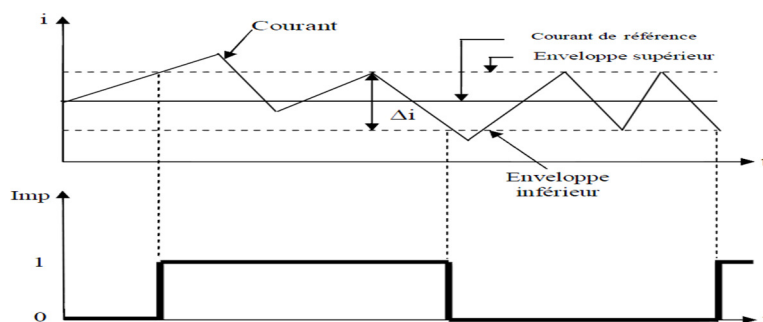


Figure (III.19) Principe du Contrôle par hystérésis.

Cette méthode permet le contrôle de la fréquence de commutation des interrupteurs par action sur la largeur Δi c'est pour quoi les performances de cette stratégie sont fortement liées à la largeur Δi de la bande d'hystérésis.

L'algorithme de la commande par hystérésis en courant se résume pour un bras k du redresseur par le système (III-17) ci-dessous.

Soit ε_k l'écart entre le courant de référence et réel défini par $\varepsilon_k = I_k - I_{refk}$. Les ordres de commande B_{ki} des interrupteurs sont déterminés alors comme suit :

$$(III.17) \quad \begin{cases} \text{Si } \varepsilon_k \geq \Delta i \text{ alors } B_{ki} = 0 \text{ (ou faux).} \\ \text{Si } \varepsilon_k \leq -\Delta i \text{ alors } B_{ki} = 1 \text{ (ou vrai).} \\ \text{Si non la commande des semi-conducteurs reste inchangée.} \end{cases}$$

Les courants de référence pour ce redresseur triphasé à deux niveaux sont définis comme suit :

$$(III.18) \quad \begin{cases} I_{ref1} = I_{eff}\sqrt{2} \sin(wt) \\ I_{ref2} = I_{eff}\sqrt{2} \sin(wt - \frac{2\pi}{3}) \\ I_{ref3} = I_{eff}\sqrt{2} \sin(wt + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

III.3.2.2. Inconvénients de la commande par hystérésis : [7]

Malgré sa grande robustesse, sa rapidité et la simplicité de son implantation dans les systèmes, la commande par hystérésis présente certains inconvénients. En effet, la génération d'une fréquence de commutation variable rend difficile la localisation des fréquences harmoniques que l'on souhaite éliminer. Outre ce fonctionnement à fréquence libre est susceptible d'introduire des nuisances sonores et de bruyantes interférences entre les phases surtout dans le cas des systèmes triphasés à point neutre isolé.

III.3.3 redresseur MLI avec régulation de la tension du bus continu : [8]

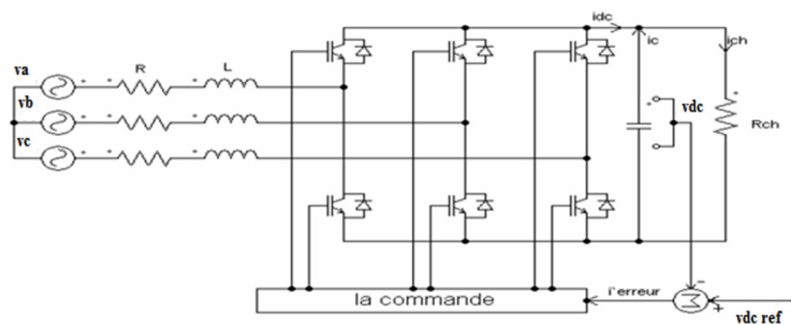


Figure (III.20) : schéma de régulation du redresseur MLI.**III.3.3.1 Principe du redresseur MLI à absorption sinusoïdale :**

Les courants d'alimentation i_a , i_b et i_c sont mesurés. L'erreur de tension ($V_{dcref} - V_{dcf}$) à la sortie du régulateur est multipliée par trois signaux sinusoïdaux équilibrés, d'amplitude unité à la fréquence du réseau et en phase avec les tensions d'alimentation (pour avoir un facteur de déplacement unité). Les courants instantanés et de référence sont comparés et des signaux d'erreur sont générés à partir desquels les comparateurs à hystérésis produisent les impulsions d'amorçage des interrupteurs en les situant par rapport à la bande $\pm \Delta i$.

Le contrôle par hystérésis force le courant d'alimentation à être supérieur ou inférieur à la valeur de référence de Δi par commutation de la tension de phase. Dans ce cas, la fréquence de commutation dépend de l'amplitude de la tension d'alimentation, de l'inductance de fuite de la source et de la bande d'hystérésis Δi . La fréquence maximale de commutation, pour une tension nulle aux bornes de la capacité de filtrage, est donnée par la formule suivante :

$$f_{max} = \frac{U_{max}}{8.L.\Delta i} \quad (III.19)$$

Avec :

U_{max} : Amplitude de la tension composée coté réseau.

L : inductance de fuite de la source.

Δi : bande d'hystérésis.

Pour régler la tension continue à la sortie du convertisseur coté réseau, une boucle extérieure est introduite et un régulateur du type proportionnel-intégral (PI) est utilisé. Pour calculer les paramètres de ce régulateur, le schéma de contrôle de la figure (III-20) est simplifié figure (III.21), en ne considérant que la capacité de filtrage et en négligeant la dynamique du convertisseur.

$$G(s) = \frac{1}{c \cdot p} \quad (III.20)$$

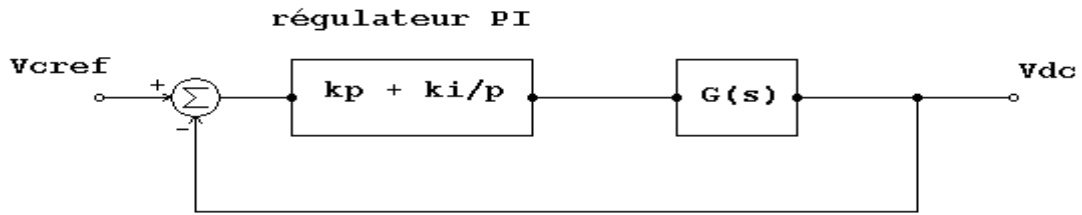


Figure (III.21) schéma de contrôle simplifié.

Comme dans le cas d'un régulateur de vitesse, La transmittance du régulateur PI peut être exprimée de la manière suivante :

$$k_p + \frac{k_i}{p} = \frac{k_i}{p} \cdot (1 + \tau \cdot p) \quad (\text{III.21})$$

La fonction de transfert en boucle fermée du système de la figure (III-21)

Est donnée par :

$$\frac{V_{dc}(p)}{V_{cref}(p)} = \frac{1 + \tau \cdot p}{\frac{c}{k_i} \cdot p^2 + \tau \cdot p + 1} \quad (\text{III.22})$$

Avec :

$$\tau = \frac{k_p}{k_i}$$

En comparant l'équation caractéristique de la fonction de transfert avec la forme standard du second ordre, on trouve que :

$$\frac{k_i}{c} = \omega_0^2 \quad (\text{III.23})$$

$$\tau = \frac{2 \cdot \xi}{\omega_0} \quad (\text{III.24})$$

A partir des équations (III-23) et (III- 24) et avec $\xi = 1$ pour une amortissement critique, on obtient :

$$k_i = \frac{4 \cdot c}{\tau^2} \quad (\text{III.25})$$

En choisissant τ , k_i est calculé pour une valeur de capacité connue. Le régulateur PI calculé est implanté (figure III-20) pour assurer la régulation de la tension continue.

S'agissant d'un convertisseur élévateur, la contrainte qui s'impose pour assurer un courant sinusoïdal à l'entrée est le rapport entre la tension alternative à l'entrée et la tension continue aux bornes de la capacité de filtrage défini par [8] :

$$V_{dc} > 1.634 * U_{eff} \quad (\text{III.26})$$

Avec :

V_{dc} : La tension continue aux bornes de la capacité.

U_{eff} : la tension composée efficace du réseau.

III.3.3.2 Régulateur proportionnel-intégral PI [4] :

Le Régulateur Proportionnel-Intégral PI est beaucoup utilisé en raison de sa simplicité d'implémentation et sa possibilité d'obtenir une bonne réponse dynamique, quand ses paramètres sont bien réglés. Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur. La tension du bus continu V_{dc} est détectée et comparée à une tension de référence $V_{dc_{ref}}$. L'erreur entre les deux tensions est appliqué à ce régulateur PI pour obtenir l'amplitude des trois courants de référence de la source I_{max} multipliée par trois signaux sinusoïdaux d'amplitude égale à l'unité pour l'obtention des trois courants de référence instantanés de source i_{saref} , i_{sbref} , i_{scref} .

III.4 simulation du redresseur MLI :

III.4.1 redresseur MLI sinus-triangulaire sans régulation de la tension bus continu :

Les paramètres de simulation sont résumés au tableau suivant :

résistance de la ligne de réseau R_S	0.5 Ω
l'inductance de la ligne de réseau L_S	0.01 H
condensateur de bus continu C	0.002 F
Résistance de charge R_{ch}	20 Ω
l'inductance De charge L_{ch}	0.02 H
tension de réseau V_S	380 v
la fréquence de tension de réseau f	50 Hz
la fréquence du porteuse fp	5000 Hz

Tableau (III.3) : paramètres de simulation de la technique sinus-triangulaire.

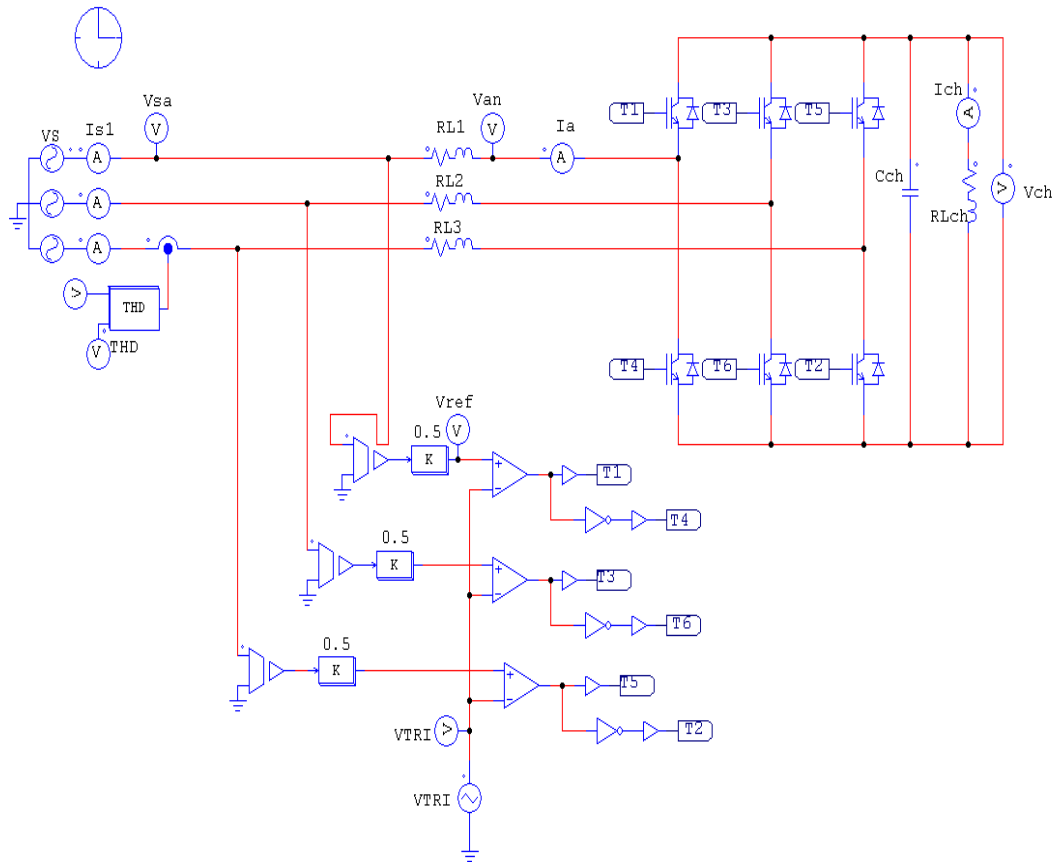


Figure (III.22) Schéma bloc du redresseur MLI sinus-triangulaire sans régulation du bus continu.

III.4.1.1 résultats de simulation :

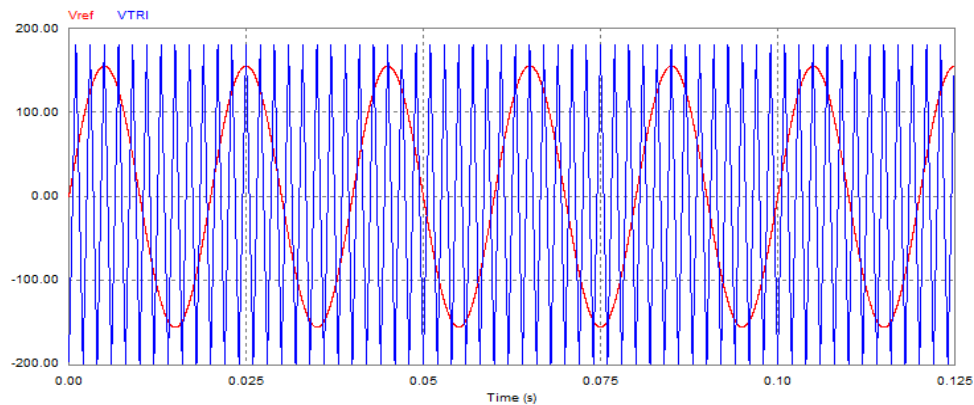


Figure (III.23) Allure des tensions V_{ref} et V_{tria} (référence et porteuse).

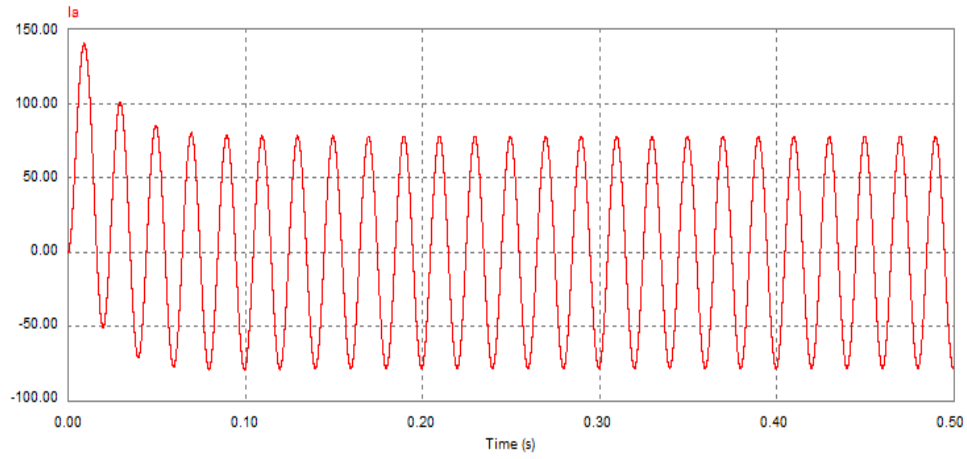


Figure (III.24) Allure du courant I_a de la source.

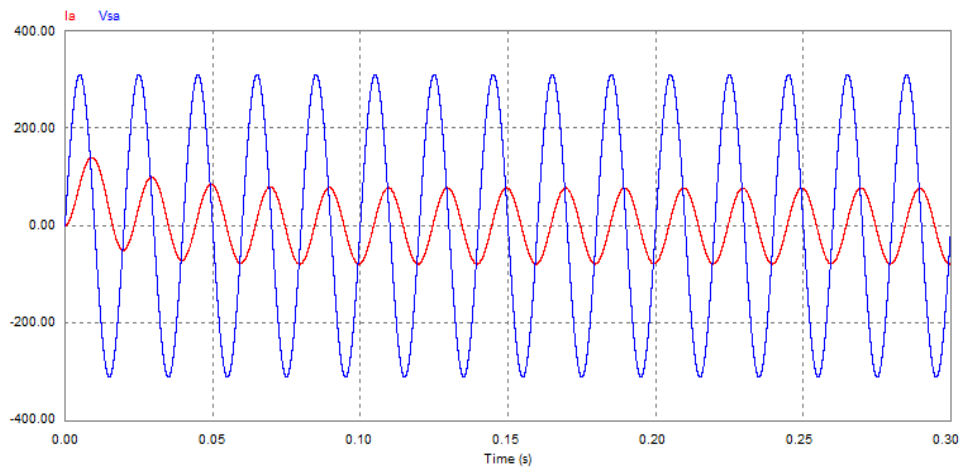


Figure (III.25) Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source.

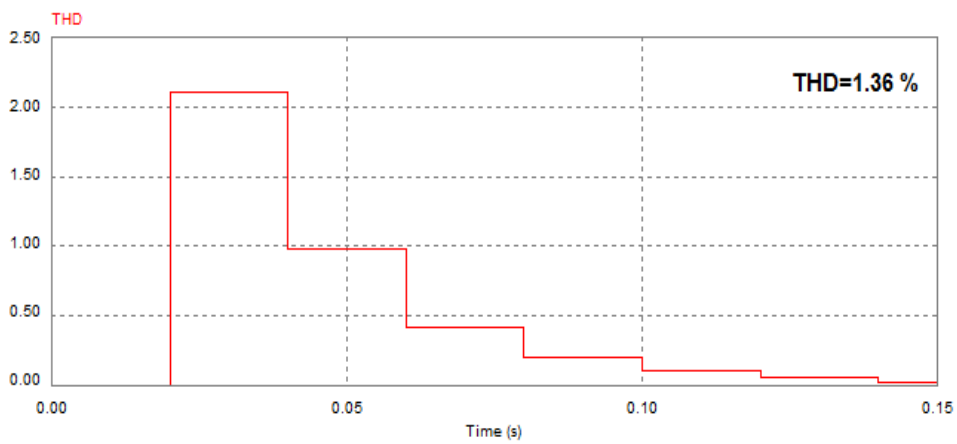


Figure (III.26) Le THD de courant du réseau.

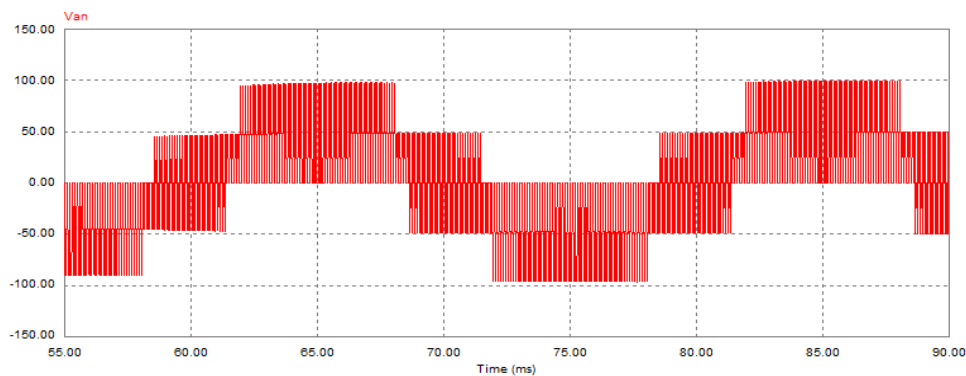


Figure (III.27) Tension d'entrée du pont convertisseur V_{an} .

III.4.1.2 interprétation des résultats :

La figure (III.23) représente la comparaison entre la référence et la porteuse (triangulaire) V_{ref} de fréquence 5000 Hz. L'intersection entre les deux signaux représente les instants de commutation.

La figure (III.25) représente le courant et la tension de la source, on remarque que la tension n'est pas en phase avec le courant ce qui entraîne une consommation de l'énergie réactive et une dégradation du facteur de puissance.

La figure (III.26) représente Le THD de courant du réseau de 1.36%.

III.4.2 Redresseur MLI à hystérésis sans régulation de la tension du bus continu :

Les paramètres de simulation sont résumés au tableau suivant :

résistance de la ligne de réseau R_S	0.5 Ω
l'inductance de la ligne de réseau L_S	0.01 H
condensateur de bus continue C	0.002 F
Résistance de charge R_{ch}	20 Ω
l'inductance de charge L_{ch}	0.02 H
tension du réseau V_S	380 v
la fréquence du réseau f	50 Hz
la bande hystérésis Δi	0.5 A

Tableau (III.4) : paramètres de simulation de la technique à hystérésis.

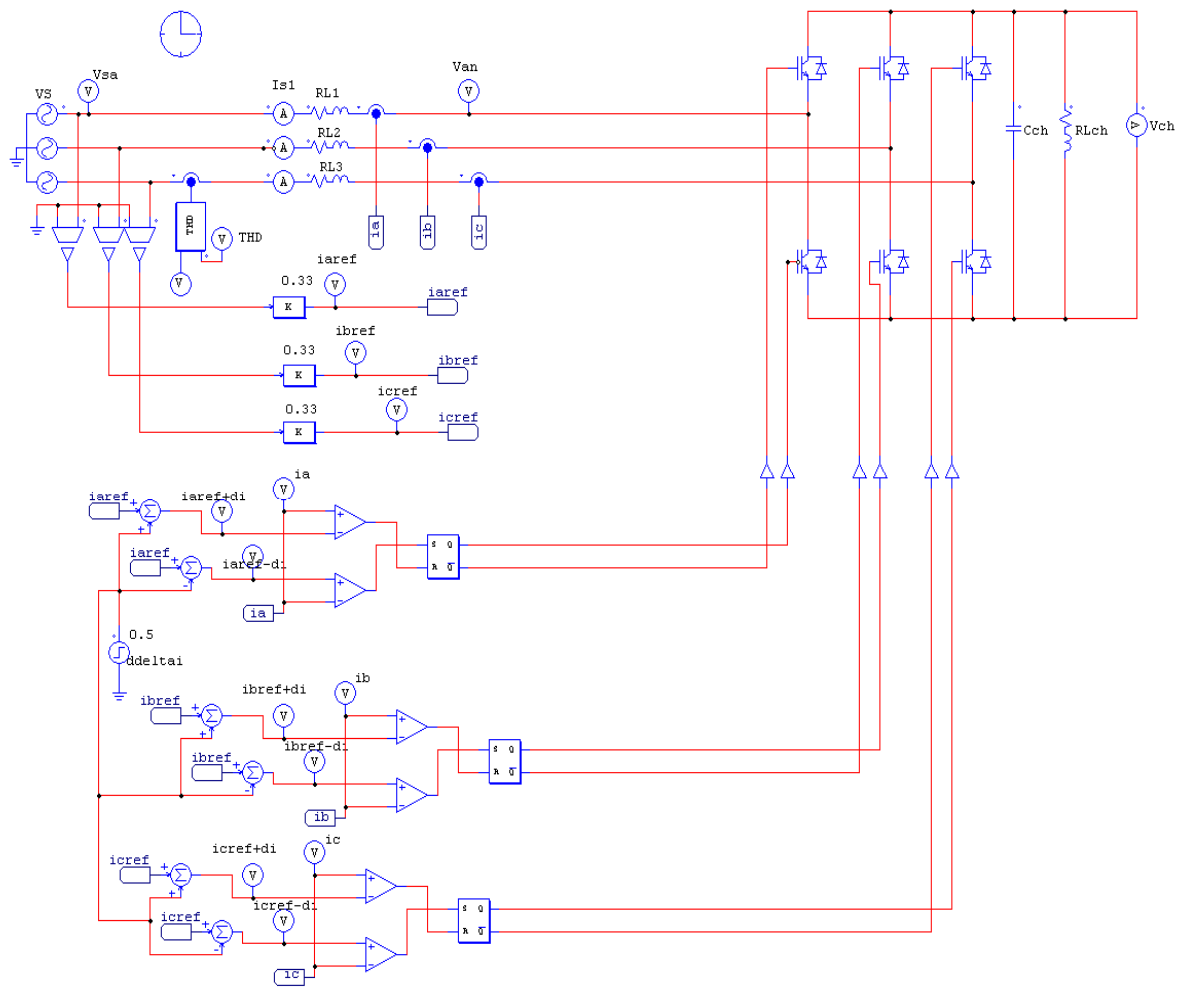


Figure (III.28) Schéma bloc du redresseur MLI à hystérésis sans régulation du bus continu.

II.4.2.1 résultats de simulation :

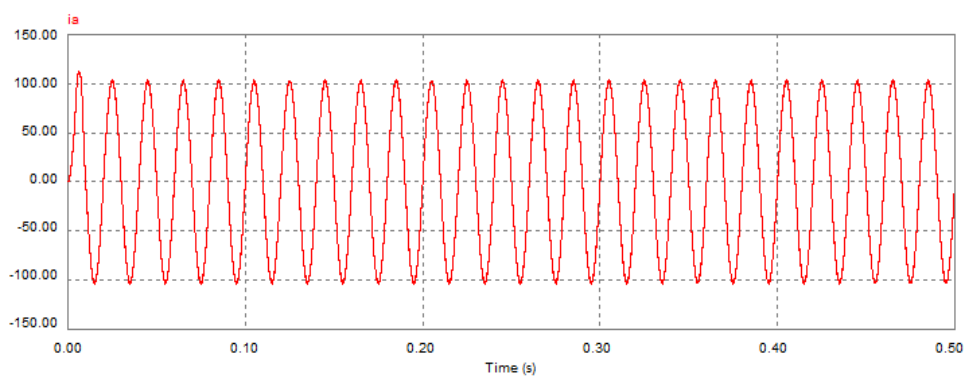


Figure (III.29) Allure du courant I_a de la source.

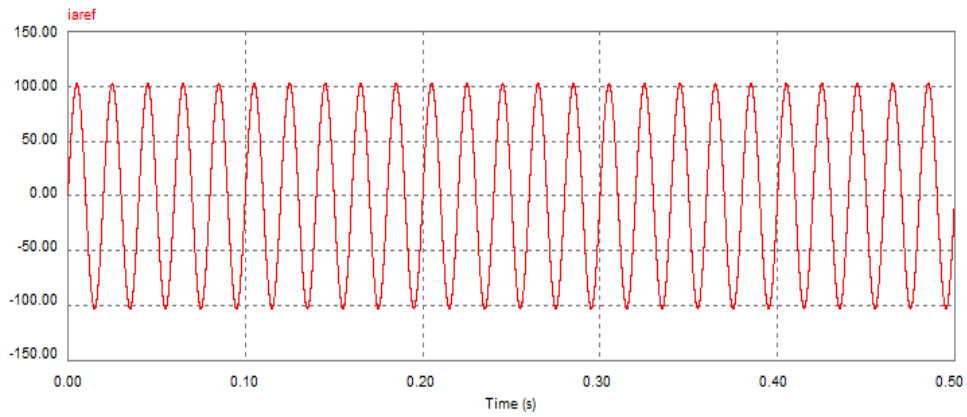


Figure (III.30) Allure du courant du référence I_{aref} .

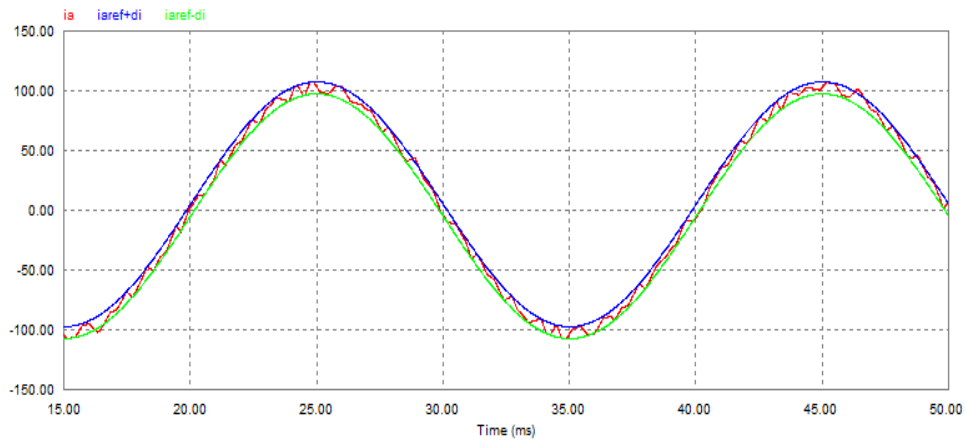


Figure (III.31) Allures des courants I_a , $I_{aref+\Delta i}$ et $I_{aref-\Delta i}$.

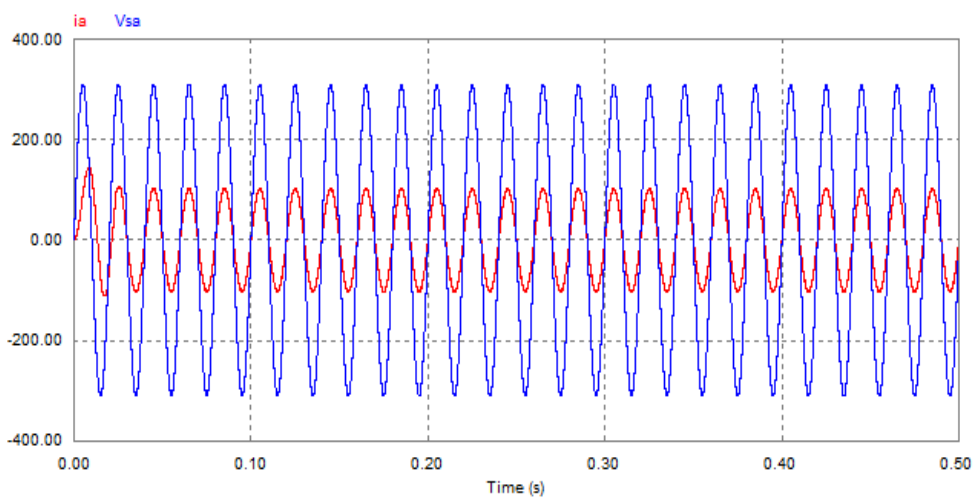


Figure (III.32) Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source.

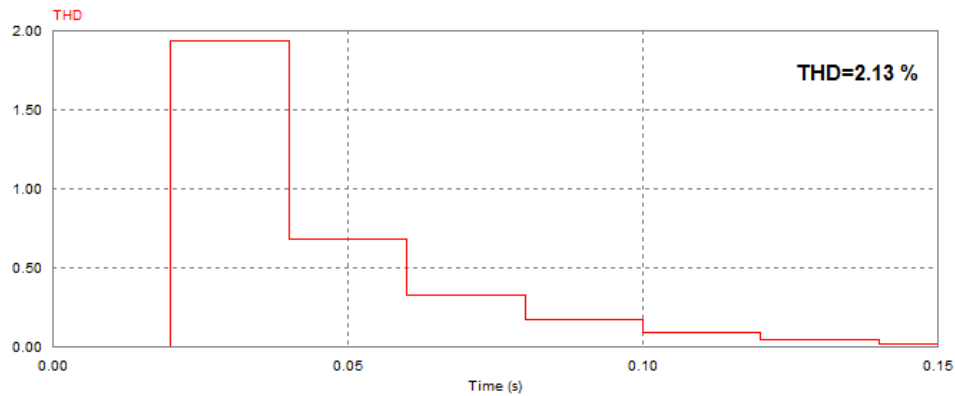


Figure (III.33) Le THD de courant du réseau.

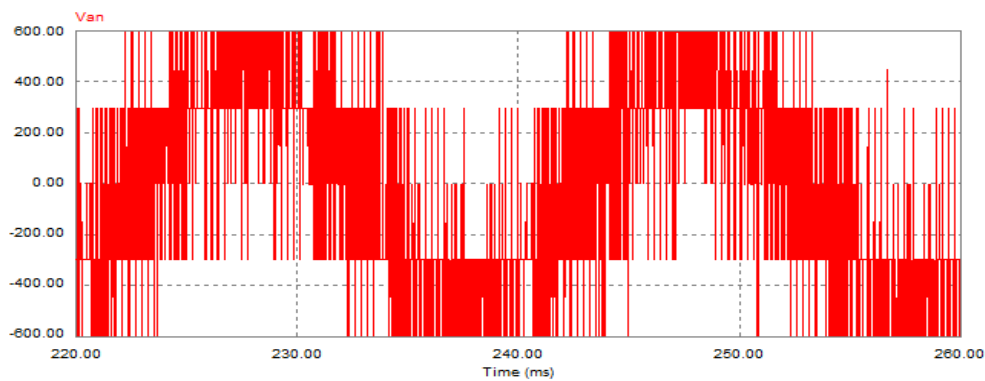


Figure (III.34) Tension d'entrée du pont convertisseur V_{an} .

III.4.2.2 interprétation des résultats :

La figure (III.31) représente les allures des courants I_a , $I_{aref}+\Delta i$ et $I_{aref}-\Delta i$, on remarque que le courant I_a suit le courant de référence I_{aref} dans une bande Δi (la bande hystérésis).

La figure (III.32) représente l'allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source. On remarque que la tension est en phase avec le courant. Donc le facteur de puissance est unitaire et la consommation de la puissance réactive est pratiquement nulle.

La figure (III.33) représente Le THD de courant du réseau de 2.13%.

III.4.3 Redresseur MLI à hystérésis avec régulation de la tension du bus continu :

Les paramètres de simulation sont résumés au tableau suivant :

résistance de la ligne de réseau R_S	0.5 Ω
l'inductance de ligne de réseau L_S	0.01 H
condensateur de bus continue C	0.001 F
Résistance de charge R_{ch}	10 Ω
l'inductance de charge L_{ch}	0.01 H
tension de réseau V_S	380 v
la fréquence du réseau f	50 HZ
La tension de référence continue V_{dc}	600 v
k_p	0.05
k_i	0.002
Δi	0.5 A

Tableau (III.5) : Paramètres de simulation de redresseur MLI avec régulation de la tension bus continu .

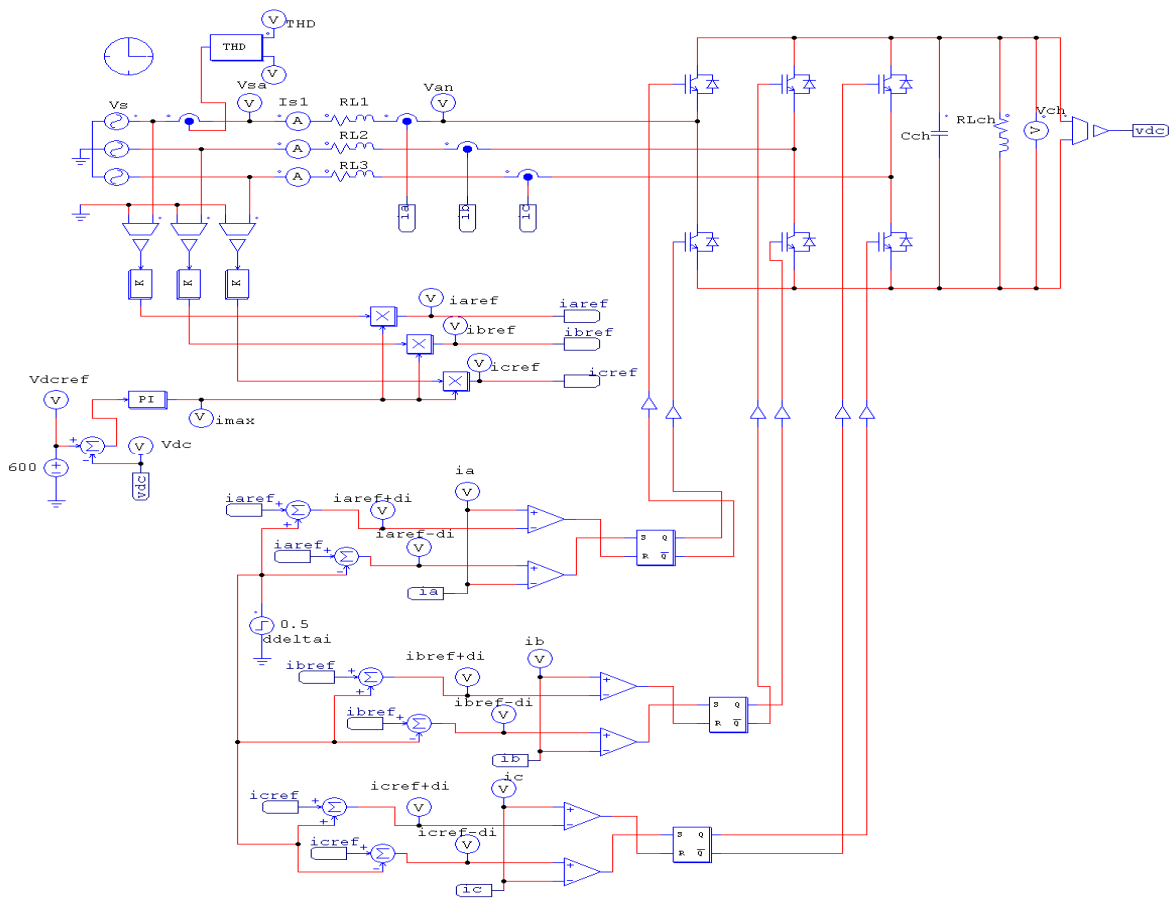


Figure (III.35) Schéma bloc du redresseur MLI avec régulation du tension bus continu.

III.4.3.1 résultats de simulation :

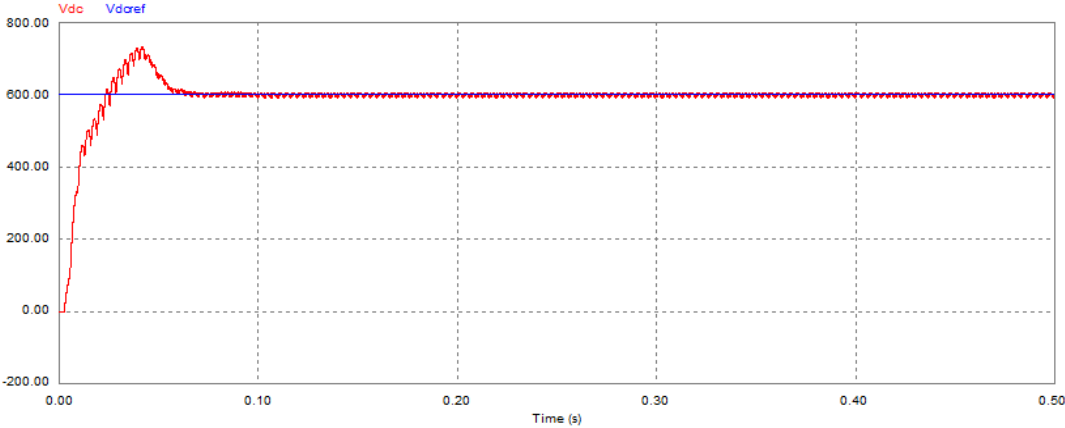


Figure (III.36) Allure des tensions V_{dc} et V_{dcref} .

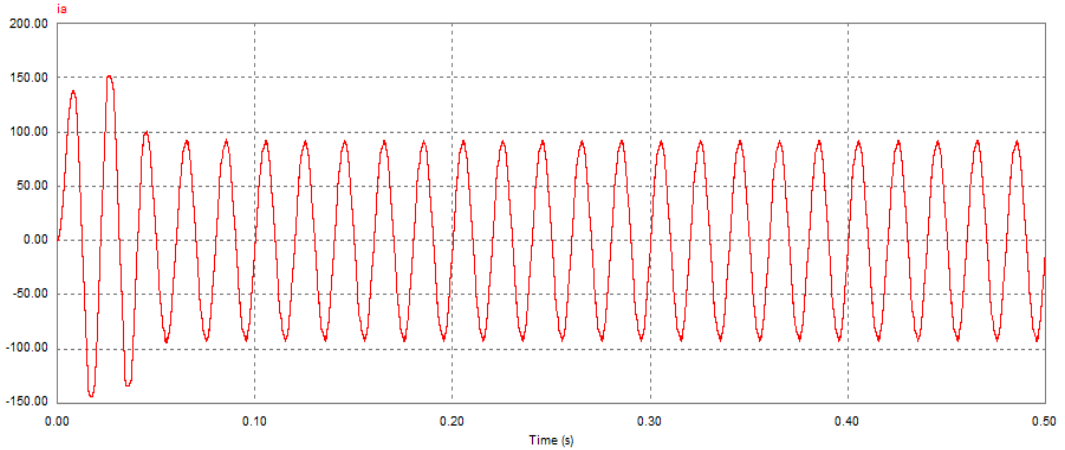


Figure (III.37) Allure du courant I_a de la source.

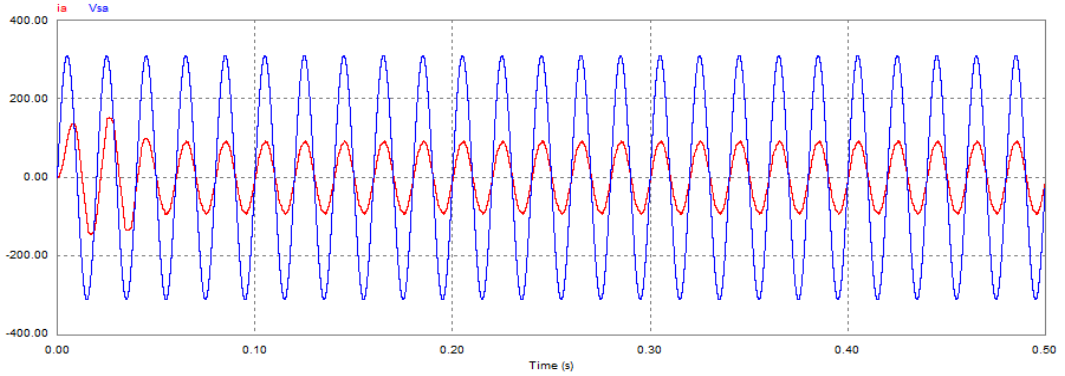


Figure (III.38) Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source.

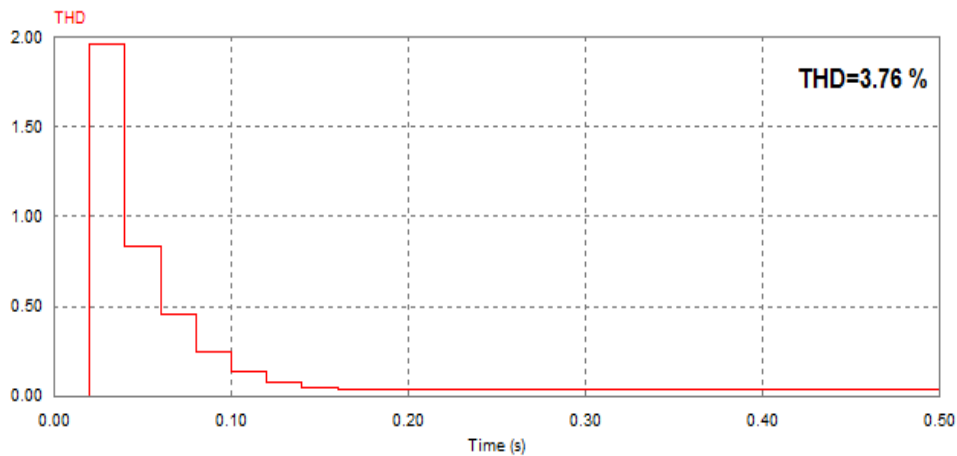


Figure (III.39) Le THD de courant du réseau.

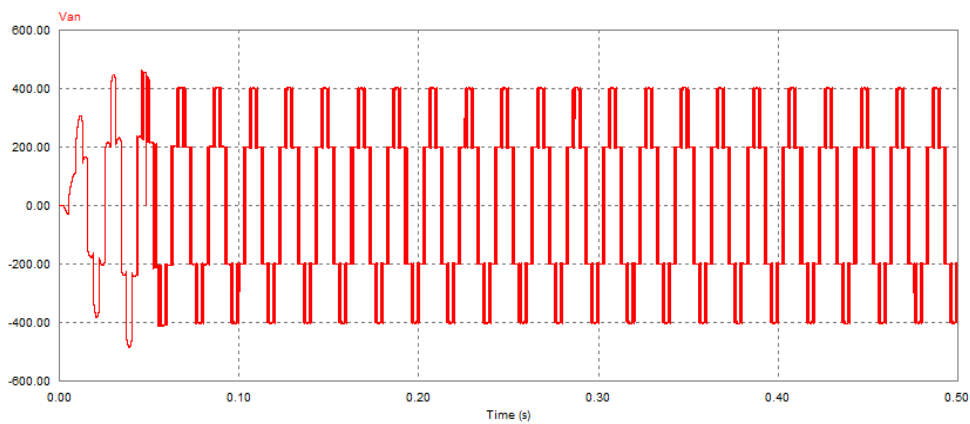


Figure (III-40) Tension d'entrée du pont convertisseur V_{an} .

III.4.3.2 interprétation des résultats :

La figure (III.36) montre que la tension V_{dc} suit la référence V_{dcref} avec une dynamique très rapide.

La figure (III.38) représente le courant et la tension de la source. On remarque que la tension est en phase avec le courant. Donc un facteur de puissance unitaire et la consommation de la puissance réactive est pratiquement nulle.

La figure (III.39) représente Le THD de courant du réseau de 3.76%.

III.4.3.3 variation de la tension de référence :

Pout tester la robustesse de la régulation, la figure (III-41), montre le comportement du système dans le cas de la variation brusque de la tension V_{dcref} de 600v à 700v. Après un régime transitoire, la tension suit parfaitement sa référence et la consommation de la puissance réactive reste toujours nulle, parce que la tension de la source V_{sa} est en phase avec le courant I_a (figure III-41) ce qui permet d'avoir un facteur de puissance unitaire.

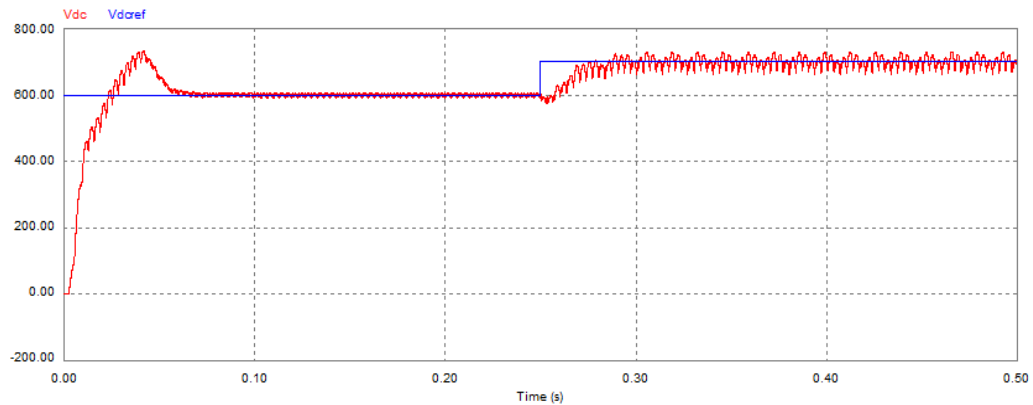


Figure (III.41) Allure des tensions V_{dc} et V_{dcref} .

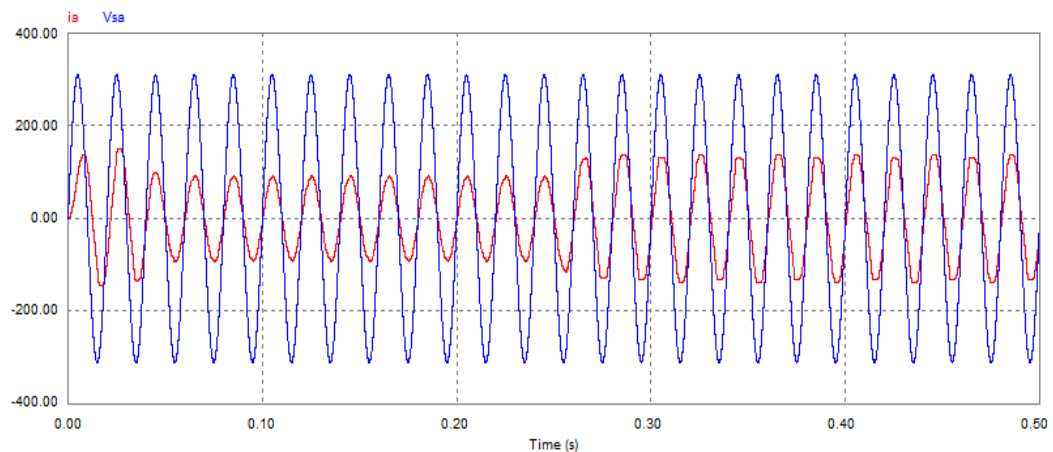


Figure (III.42) Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source.

III.5 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre le redresseur MLI et le principe de fonctionnements, ce filtre ont des inconvénients le principal inconvénient du redresseur MLI est que la méthode de contrôle en courants présente quelques inconvénients. En effet le correcteur à hystérésis produit une fréquence de commutation variable. D'autre part cette méthode nécessite trois ou deux capteurs de courant, et trois ou deux capteurs de tension en plus du capteur de tension du bus continu.

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons étudier le filtre actif parallèle. Sa structure a été divisée en deux parties, la partie puissance et la partie contrôle-commande. Dans la partie puissance on a les trois principaux blocs de cette structure. L'onduleur de tension est un élément fondamental de ce filtre, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans la partie contrôle-commande, on a l'identification des courants perturbateurs et la régulation du courant injecté par l'onduleur.

Deux méthodes d'identification sont utilisées : la méthode des courants et la méthode des puissances instantanées.

IV.2 Filtre actif parallèle :

IV.2.1 La structure générale du filtre actif parallèle [9]:

La structure générale du filtre actif parallèle est présentée dans la figure (IV.1) sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande

- **La partie puissance :** est constituée :

- D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandable à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, etc ...) avec des diodes antiparallèle.
- D'un circuit de stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie peut être par une source de tension continue V_{dc} , ou par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} . Le choix des paramètres (V_{dc} et C_{dc}) s'affecte sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle.

- D'un filtre de sortie :

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, et pour satisfaire les deux critères suivants :

- ✓ assurer la dynamique du courant.
- ✓ empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

- **La partie contrôle-commande :** est constituée de :

- La méthode d'identification des courants perturbateurs.
- La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension :

dans ce travail on utilise le régulateur PI pour réguler le courant du filtre actif parallèle.

- La commande de l'onduleur de tension :

Le but de la commande de l'onduleur est le contrôle des courants à la sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le principe est basé sur la comparaison entre les courants de sortie du filtre et leur références identifiés à partir des différentes méthodes d'identification.

Pour la régulation du courant de l'onduleur : les deux méthodes présentes sont utilisées par hystérésis et à MLI sinus-triangulaire.

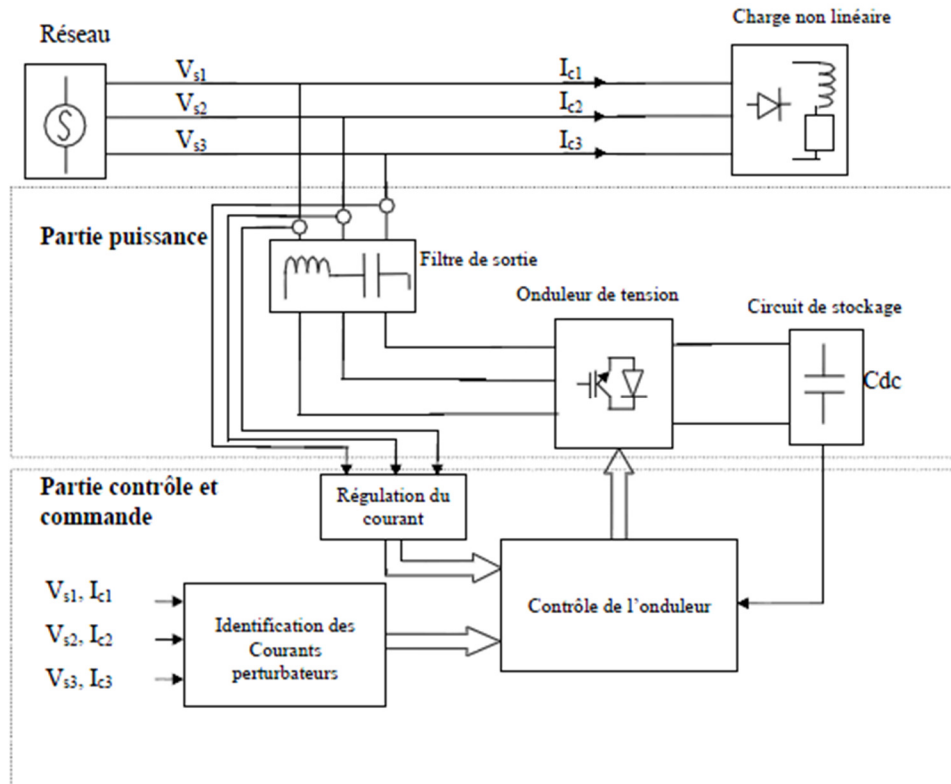


Figure (IV.1) : Structure générale du filtre actif parallèle

IV.2.2 Onduleur de tension triphasé : [2]

L'onduleur de tension est l'élément clé du filtre actif. Utilisant l'énergie emmagasinée dans le système de stockage de l'énergie, il débite une tension générera un courant à l'image de son signal de référence qui sera déterminé à partir du signal de référence du filtre actif "Iref" et du courant généré par ce dernier "I_{inj}"

IV.2.3 Principe des onduleurs MLI :

l'onduleur MLI est constitué des interrupteurs commandable à l'ouverture et à la fermeture comme les semi-conducteurs (GTO, IGBT, ...) connecté en antiparallèle avec une diode. On détermine les instants de fermeture et d'ouverture de ces interrupteurs à l'aide d'une électronique, la tension de sortie se compose de plusieurs "impulsions" formées par l'ouverture

et la fermeture des interrupteurs, par les intersections de l'onde de référence U_{ref} représentant la tension de sortie recherchée de fréquence f avec l'onde de la porteuse, de fréquence f_p très supérieure à f . (le cas la commande sinus-triangulaire)

Deux indices caractérisent la commande des interrupteurs :

- L'indice de modulation : $m = \frac{f_p}{f}$ avec $m \gg 1$;
- Le coefficient de réglage : $r = \frac{U_{ref\ max}}{U_p}$

f_p, U_p : Respectivement la fréquence et l'amplitude de la porteuse ;

$f, U_{ref\ max}$: Respectivement la fréquence et l'amplitude maximale de la référence.

IV.3 Méthodes d'identification des courants harmoniques :

IV.3.1 Généralités sur les méthodes d'identification : [9]

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles d'approche.

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

IV.3.2 Méthode des courants :

le principe de cette méthode, est d'identifier les courants harmoniques à partir du courant total. Et forcé l'onduleur à injecter des courants harmoniques inverses dans le réseau, ce qui permet d'éliminer ces harmoniques.

On capte le courant de charge polluante, ce courant est filtré par un filtre passe bande du deuxième ordre, ce qui permet d'éliminer la composante harmonique et ne laisse passer que la composante fondamentale. Le courant total moins la composante fondamentale

Nous donne le courant harmonique. Le courant injecté de l'onduleur est réglé autour de ce courant harmonique de référence. Les deux techniques de régulation : MLI sinus-triangulaire et hystérésis sont utilisées.

Le filtre de sortie L_f est utilisé pour relier l'onduleur au réseau et pour empêché les composantes de la commutation de se propager sur le réseau.

IV.3.2 .1 Algorithme de la méthode des courants :

Le courant absorbé par la charge est composé de composante fondamentale et des composantes harmoniques à fréquence multiple de la fréquence fondamentale.

$$i_{ch} = i_{ch1} + \sum_{h=2}^{\infty} i_h \quad (\text{IV-1})$$

avec :

i_{ch} : le courant total de la charge.

i_{ch1} : le courant fondamental absorbé par la charge.

i_h : le courant harmonique absorbé par la charge.

Le filtre paase bande du deuxième ordre à pour but d'extraire la composante fondamentale du courant. La fréquence centrale est choisie égale à la fréquence fondaamentale ($f_c=50\text{Hz}$). Cette méthode est caractérisée par la simplicité.

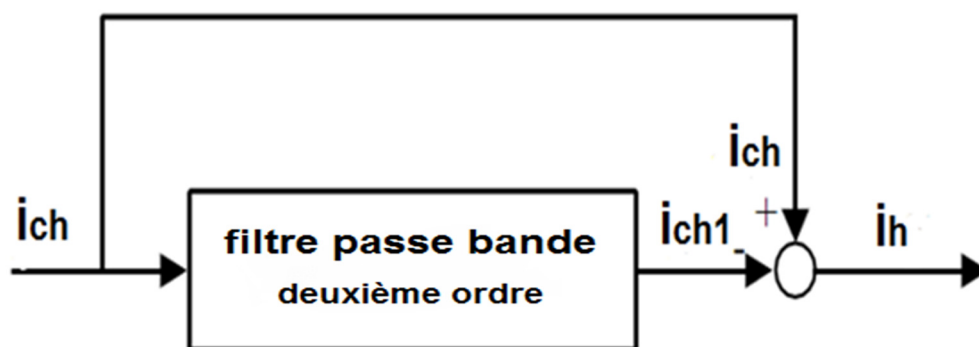


Figure (IV.2) : Schéma représentant le principe d'identification des courants harmoniques.

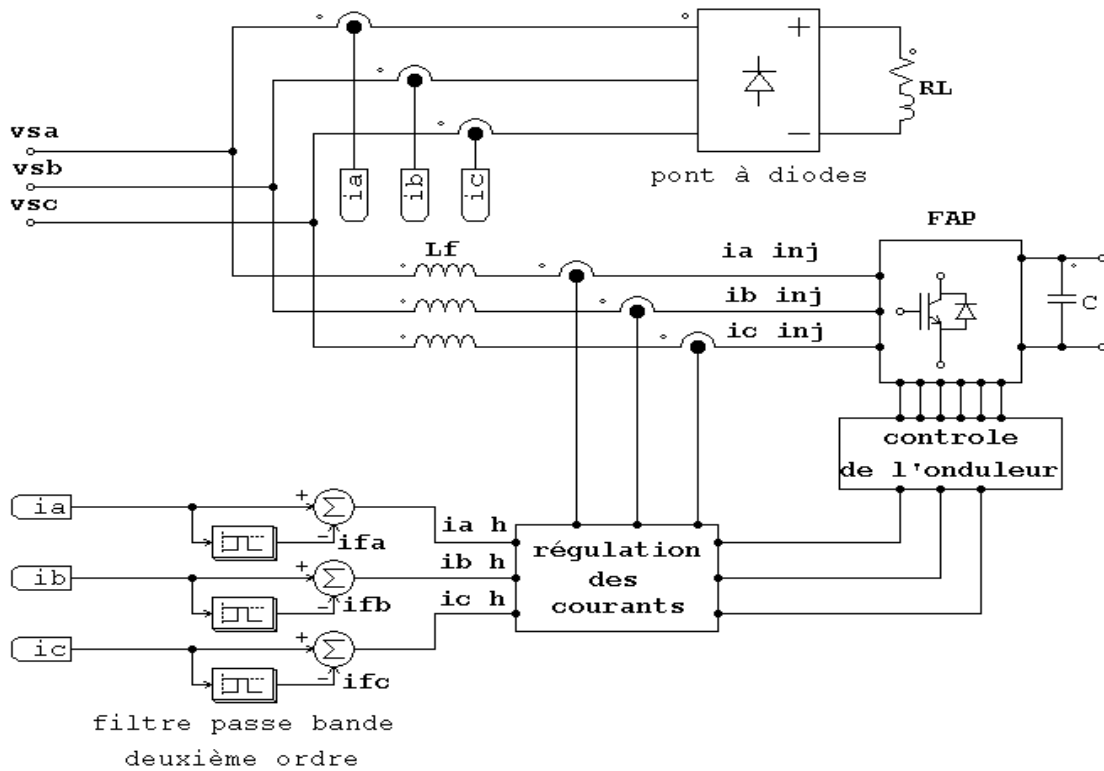


Figure (IV.3) Algorithme de la méthode des courants associé au filtre actif parallèle.

IV.3.3 Méthode des puissances instantanées :

IV .3.3.1 Généralités sur les puissances instantanées :

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \tag{IV-2}$$

Cette méthode exploite la transformation (α - β) (Concordia) pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère (α - β) associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation (α - β -0) permet d'écrire, la relation des tensions suivante :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} \tag{IV-3}$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_{c0} \\ I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-4})$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension.

La puissance active instantanée, notée $P(t)$, est définie par la relation suivante :

$$\begin{cases} P(t) = V_{S1}I_{c1} + V_{S2}I_{c2} + V_{S3}I_{c3} = P(t) + P_0(t) \\ P(t) = V_{s\alpha}I_{c\alpha} + V_{s\beta}I_{c\beta} \\ P_0(t) = V_0I_{c0} \end{cases} \quad (\text{IV-5})$$

Avec $p(t)$ la puissance réelle instantanée, $p_0(t)$ la puissance homolaire 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 :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}}[(V_{S1}-V_{S2})I_{c3} + (V_{S2}-V_{S3})I_{c1} + (V_{S3}-V_{S1})I_{c2}] = V_{s\alpha}I_{c\beta} - V_{s\beta}I_{c\alpha} \quad (\text{IV-6})$$

A partir des relations (III-5) et (III-6), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-7})$$

Dans le cas général, chacune des puissances p et q comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{IV-8})$$

Avec :

- \bar{p} une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension,
- \bar{q} une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension,
- \tilde{p} et \tilde{q} des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

IV .3.3.2 Séparation des puissances perturbatrices :

Les puissances définies précédemment contiennent un terme constant relatif au fondamentale ainsi qu'un terme alternatif correspondant aux harmoniques, afin de ne garder que la partie relative aux harmoniques, la composante continue de la puissance doit être filtré.

Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux artifices de filtrage, un filtre passe-haut ou un filtre passe-bas.

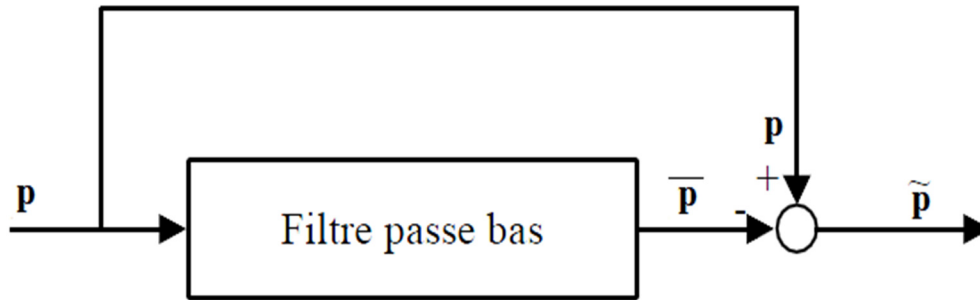


Figure (IV.4): Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

IV .4 Stratégie de l'identification :

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Il existe trois possibilités d'identification des courants perturbateurs :

- 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 utilisée pour le filtre actif parallèle pour compenser les courants perturbateurs causés par les charges polluantes. Cette méthode de détection sera employée dans cette étude.

IV .4.1 Calcul des courants perturbateurs :

En inversant la relation (II-7), nous pouvons recalculer les courants dans le repère $(\alpha-\beta)$ comme le montre l'équation (III-9) :

$$\begin{bmatrix} I_{c\alpha.h} \\ I_{c\beta.h} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (IV-9)$$

En considérant les équations (III-8) et (III-9), nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha-\beta)$ en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} I_{c\alpha.h} \\ I_{c\beta.h} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}} \quad (IV-10)$$

Avec $\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$ supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

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 instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation $\alpha-\beta$ inverse donnée par la relation (III-11) :

$$\begin{bmatrix} I_{cref1} \\ I_{cref2} \\ I_{cref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c\alpha,h} \\ I_{c\beta,h} \end{bmatrix} \quad (IV-11)$$

Avec $I_{c\alpha}$ $I_{c\beta}$ courants perturbateurs calculés dans le repère $\alpha-\beta$ à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (III-10).

IV .4.2 Algorithme d'identification :

Le schéma ci-dessous représente les différentes étapes qui permettent d'obtenir les courant perturbateur due aux présences des charges non- linéaires.

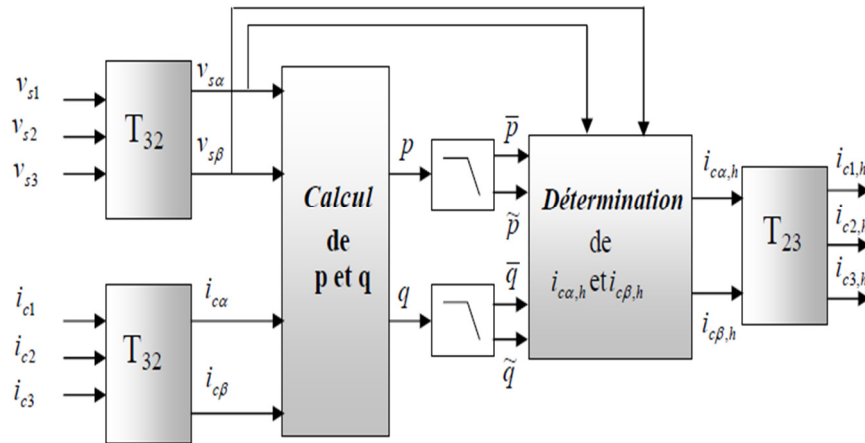


Figure (IV.5): Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées

IV-5 Modélisation et simulation du filtre actif parallèle :

Le système simulé comporte un réseau électrique triphasé à trois fils, une charge non linéaire triphasé (pont à diode) alimentant une charge de type RL et un filtre actif parallèle triphasé à structure tension. les paramètres de la source, de la charge polluante et celles du filtre actif parallèle sont brièvement rappelées suivants :

- modèle de la source :
le réseau électrique est modélisé par une résistance $R_s = 0.5\Omega$ et une inductance $L_s = 0.01$ H, $V_s = 380$ V.
- modèle de la charge polluante :
la charge polluante compose d'un redresseur (pont à diodes) alimentant une charge composée d'une résistance $R_{ch} = 20 \Omega$ en série avec une inductance $L_{ch} = 0.02$ H.
 $C = 0.0002$ F.
- modèle du filtre actif parallèle :
en sortie du filtre, on trouve un filtre passif, qui est représenté par une inductance L_f .
Ce filtre sert d'une part, à connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, d'autre part à empêcher les composantes dues aux commutation de se propager sur le réseau électrique. Les valeurs des éléments caractérisant le filtre actif parallèle sont données suivant :
 $L_f = 0.001$ H, $V_{dc} = 600$ V, $C = 0.004$ f, la fréquence de porteuse $F_p = 5000$ Hz,
la fréquence de la bande passante 20 Hz, la bande d'hystérésis $\Delta i = 0.5$ A,

IV.5.1 Méthode des courants :

IV.5.1.1 résultats de simulation :

- régulation du courant par MLI sinus- triangulaire.

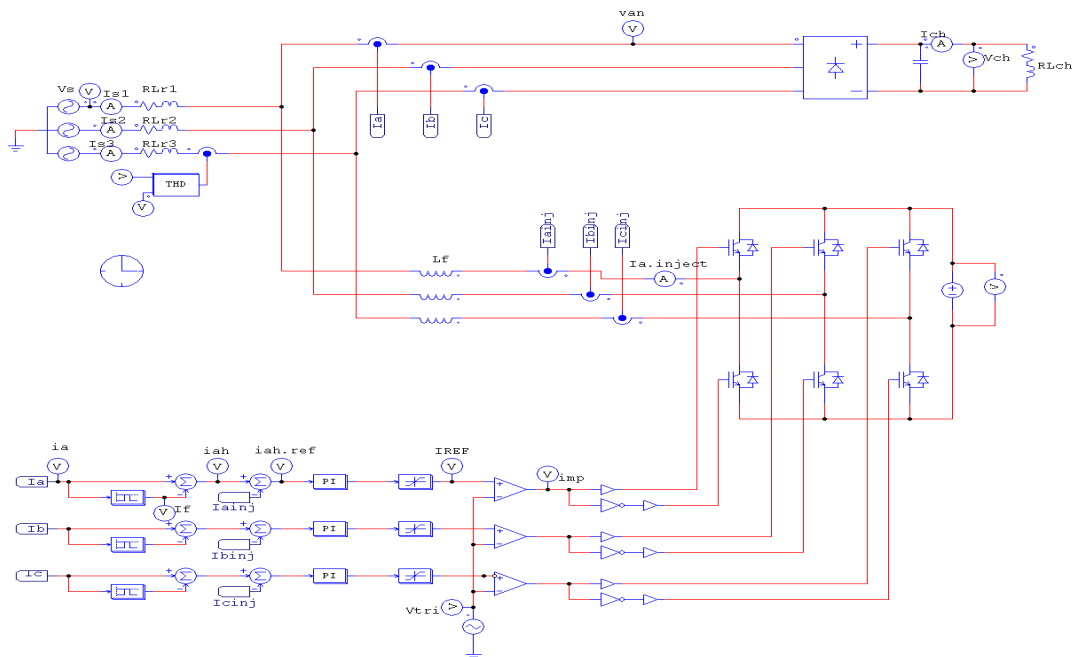


Figure (IV.6) Schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par MLI sinus-triangulaire.

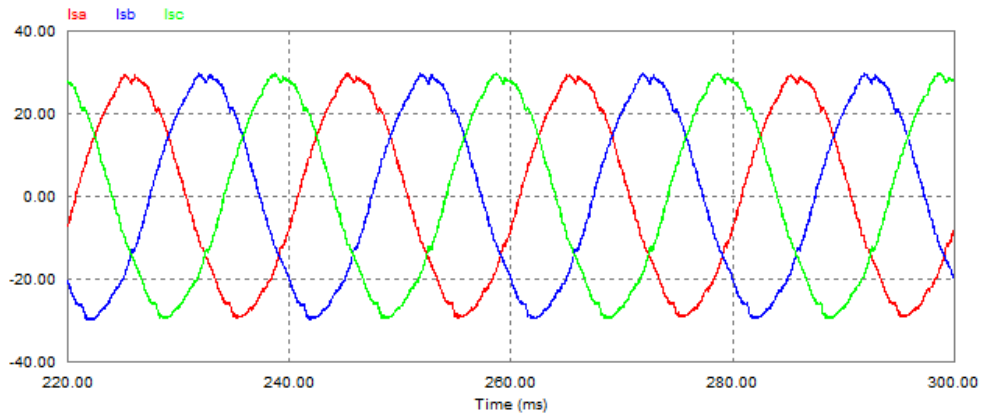


Figure (IV.7) Allures des courants de la source après compensation.

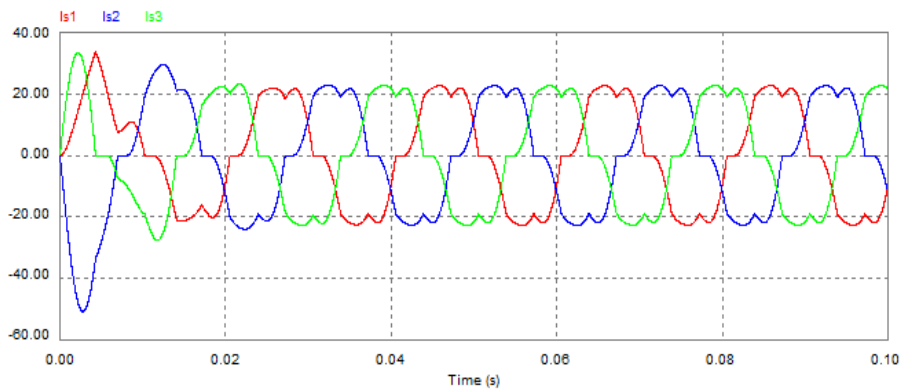


Figure (IV.8) Allure du courant de la charge.

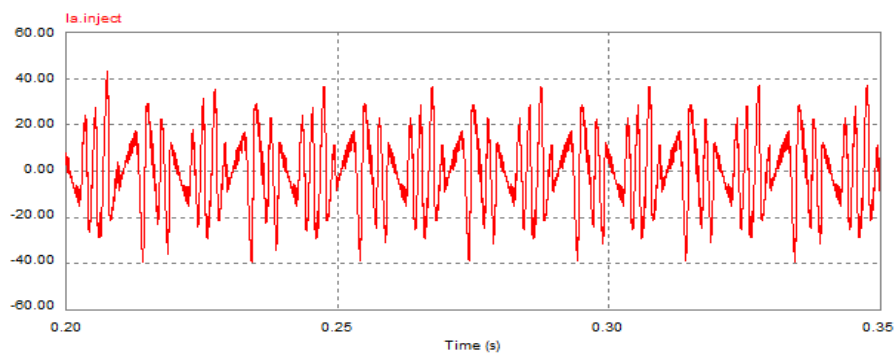


Figure (IV.9) Allure du courant injecté par le filtre actif.

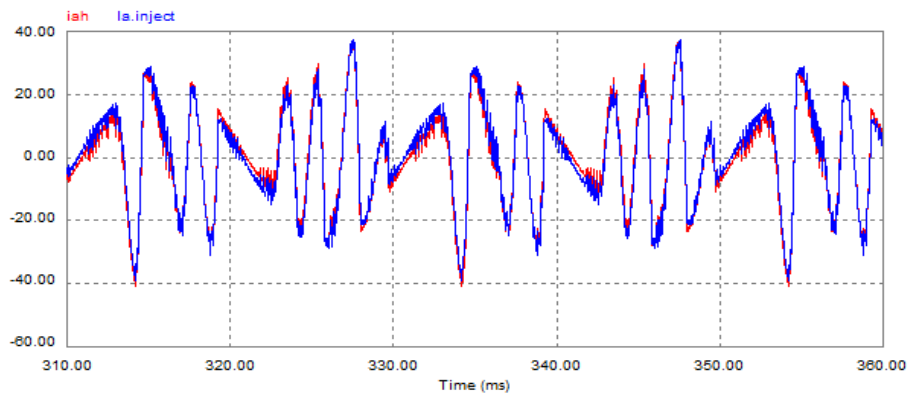


Figure (IV.10) Allures du courant harmonique de référence et le courant injecté par le filtre.

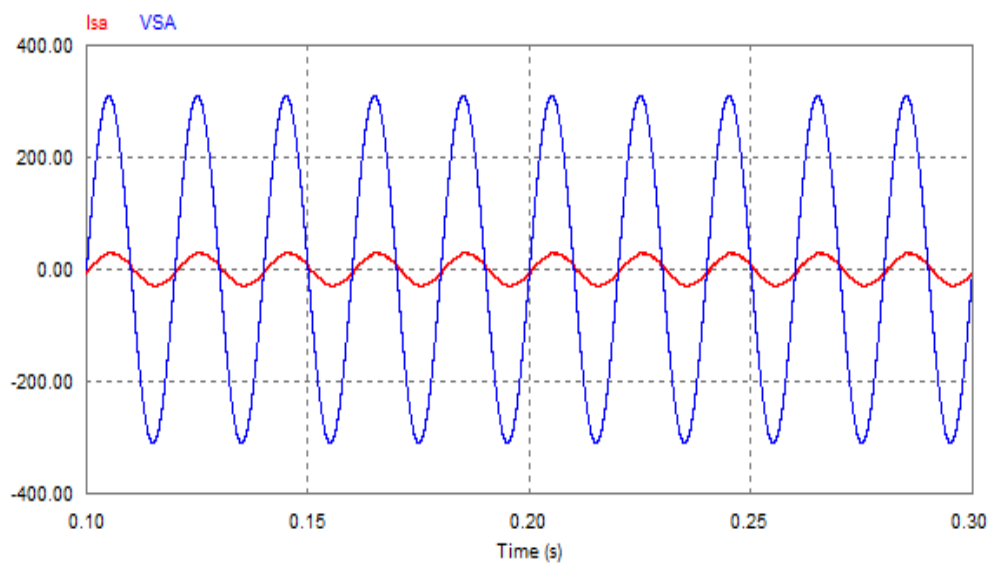


Figure (IV.11) Allures du courant et de la tension de la source.

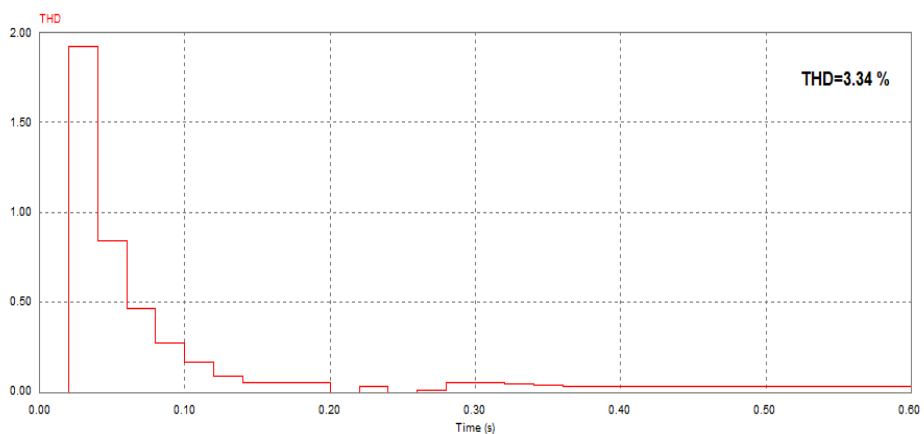


Figure (IV.12) le THD de courant de la source après compensation.

- commande du courant par hystérésis :

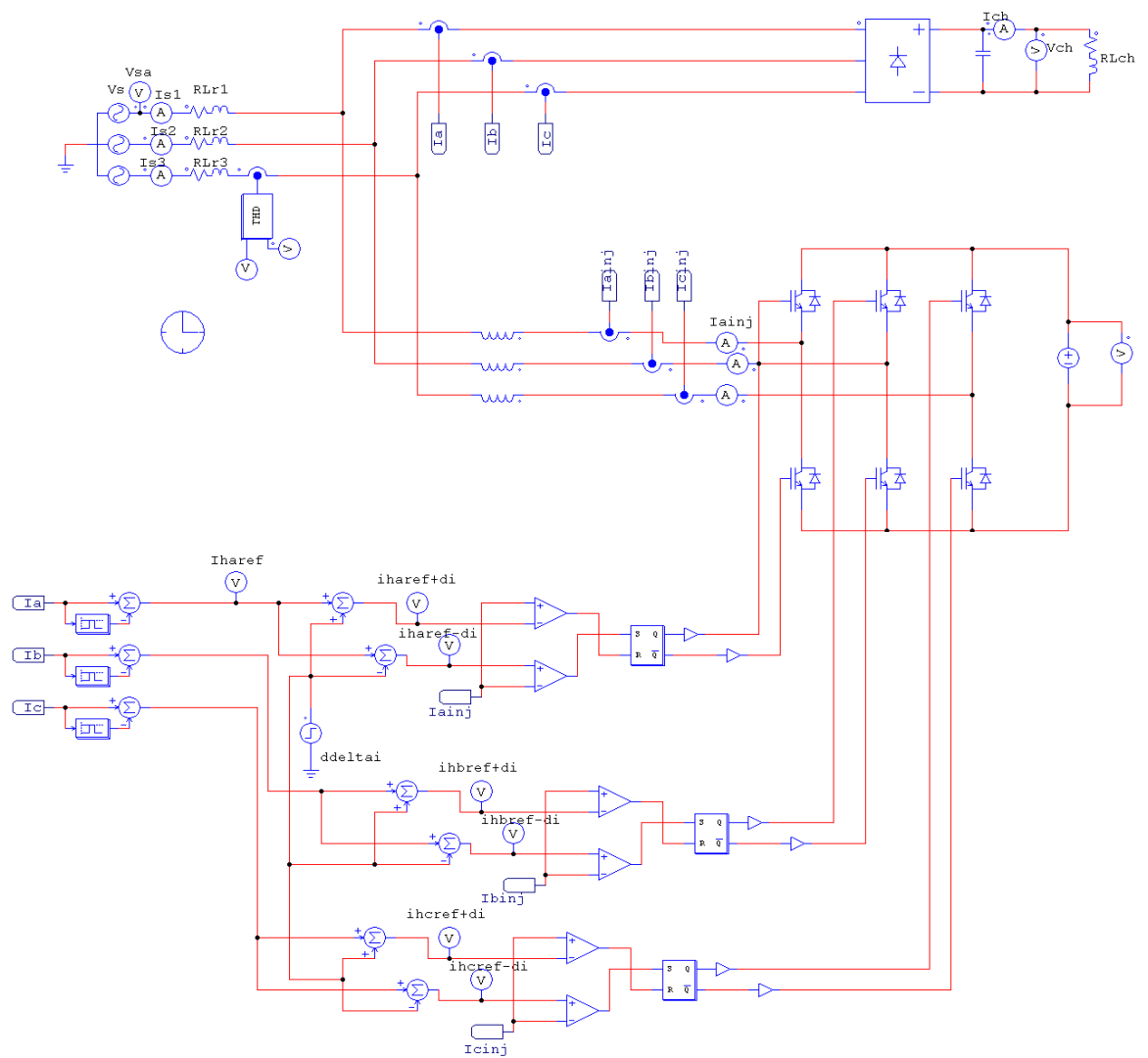


Figure (IV.13) schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par hystérésis.

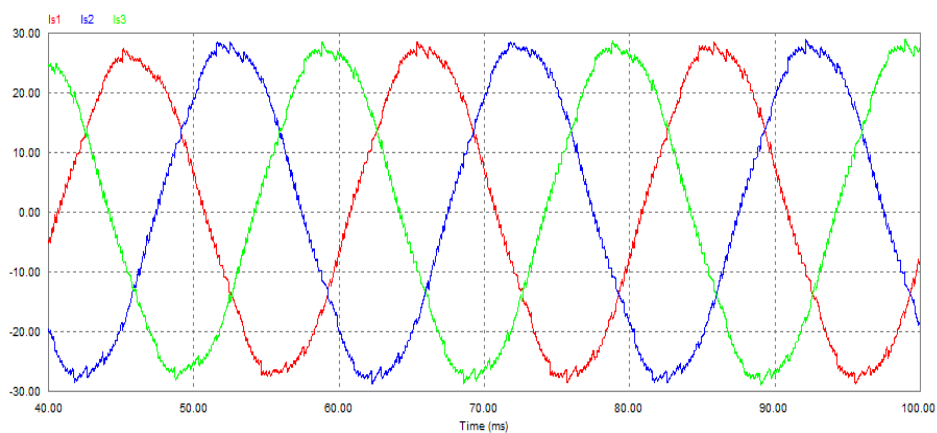


Figure (IV.14) Allures des courants de la source après compensation.

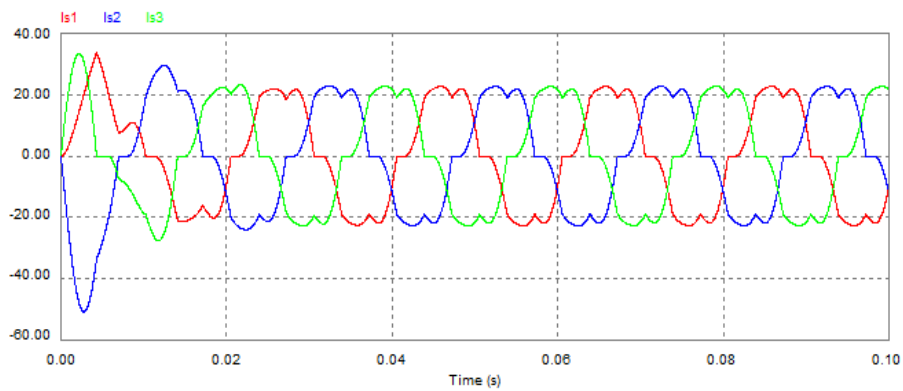


Figure (IV.15) Allure du courant de la charge.

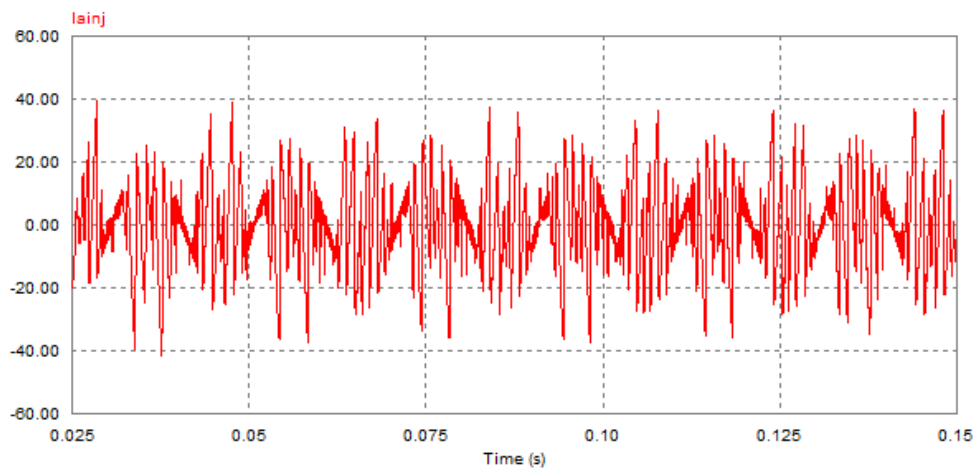


Figure (IV.16) Allure du courant injecté par le filtre actif.

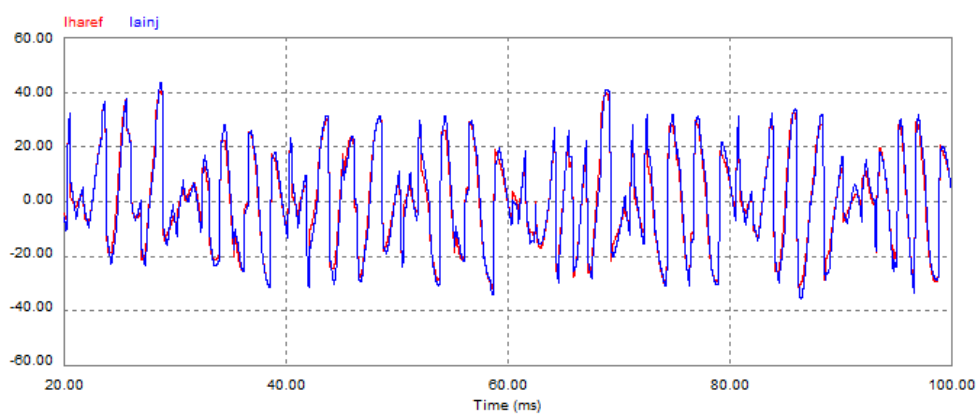


Figure (IV.17) Allures du courant harmonique de référence I_{ah-ref} et I_{ainj} le courant injecté par le filtre actif.

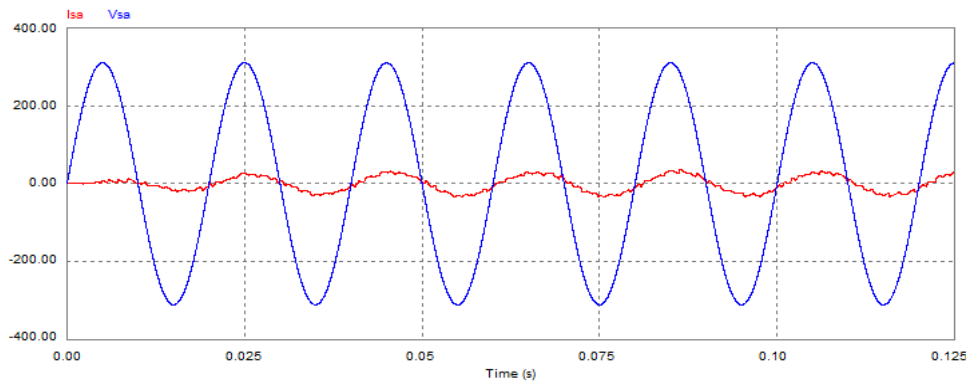


Figure (IV.18) Allures du courant et de la tension de la source.

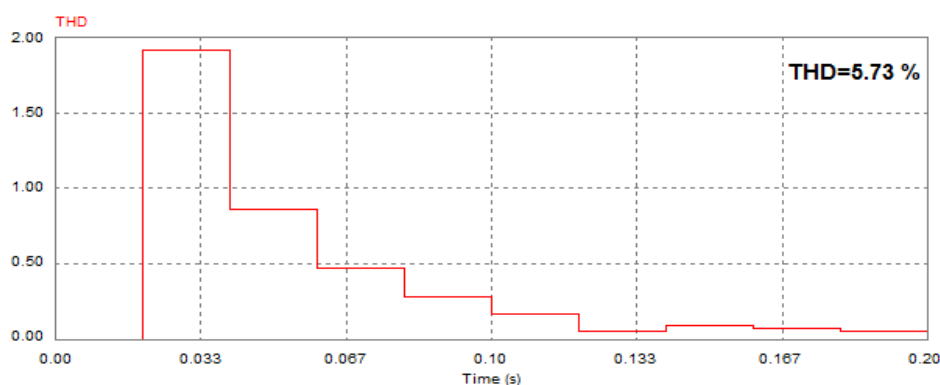


Figure (IV.19) le THD de courant de la source après compensation.

IV.5.1.2 interprétation des résultats :

La figure (IV.7) représenté les allures des courants de la source dans le cas où l'onduleur est commandé par MLI sinus-triangulaire. On constate que la forme est sinusoïdale ce qui minimise les harmoniques.

La figure (IV.10), représente les allures des I_{ah} le courant harmonique de référence et I_{ainj} le courant injecte par le filtre actif dans le cas où l'onduleur est commandé par MLI sinus-triangulaire. On constate que le courant où injecté suit bien sa référence.

La figure (IV.11) représente l'allure du courant et de la tension de la source dans le cas où l'onduleur est commandé par MLI sinus-triangulaire. On remarque que le courant est pratiquement en phase avec la tension, d' où un facteur de puissance unitaire.

La figure (IV.12) le THD de courant de la source après compensation où l'onduleur est commandé par MLI sinus-triangulaire THD= 3.34 %

La figure (IV.14) représenté les allures des courants de la source dans le cas où l'onduleur est commandé par hystérésis. Dans ce cas, on remarque que le courant est de forme sinusoïdale avec des harmoniques à haute fréquence dus au contrôle du courant par hystérésis

La figure (IV.17) représente les allures des I_{ah} le courant harmonique de référence et I_{ainj} le courant injecte par le filtre actif dans le cas où l'onduleur est commandé par hystérésis. On constate que le courant où injecté suit bien sa référence.

La figure (IV.18) représente l'allure du courant et de la tension de la source dans le cas où l'onduleur est commandé par hystérésis. On constate aussi que le courant est pratiquement en phase avec la tension, Ce qui minimise la consommation de l'énergie réactive.

La figure (IV.19) le THD de courant de la source après compensation où l'onduleur est commandé par hystérésis THD= 5.73 %.

IV.5.1.3 Utilisation d'une capacité comme élément de stockage d'énergie :

En remplaçant la source de tension continue à l'entrée de l'onduleur V_{dc} par une capacité destinée au stockage de l'énergie ($C = 0.004$ F).

La figure (IV.20) représente l'allure de la tension aux bornes de la capacité de stockage C, On remarque qu'après un régime transitoire la tension atteins le régime permanent (V_{dc})

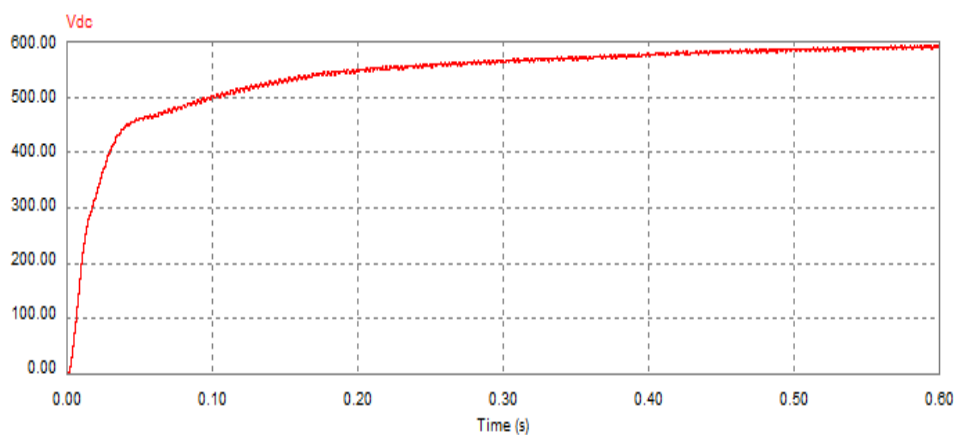


Figure (IV.20) Allure de la tension aux bornes du condensateur à l'entrée de l'onduleur.

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié le filtre shunt utilisé pour minimiser les harmoniques dans le réseau causés par une charge non-linéaire. Deux méthodes sont utilisées pour identifier les courants perturbateurs :

- méthode des courants.
- méthode des puissances instantanées.

Deux méthodes de régulation sont employées : la commande MLI sinus-triangulaire et la commande par hystérésis.

les résultats de simulation montrent les performances de chaque méthode d'identification.

Conclusion Générale :

Dans ce travail nous avons traité le problème de la pollution harmonique des réseaux électriques.

Dans un premier temps, nous avons présenté les sources des harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, en présentant les solutions traditionnelles et modernes pour les réduire, notamment le filtrage passif. Le filtrage actif est une nouvelle solution pour la dépollution harmonique.

Deuxièmement nous avons présenté la modélisation et la simulation du filtrage passif, basé sur l'utilisation de circuits électriques RLC pour modifier localement l'impédance du réseau. Deux types de filtrage sont présentés : le filtre résonnant et le filtre amorti. Les filtres passifs présentent un inconvénient majeur, qui est la résonance avec le réseau.

Le filtre actif peut être connecté sur le réseau en série ou en parallèle avec deux structures différentes : en tension ou courant.

Concernant le filtrage actif nous avons présenté deux structures : Le redresseur MLI à absorption sinusoïdale, en contrôlant le courant par MLI sinus-triangle et par hystérésis. Ensuite nous avons étudié le filtre actif shunt associé à deux méthodes d'identification : la méthode des courants et la méthode des puissances instantanées. Les résultats de simulation montrent les performances et les inconvénients de chaque méthode. Le courant dans ce cas aussi est contrôlé par MLI sinus-triangle et par hystérésis. La régulation du courant par hystérésis est très simple à mettre en œuvre, mais la fréquence de commutation n'est pas constante. Par contre, en MLI sinus-triangle, la fréquence de commutation est constante, elle est imposée par la fréquence de la porteuse. Les résultats de simulation montrent les performances et les inconvénients de chaque méthode.

Bibliographie

[1] : **Abdelmalek BOULAHIA** << Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique >> mémoire magister en électrotechnique Université de Constantine, 2009

[2] : **KIFOUCHE REZKI** << Identification des courants harmoniques et génération du courant référence "application au convertisseur statique">> mémoire magister en génie électrique Université M'hamed Bouguarra Boumerdes , 2005

[3] : **SANAE RECHKA** << étude de méthode de filtrage des harmoniques dans les réseaux électrique de distribution>>, diplôme de maitre et sciences appliquées en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2002.

[4] : **BELHAOUCHET NOURI** << Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées>> thèse de doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, 2011.

[5] : **Mohamed Muftah ABDUSALAM** << Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales >> thèse de doctorat, l'Uninersité Henri Poincaré, Nancy-I, 2008.

[6] : **M. MOUHADJER Samir** << Contribution a l'optimisation du rendement des generateurs photovoltaïques et eoliens par l'integration des systemes electroniques d'adaptation a commande MPPT >> thèse de doctorat en physique, Université Abdou Bekr Belkaid de Tlemcen.

[7] : **DJEBBARMOHAMED SALAH**<<Etude comparative des redresseurs cascades et multi niveaux a commande MLI, diplôme de Magistère en Electrotechnique, UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE 2005.

[8] : **A.GOLEA**<< contribution à une méthodologie de conception des association-convertisseurs machines >> thèse de doctorat INPG France, 1994.

[9] : **Mohamad Alaa Eddin Alali** <<Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension >> thèse de doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 2002.

[10] : **BALI MOUHAMMED GHANEM** << filtrage actif >> mini projet, Université Mohamed Khider Biskra , 2012.

Annexe

i_{c1}	la valeur efficace du courant fondamental
i_{ci}	les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le domaine
i_{sref}	Le courants de référence de la source
i_h	Le courant harmonique
S	la puissance apparente
P	la puissance active
Q	la puissance réactive
D	la puissance déformante
I_c	la valeur efficace du courant de la charge
L	Inductance
L_S	L'inductance de la lingue de réseau
L_{ch}	L'inductance de charge
L_f	L'inductance de filtre
C	Capacité
R	Résistance
R_S	Résistance de la lingue de réseau
R_{ch}	Résistance de charge
R_f	La résistance de filtre
f_r	La fréquence de résonance du filtre
f_{max}	La fréquence maximale de commutation
f_p	La fréquence de la porteuse
V_s	La tension de réseau
V_{DC}	La tension continue
V_{ref}	La tension de référence
W	Pulsation

e	Tension instantanée de phase du réseau
$S_{a,b,c}$	États de commutation des interrupteurs du convertisseur de tension
v_{ab}	les tensions d'entrée du redresseur
V_{ref}	La tension de référence
V_{tria}	la tension de la porteuse triangulaire
E_m	Tension de phase maximale du réseau
m	L'indice de modulation
r	Le coefficient de réglage ou le taux de modulation
V_m	L'amplitude de la tension de référence
U_{pm}	L'amplitude de la porteuse
ϵ_k	L'écart entre le courant réel et sa référence
Δi	La bande d'hystérésis
k_p	Paramètre proportionnel
k_i	Paramètre intégrateur
I_{inj}	Le courant injecté par le filtre
V_α, V_β	Les composantes orthogonales du repère (α - β)
I_α, I_β	Les composantes orthogonales du repère (α - β)
Δ	Constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée