

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DÉPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du Master en Electronique

Thème :

Etude et simulation des filtres actifs

Encadré par :

LARBES Chérif

Réalisé par :

NEKKACHE Abdesslem

Soutenu publiquement le **16 Juin 2015** devant le jury composé de :

M.HADDADI

Professeur ENP

Président

C.LARBES

Professeur ENP

Rapporteur

A.CUELLAL

CDER

Rapporteur

I.SAADAOU

Maitre de conférences

Examineur

ENP 2015

ملخص :

بعض الأجهزة تستهلك تيارات غير جيبيه وعموما القدرة التفاعلية، هاتان الظاهرتان تتسببان في عدة اضطرابات تصل إلى حد تعطيل و تخريب جزء من الأجهزة المتصلة بالشبكة. في هذا العمل درسنا حول بعض اللاتوفيقات المتولدة عن جسر مقوم ثلاثي الطور واستعمال مرشح فعال على التوازي ثم قمنا بالمحاكات بواسطة **MATLAB SIMULINK**

كلمات مفتاحية: مرشح فعال, اللاتوفيقات, تيارات غير جيبيه

ABSTRACT

Some devices generate non sinusoidal currents and absorb reactive power. These perturbations (harmonics) are the origin of many problems and affect electrical equipments connected to the power supply. In this work an active power filter is used to eliminate harmonics generated by a non linear load A simulation by MATLAB SIMILINK of power supply, active power filter and a non linear load

Key words: active filter, harmonics, non-sinusoidal currents

Résumé

Certaines appareils électriques consomment des courants non sinusoïdaux et généralement de la puissance réactive, ce qui engendre un nombre de problèmes allant du dysfonctionnement d'un équipement jusqu'à sa destruction, dans ce mémoire on a étudié quelques filtres actifs qui éliminent ces harmoniques par simulation à l'aide de MATLAB SIMULINK

Mots clés: filtre active, harmonique, courant non sinusoïdal

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À mes très chers parents qui m'ont toujours encouragé durant mes années d'étude. Je vous souhaite Longue vie cher père chère mère.

À mes frères Abderrahim, Younes, Tarek et mon adorable sœur Amel et à Syrine, auxquels je souhaite un meilleur avenir.

À mes grands-parents, À mes tantes et oncles et toute ma famille de proche ou de loin.

À mes amis et à toutes les personnes qui ont une place spéciale dans ma vie.

Abdesslem

Remerciement

Nous tiendrons à remercier dieu de nous avoir donné la patience de terminer ce travail.

Nos remerciements les plus particuliers vont à notre promoteur monsieur C. LARBES pour son suivi, son aide et son soutien matériel, ses précieux conseils et sa disponibilité.

Nos remerciements vont également à monsieur A.GUELLAL pour son aide précieuse, son suivi en programmation et sa disponibilité.

Nous adressons nos sincères remerciements les membres de jury :

Mr : M. HADDADI, Mr : I. SAADAOUI d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous voudrions exprimer nos profonds respects à tous les Enseignants qui nous ont encadrés durant notre étude.

Liste des figures :

Figure 1.1: Décomposition d'un signal periodique

Figure 2.1: Schéma principe d'un filtre actif

Figure 2.2: Exemple de forme d'onde

Figure 2.3: Structure générale d'un filtre actif parallèle

Figure 2.4: Structure tension

Figure 2.5: Structure courant

Figure 2.6: Schéma de l'onduleur monophasé.

Figure 2.7: Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension.

Figure 2.8: Schéma de principe d'un onduleur commandé par hystérise

Figure 2.9: Schéma synoptique de la loi de modulation triangulo-sinusoidale.

Figure 2.10: Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives P et q

Figure 2.11 : Algorithme 'P-Q' d'extraction des courants harmoniques.

Figure 3.1: Blocs de "power_active_filter" dans SIMULINK

Figure 3.2: Bloc "source triphasée"

Figure 3.3: Bloc de mesure source

Figure 3.4: Bloc "active harmonic Filter"

Figure 3.5 : Bloc de partie puissance de filtre

Figure 3.6: Bloc de partie commande de l'onduleur

Figure 3.7 : Bloc visualisation des signaux

Figure 3.8: Les graphs des courants et des tensions dans les trois branches

Figure 3.9: Bloc de charge non linéaire

Figure 3.10: Graph de Vdc1 et Vdc2

Figure 3.11: Bloc "measurement"

Figure 3.12: Graph de l'erreur absolue entre Iref et Isource

Figure 3.13: Interface "power_active_filter/powergui"

Figure 3.14: Fenêtre "Powergui FFT Analysis Tool"

TABLE DES MATIERE

Introduction	1
I. L'origine des harmoniques et leurs effets sur le réseau	3
I.1 Définition	3
I.2 Décomposition d'un signal périodique	3
I.3 Notion des charges	5
I.4 Origines et sources des harmoniques	5
I.5 Différents types d'effets	5
I.6 Dépollution des réseaux électriques:	6
I.6.1 Solutions traditionnelles de dépollution	6
I.6.2 Solutions modernes de dépollution	6
II. Filtres actifs	9
II.1 Principe du filtre actif parallèle	9
II.2 Structure d'un filtre actif parallèle	10
II.2.1 Structure tension	11
II.2.2 Structure courant	12
II.3 Généralité sur les onduleurs	13
II-3.1 Notions sur les onduleurs [5]	13
II.3.2 Types d'onduleurs de tension [6]	13
II.4 La commande de l'onduleur	14
II.4.1 Commande par hystérésis	14
II.4.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	15
II.5 Identification des courants de référence	16
II.5.1 Méthodes de l'identification des courants harmoniques	16
II.5.2 Méthode des puissances instantanées	16
III. Simulation d'un filtre passif à l'aide de SIMULINK	23
Conclusion	32

Introduction

Dans les réseaux électriques il existe toujours des charges non linéaires qui donnent pour une tension sinusoïdale un courant non sinusoïdal, ce dernier est composé de plusieurs harmoniques qui peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. Ils ont des effets néfastes sur leur fonctionnement leur rentabilité et leur durée de vie et peut causer même un dysfonctionnement de certains équipements. En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.

Pour faire face à ce problème, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation des filtres passifs. 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.

Cependant, les progrès remarquables réalisés au cours des dernières années, dans le domaine des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables, et les transistors en particulier, a permis de concevoir des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptables appelés compensateurs actifs d'harmoniques, ou encore filtre actif dont l'objectif est l'élimination des problèmes intrinsèques des filtres passifs [1]

Dans ce mémoire on va parler sur l'origine des harmoniques et leurs effets, et puis on va parler sur les filtres actifs parallèles. Enfin on va faire une simulation sous **MATLAB SIMULINK** et présenter les résultats obtenu

Chapitre I

CHAPITRE I: L'origine des harmoniques et leurs effets sur le réseau

I.1 Définition

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 HZ et 2000 HZ (entre les harmoniques de rangs $h=2$ et $h=40$). Il peut exister dans la tension des réseaux des sous harmoniques.

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique; dans notre cas c'est la (50 HZ ou 60 HZ). L'harmonique d'ordre zéro correspond à la composante directe du signal, l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre. Les premiers rangs harmoniques tel que (5,7) ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes. L'amplitude de l'harmonique de rang (h) du côté de la source est donnée par :

$$I_h = \frac{I_1}{h^{(1-1)}} \quad (1)$$

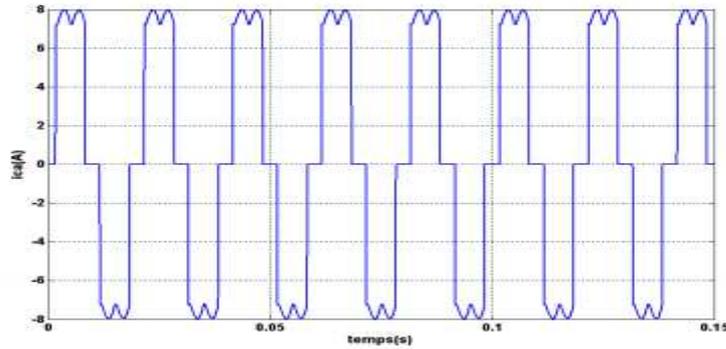
h : harmonique d'ordre h

I_1 : amplitude du courant fondamentale

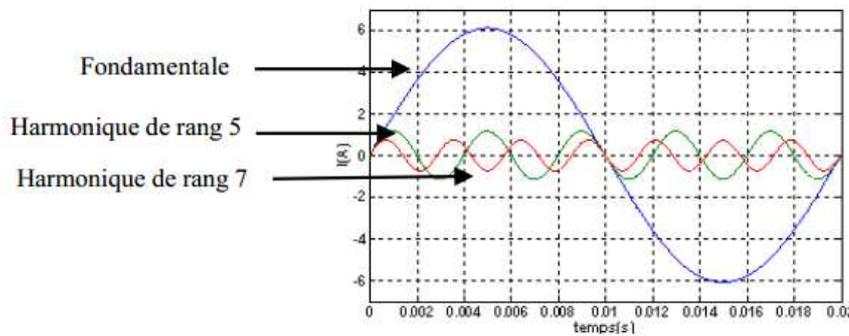
I_h : amplitude de l'harmonique de rang (h) [1]

I.2 Décomposition d'un signal périodique

Un signal déformé se compose généralement de plusieurs harmoniques dont la fréquence est un multiple entier de fréquence fondamentale f . [2]



(a) Signal déformé



(b) Décomposition en plusieurs signaux

Figure 1.1: Décomposition d'un signal périodique

Dans le cas d'un courant électrique de fréquence f :

$$i(t) = \langle i \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(n\omega t + \phi_n)$$

$\omega = 2\pi f$: pulsation du fondamental (en radians par seconde)

I_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n (en ampères)

ϕ_n : phase à l'origine de l'harmonique de rang n (en radians)

Pour la tension électrique v de fréquence f :

$$v(t) = \langle v \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot v_n \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n + \phi_n)$$

v_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n (en ampères)

$\phi_n + \varphi_n$: phase à l'origine de l'harmonique de rang n (en radians)

φ_n : déphasage entre l'harmonique de rang n de la tension et l'harmonique de rang n du courant (en radians)

L'amplitude d'une composante harmonique est généralement exprimée en pourcentage de la grandeur fondamentale correspondante, c'est le taux d'harmoniques

$$\text{THD}_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}$$

I.3 Notion des charges

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- les récepteurs linéaires (R,L,C): lorsque on l'alimente par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal même s'il est déphasé.
- les récepteurs non-linéaires lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Cette classe de charges englobe les convertisseurs statiques (gradateurs, redresseurs), les circuits magnétiques saturés, les lampes, ... [1]

I.4 Origines et sources des harmoniques

Les causes principales des harmoniques sont les charges non linéaires. On trouve:

- **Des charges génératrices d'harmoniques de tension:** telle que les alternateurs, les transformateurs et les ASI (Alimentation Statique Ininterruptibles), Le taux de distorsion harmonique produit par ces charges est généralement faible .
- **Des charges génératrices d'harmoniques de courant:**

On peut distinguer différents types de charges perturbatrices :

- Les montages électroniques (les redresseurs à thyristors, Le gradateur monophasé..)
- Les charges non linéaires passives (Les moteurs asynchrones, Les appareils à arc électrique..) [3]

I.5 Différents types d'effets

On distingue deux grands types d'effets.

- 1) Les effets instantanés

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

2) Les effets différés

Ils se manifestent après une longue exposition au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités ou une destruction complète de l'appareil. [4]

1.6 Dépollution des réseaux électriques:

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde consiste à réaliser un filtrage des composantes harmoniques.

La première classe de solutions s'intéresse à la conception des circuits tandis que la seconde consiste à filtrer les courants harmoniques.[9]

1.6.1 Solutions traditionnelles de dépollution

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électrotechniciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation : Transformateur à couplage special, pont dodécaphasé, surdimensionnement des installations électriques, agir sur la structure de l'installation, utilisation une inductances (selfs) série, filtres passifs d'harmoniques,

1.6.2 Solutions modernes de dépollution

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent pas plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveau composant à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui ont permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la fore d'onde de la phase du courant d'entrée.

Nous citerons configurations possibles des filtres actifs

Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant

Le filtre actif série (FAS): conçu pour compenser toutes les perturbations de tension

Le filtre actif hybride (FAH) : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

Chapitre III

CHAPITRE II: Filtrés actifs

II.1 Principe du filtre actif parallèle

Le principe du filtre actif parallèle consiste à générer des harmoniques en opposition de phase à ceux existant sur le réseau. Ceci peut être schématisé sur la figure 1.2

Exemple de filtre passif parallèle

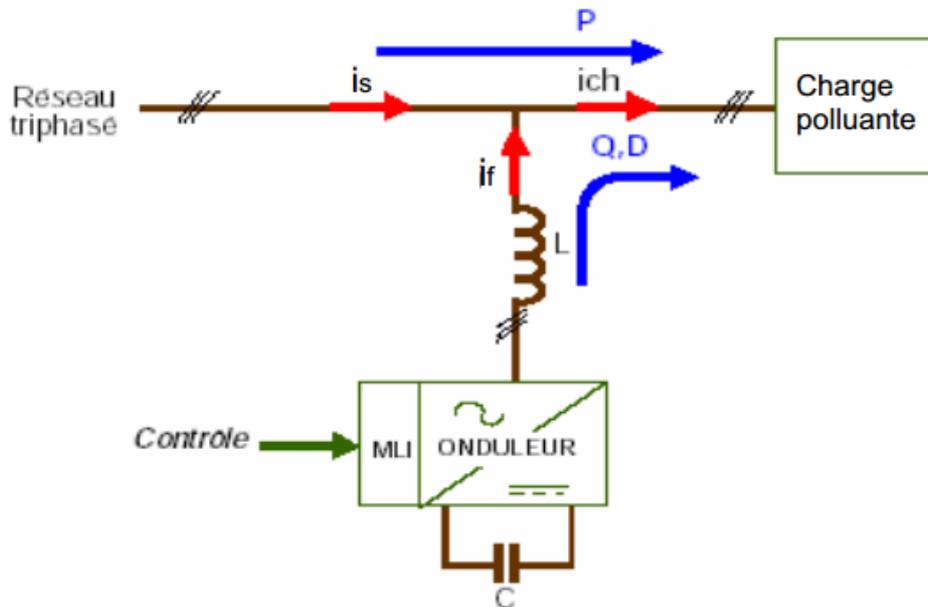


Figure 2.1 Schéma principe d'un filtre actif

Exemple de formes d'ondes avec Charge constituée d'un pont de diodes débitant sur un circuit RL

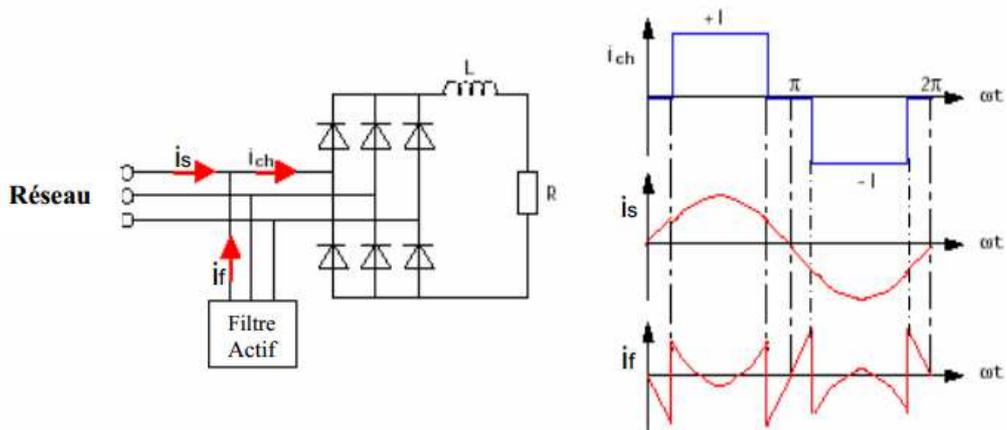


Figure 2.2 Exemple de forme d'onde

Alors que le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le courant fourni par le filtre actif est tel que le courant absorbé du réseau soit sinusoïdal [1]

II.2 Structure d'un filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle, est présentée dans la figure 2.3 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, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, etc....) avec des diodes en antiparallèle.
- D'un circuit de stockage d'énergie.
- D'un filtre de sortie.

La partie contrôle-commande est constituée :

- La méthode d'identification des courants perturbés.
- La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- La commande de l'onduleur de tension.[1]

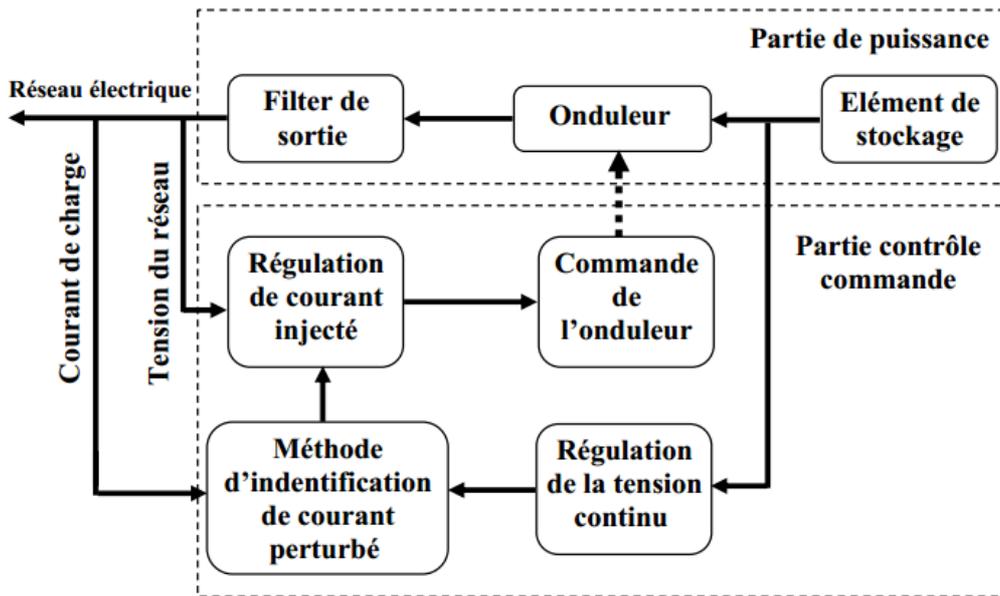


Figure 2.3: Structure générale d'un filtre actif parallèle

II.2.1 Structure tension

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure 2.4. Le condensateur C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V_{dc} doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre. Deux rôles sont dévolus à ce filtre: d'une part transformer les variations de tension V_f en variations de courant, d'autre part filtrer les fréquences de commutation des bras d'onduleur. Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant. Ils sont constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture en anti-parallèle avec une diode.[1]

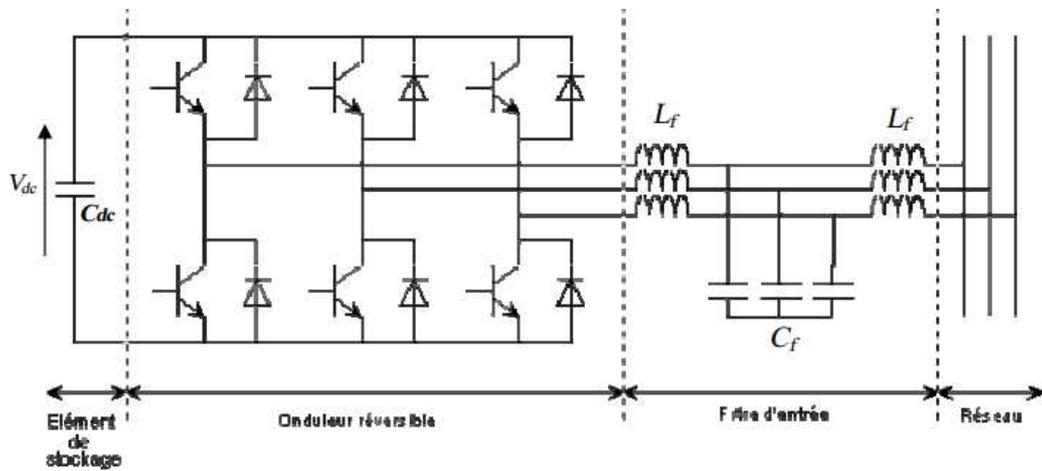


Figure 2.4 Structure tension

II.2.2 Structure courant

La figure 2.5 représente le schéma de principe d'un onduleur de courant. L'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant i_L traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance L_f et d'une capacité C_f . Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [1].

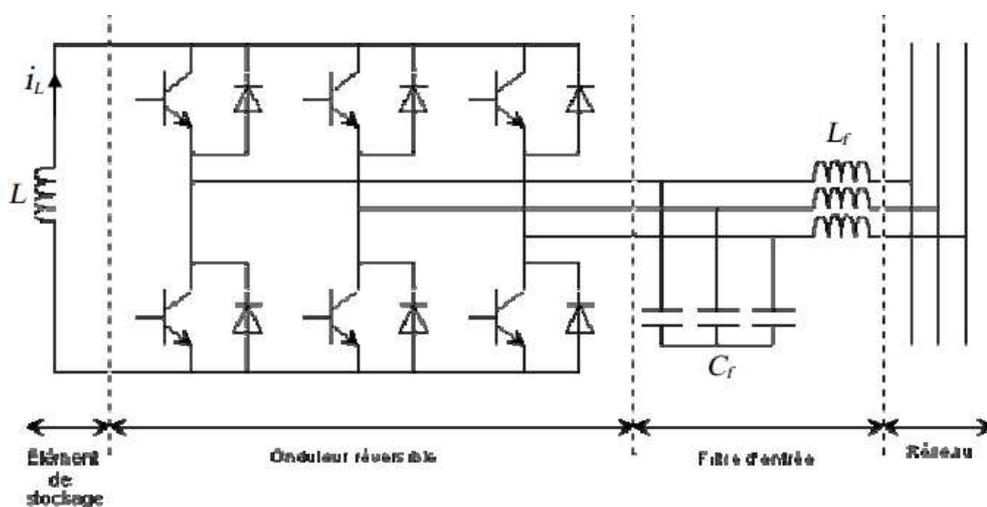


Figure 2.5: Structure courant

II.3 Généralité sur les onduleurs

II-3.1 Notions sur les onduleurs [5]

L'électronique de puissance a permis de développer pleurs moyens qui assurent des entraînements alternatifs à vitesse variable. Parmi ces moyens : les onduleurs autonomes commandés en modulations de largeurs d'impulsion (MLI).

II.3.2 Types d'onduleurs de tension [6]

II.3.2.1 Les onduleurs monophasés

Ce type d'onduleurs est destiné à alimenter des charges alternatives monophasées, ce sont utilisés pour des applications de faible puissance. On distingue deux configurations de base: en demi-pont ou en pont complet.

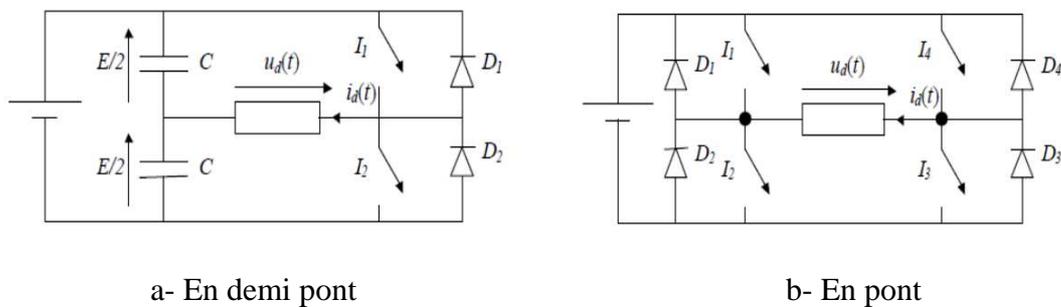


Figure 2.6: schéma de l'onduleur monophasé.

II.3.2.2 Les onduleurs triphasés

Les onduleurs triphasés couvrent la gamme des moyennes et des fortes puissances. L'objectif de cette topologie est de fournir une source de tension triphasée, dont l'amplitude, la phase et la fréquence sont contrôlables.

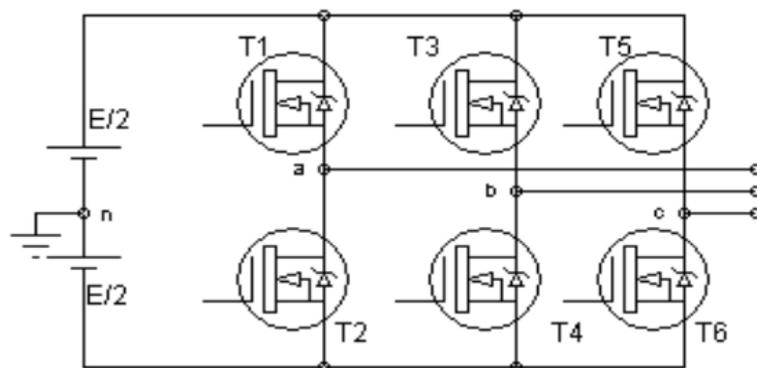


Figure 2.7 Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension.

II.4 La commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont : la commande par hystérésis et la commande par modulation de largeur d'impulsion MLI.

II.4.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.

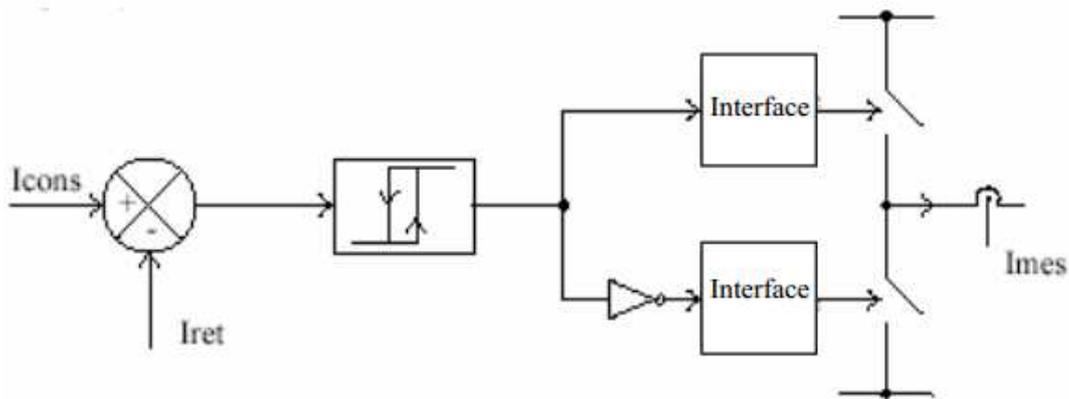


Figure 2.8: Schéma de principe d'un onduleur commandé par hystérèse

Dés que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité, comme le montre la figure (III-7), est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations. Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposée, à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis [1].

II.4.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Dans un onduleur à modulation de largeur d'impulsion, au lieu de former chaque alternance d'une tension de sortie avec un seul créneau rectangulaire, on la forme de plusieurs créneaux de largeur bien spécifiés pour éliminer les harmoniques à fréquences proches de fondamentale.

La modulation de largeur d'impulsion s'avère être la technique la plus appropriée pour la commande de l'onduleur tout en ayant une bonne neutralisation de l'onde de sortie.

Plusieurs techniques d'obtention d'onde MLI sont utilisées pour générer le signal de contrôle nécessaire à la commande et au blocage des éléments semi-conducteurs.

1. Technique MLI engendrée

La commande MLI Triangulo-sinusoidale consiste à comparer une valeur de tension de référence de fréquence F_r , image du signal souhaité à la sortie appelée modulante, à une porteuse triangulaire ou en dent de scie de fréquence F_p .

Les points d'intersection entre la modulante et la porteuse engendrent l'enclenchement/déclenchement constituant ainsi une impulsion de durée variable et l'ensemble de ces impulsions reconstitue, de ce fait, le fondamental de la sinusoïde de référence.

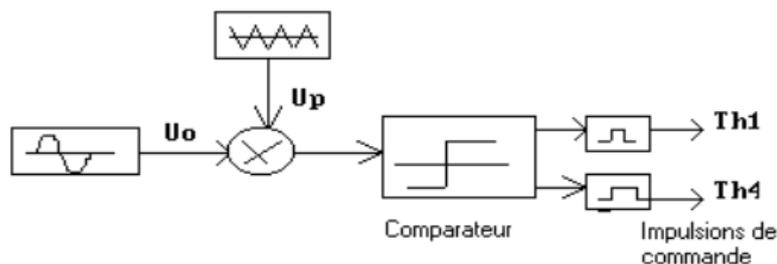


Figure 2.9 : Schéma synoptique de la loi de modulation triangulo-sinusoidale.

2. Technique MLI calculée (programmée)

Cette technique consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs de manière à répondre à certains critères portant sur le spectre fréquentiel de l'onde délivrée par l'onduleur. Ces séquences de fonctionnement sont alors mémorisées et restituées cycliquement pour assurer la commande des interrupteurs. Les critères

usuellement retenus sont : l'élimination d'harmoniques de rangs spécifiés ou l'élimination d'harmoniques dans une bande de fréquences spécifiée

La technique MLI « programmée » est basée sur l'algorithme de Patel et Hoft. Dans cette technique, il est possible d'asservir le fondamental de la tension MLI et d'annuler les amplitudes des (m-1) premiers harmoniques.

La tension MLI « programmée » est définie en fonction des angles exacts de commutation $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ qui correspondent aux instants de commutation de la tension MLI « programmée » d'une valeur positive $+E/2$ à une valeur négative $-E/2$ ou inversement.

II.5 Identification des courants de référence

II.5.1 Méthodes de l'identification des courants harmoniques

La qualité de filtrage réside dans l'efficacité de la méthode utilisée pour l'identification des courants harmoniques. Il existe plusieurs algorithmes qui varient en complexité, Selon leur champ de calcul, ces algorithmes sont classés dans deux domaines: *fréquentiel* et *temporel*. **Dans le domaine fréquentiel on peut citer:** La méthode **de Fourier et de la FFT**, la méthode **de la multiplication sinusoïdale**, la méthode **des séries de Fourier modifiées...** **Et dans le domaine temporel :** La méthode **P-Q de la puissance instantanée réactive**, la méthode repère de référence synchronisée, [8]

II.5.2 Méthode des puissances instantanées

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

On exploite la transformation de Concordia pour obtenir les puissances active et réactive et nécessite un système triphasé de tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale. On note respectivement les vecteurs des tensions simples au point de raccordement $[V_s]$ et des courants de charge $[i_c]$ d'un système triphasé et équilibré par (2) :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [i_c] = \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix}$$

La transformation des valeurs triphasées instantanées de la tension et du courant dans le repère des coordonnées α - β est donnée par les expressions suivantes (3) :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix}$$

et pour les courants (4) :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix}$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement P et q, sont définies par la relation matricielle suivante (5) :

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

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés, on obtient (6) :

$$P = v_{s\alpha} i_{c\alpha} + v_{s\beta} i_{c\beta} = v_{s1} i_{c1} + v_{s2} i_{c2} + v_{s3} i_{c3}$$

De même, pour la puissance imaginaire on a (7) :

$$q = v_{s\alpha} i_{c\beta} - v_{s\beta} i_{c\alpha}$$

On posant (8): $\Delta = v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2$

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

$$= \begin{bmatrix} \dot{i}_{cap} \\ \dot{i}_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{i}_{caq} \\ \dot{i}_{c\beta q} \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \dot{i}_{cap} &= \frac{V_{s\alpha}}{\Delta} P & \dot{i}_{caq} &= -\frac{V_{s\beta}}{\Delta} q \\ \dot{i}_{c\beta p} &= \frac{V_{s\beta}}{\Delta} P & \dot{i}_{c\beta q} &= \frac{V_{s\alpha}}{\Delta} q \end{aligned}$$

Les puissances instantanées selon les axes α et β peuvent s'écrire (9) :

$$\begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \cdot \dot{i}_{c\alpha} \\ V_{s\beta} \cdot \dot{i}_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \cdot \dot{i}_{cap} \\ V_{s\beta} \cdot \dot{i}_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \cdot \dot{i}_{caq} \\ V_{s\beta} \cdot \dot{i}_{c\beta q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ap} \\ P_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{\alpha q} \\ P_{\beta q} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} P_{ap} &= \frac{V_{s\alpha}^2}{\Delta} P & P_{\alpha q} &= -\frac{V_{s\alpha} V_{s\beta}}{\Delta} q \\ P_{\beta p} &= \frac{V_{s\beta}^2}{\Delta} P & P_{\beta q} &= \frac{V_{s\alpha} V_{s\beta}}{\Delta} q \end{aligned}$$

P_{ap} : Puissance instantanée active selon l'axe α .

$P_{\beta p}$: Puissance instantanée active selon l'axe β .

$P_{\alpha q}$: Puissance instantanée réactive selon l'axe α .

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

D'après les expressions (9), on peut écrire (10) :

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

L'analyse de l'équation (10) nous ramène aux conclusions suivantes :
 La somme des puissances instantanées $P_{\alpha p}$ et $P_{\beta p}$ coïncide avec la puissance instantanée dans un circuit triphasé.

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

Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées P et q ont pour expression (11)

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

Avec :

P : Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant.

q : Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant.

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

En considérant les équations (9) et (11), nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha-\beta)$ en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques. Ceci conduit à l'équation (12) suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{P} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant Actif}} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant Réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courants Harmoniques}}$$

Il est évident, d'après la relation (12), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelle et imaginaire doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux artifices de filtrage illustré sur la figure 1.15.

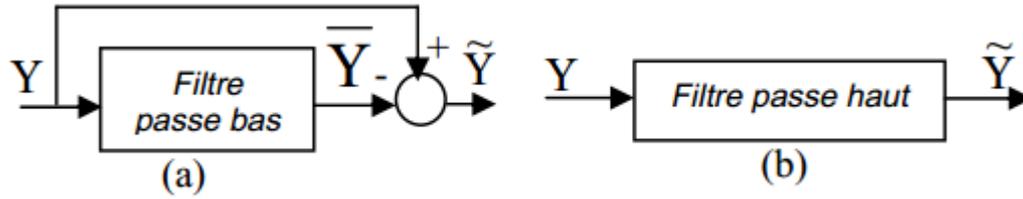


Figure 2.10: Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives P et q

Les courant harmoniques triphasés $i_{ck,h}$ ($k=1,2,3$) sont obtenues à partir des courants biphasés $i_{c\alpha h}$ et $i_{c\beta h}$ par la transformation inverse de Concordia soit (13) :

$$\begin{bmatrix} i_{c1,h} \\ i_{c2,h} \\ i_{c3,h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha,h} \\ i_{c\beta,h} \end{bmatrix}$$

Si V et I_1 représentent respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamental et Φ_1 , le déphasage entre eux, alors on peut écrire :

$$\begin{cases} \bar{P} = 3VI_{c1} \cos \Phi_1 \\ \bar{q} = -3VI_{c1} \sin \Phi_1 \end{cases}$$

Les termes P et q sont respectivement équivalents à la puissance active conventionnelle et à la puissance réactive conventionnelle. De cette manière, éliminer les courants harmoniques revient à compenser les composantes alternatives \tilde{P} et \tilde{q} . La suppression des courants réactifs revient à compenser la composante continue q .

Le schéma de la figure 1.16 illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire. La théorie P-Q présentée auparavant est valable uniquement pour les systèmes triphasés dépourvus de composante homopolaire. L'extraction des courants des harmoniques dans des applications monophasées ne peut pas être réalisée par cette méthode.

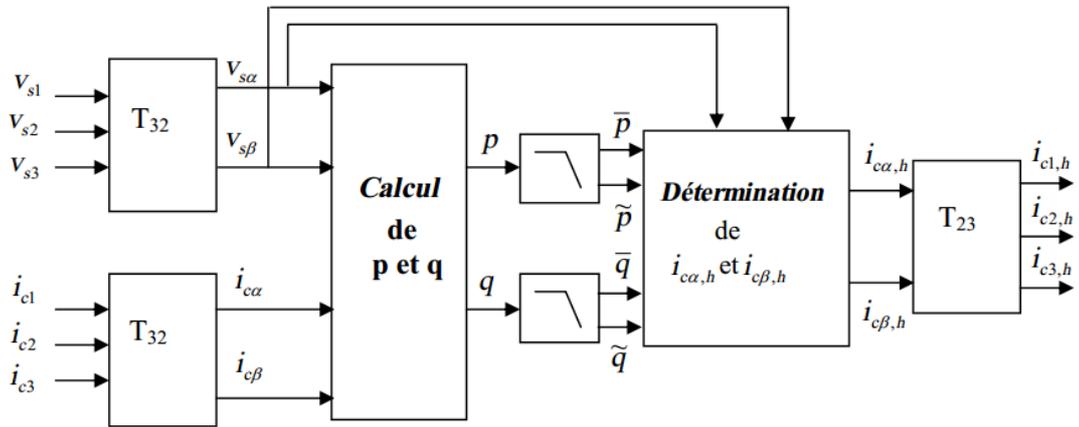


Figure 2.16 : Algorithme 'P-Q' d'extraction des courants harmoniques.

Chapitre III

CHAPTRE III: Simulation d'un filtre passif à l'aide de SIMULINK

Pour lancer la simulation sur Matlab tapez "power_active_filter" dans la fenetre Command Window

Cette commande va ouvrir l'ensemble des blocs suivant dans SIMULINK

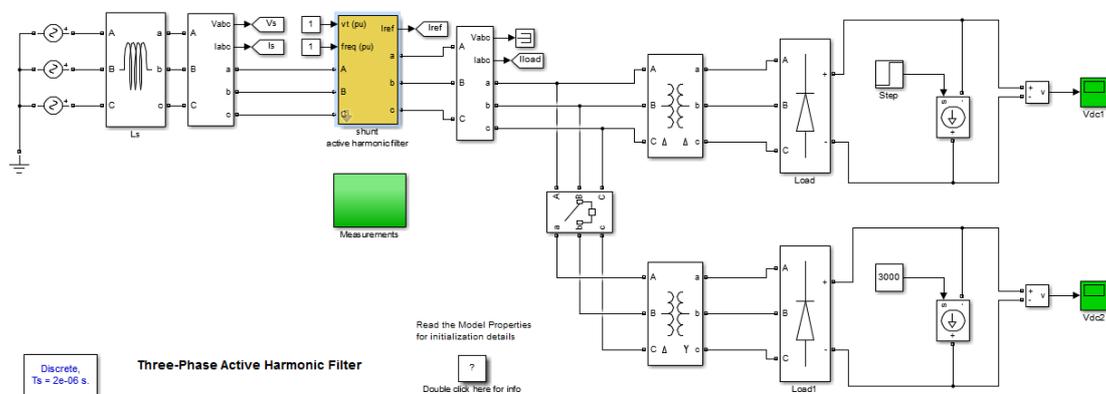


Figure 3.1: Blocs de "power_active_filter" dans SIMULINK

- En premier on a une source triphasée (120° entre deux phase) suivie par une charge inductive triphasée ($L=0.01\text{mH}$)

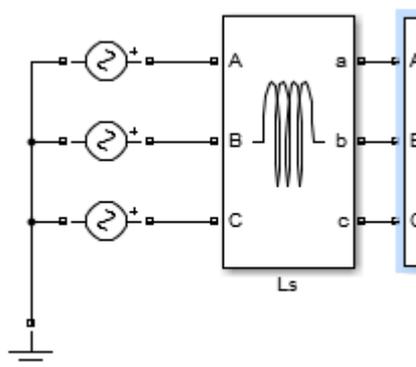


Figure 3.2: Bloc "source triphasée"

- Cette source est suivie par un bloc de mesure qui retourne deux vecteurs $V_s=(V_a,V_b,V_c)$ les tensions phase-ground, et $I_s=(I_a,I_b,I_c)$ les courants dans chaque ligne de phases

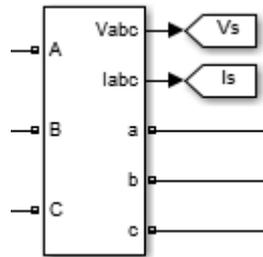


Figure 3.3: Bloc de mesure source

- Le bloc de mesure est suivi par un filtre actif parallèle, ce dernier a comme entrée les courants et les tensions des trois phases de source et de charge (I_s, V_s, I_L, V_L) et donne comme sortie une valeur de courant I_{ref} , en plus il fournit comme sortie des courants et des tensions de façon à compenser les harmoniques générée par la charge

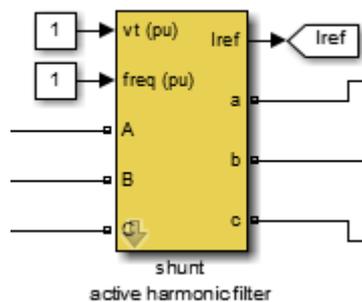


Figure 3.4: Bloc "active harmonic Filter"

Structure de filtre actif:

Ce filtre est constituée de deux partie

- **La partie puissance est constituée :**
 - D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance IGBT, commandables au blocage avec des diodes en antiparallèle.
 - D'un circuit de stockage d'énergie (C1,C2).
 - D'un filtre de sortie Laf.

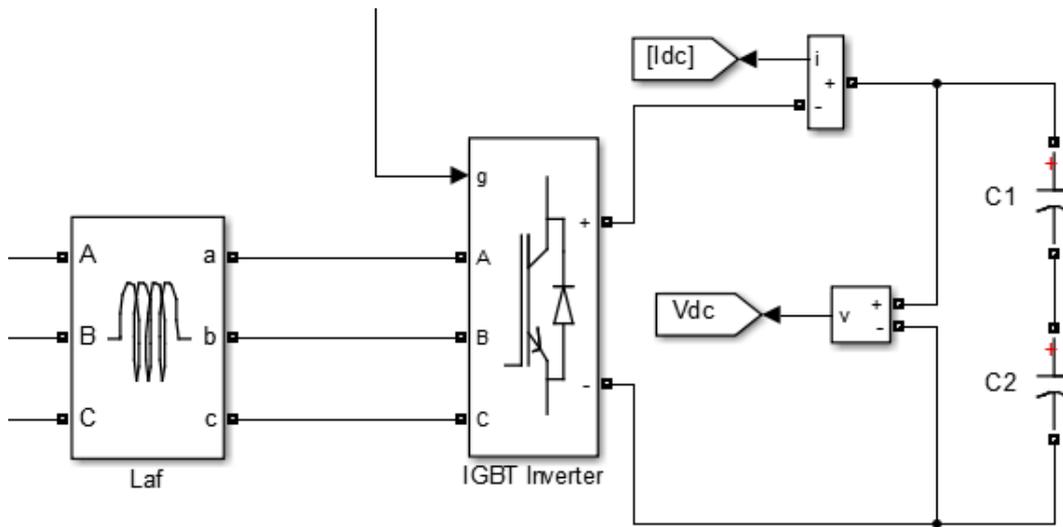


Figure 3.5 : Bloc de partie puissance de filtre

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

- La commande utilisée est la commande par hystérésis, cette commande non linéaire utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis (on peut toujours régler la largeur de cette bande on faisant double cliquer sur le bloc hysteresis).

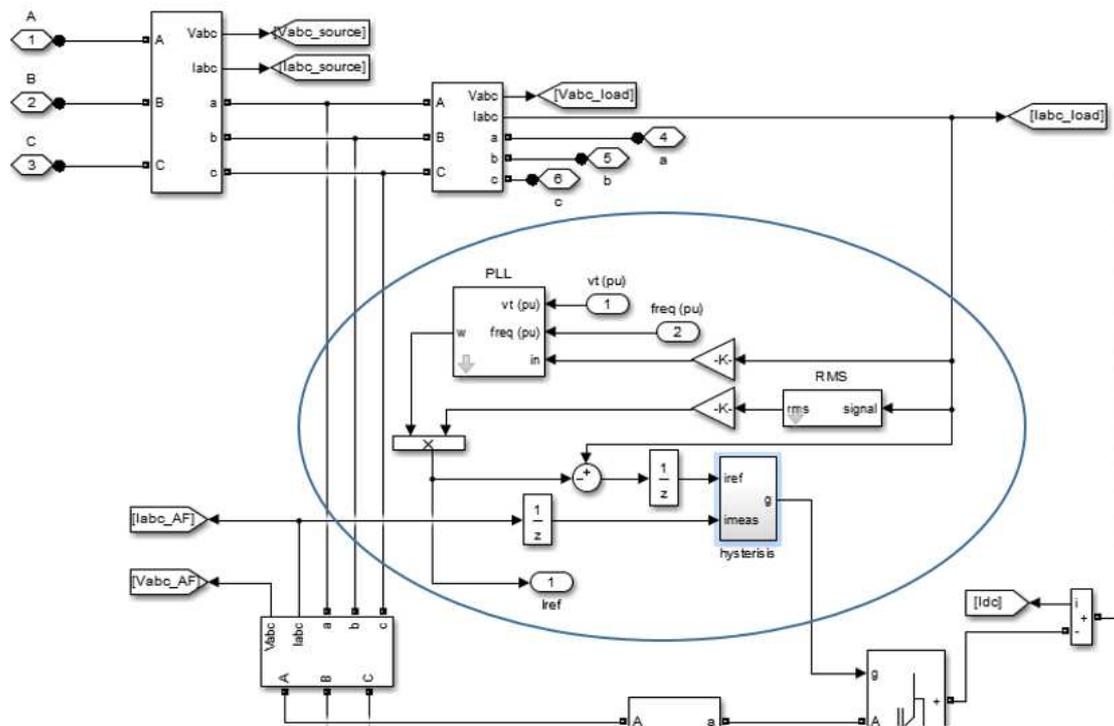


Figure 3.6: bloc de partie commande de l'onduleur

- il y a trois bloc de mesure pour les trois branches (sourcr, charge , filtre), on peut visualiser les courant et les tension pour chaque branche,

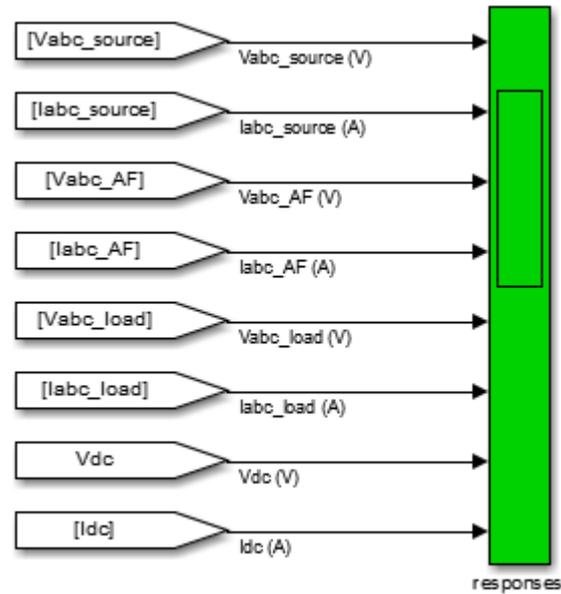


Figure 3.7 : Bloc visualisation des signaux

- La figure 3.8 donne les résultats de simulation de durée de 250 ms pour trois charges non linéaire :

Z1: de 0 à 5/60 s

Z2: de 5/60 à 10/60 s

Z3: de 10/60 à 15/60 s

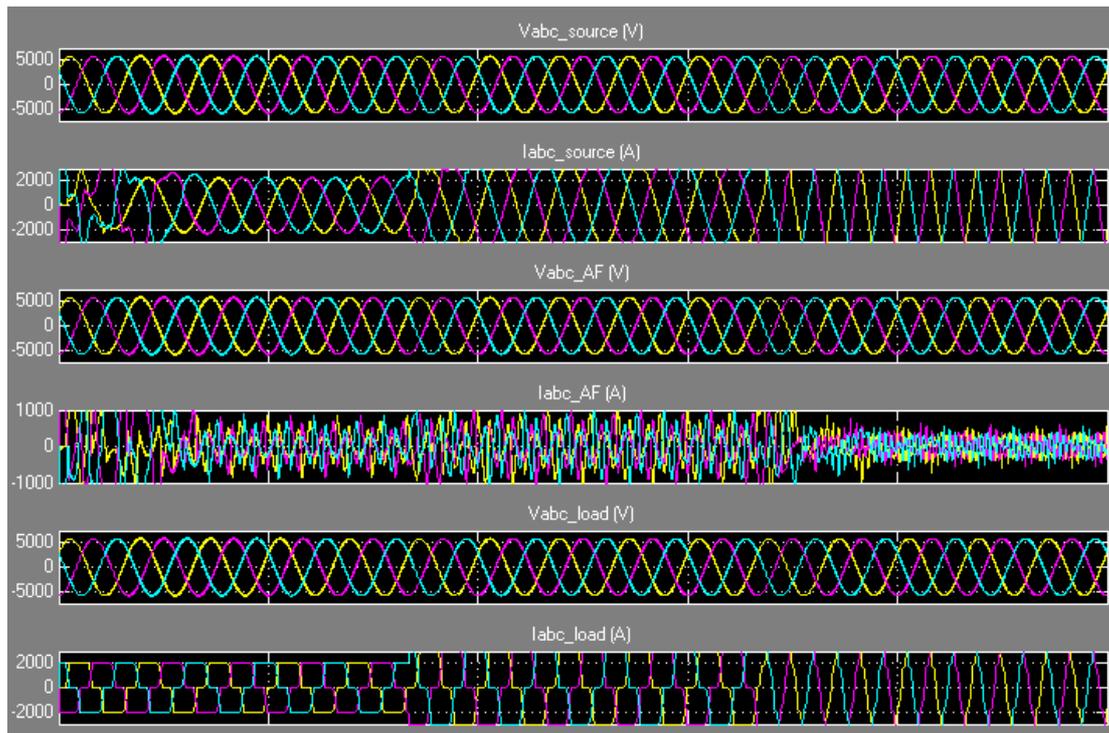


Figure 3.8: Les graphs des courants et des tensions dans les trois branches

- On voit que pour chaque intervalle le filtre génère un courant I_{abc_AF} pour compenser les harmoniques d'un courant I_{abc_load} afin que I_{abc_source} reste sinusoidale (peu déformée)
- Le bloc de filtre est suivie d'un bloc de mesure qui mesure le courant dans la branche charge.
- Le bloc charges contient de deux redresseurs alimenté par une source de courant, le deuxième redresseur est connecté au réseau a travers un disjoncteur,
- Le premier redresseur possède une alimentation de courant avec deux valeurs d'amplitude dans deux étapes:

Etape 1: 2000A de 0 à 5/60 s

Etape 2 : 3000A de 5/60 à 15/60 s

Le disjoncteur est fermé à partir de 10/60s

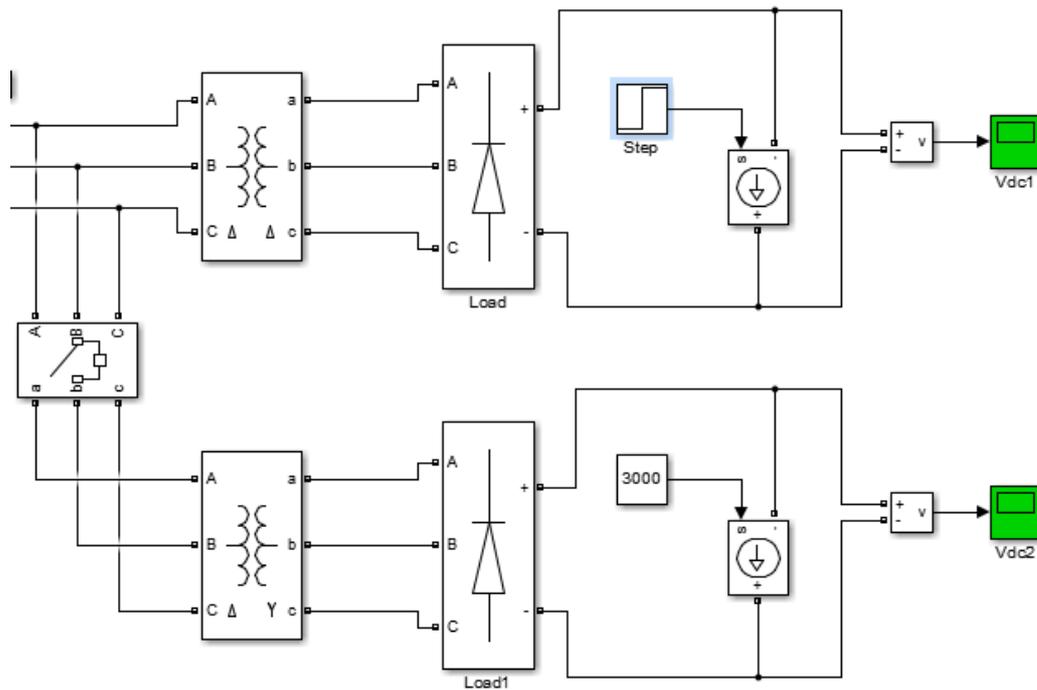


Figure 3.9: Bloc de charge non linéaire

On peut visualiser les tension au bornes des sorties des redresseurs Vdc1, Vdc2

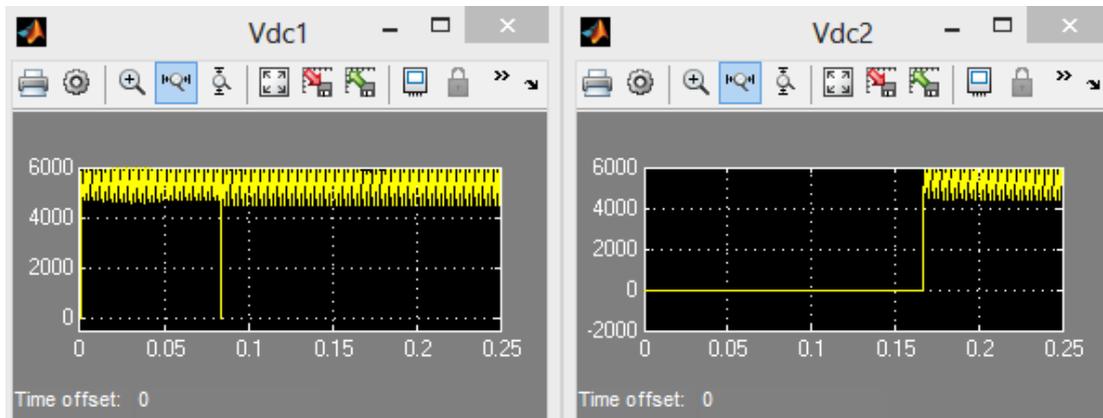


Figure 3.10: graph de Vdc1 et Vdc2

- Bloc measurements

Ce bloc permet de tracer les tensions et les courants de source, les courants de charge et l'erreur absolue entre Iref et Is

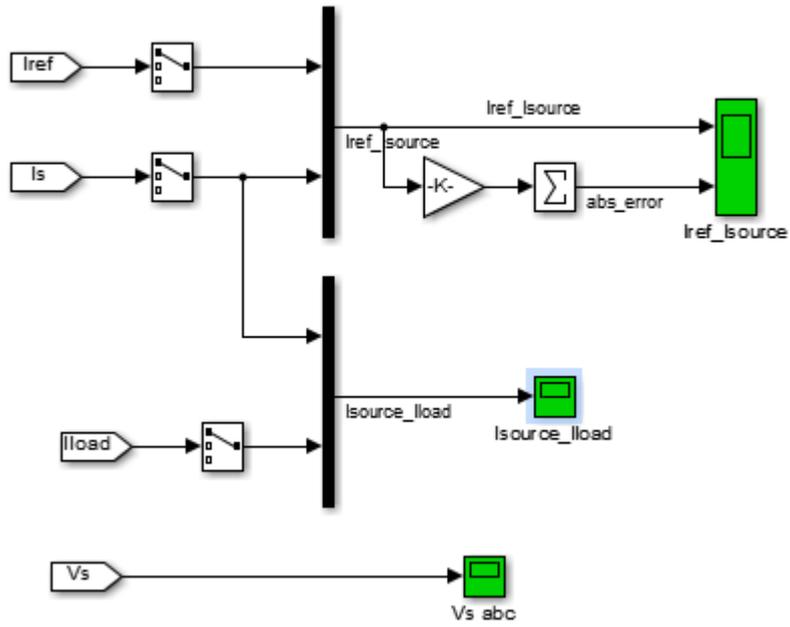


Figure 3.11: Bloc "measurement"

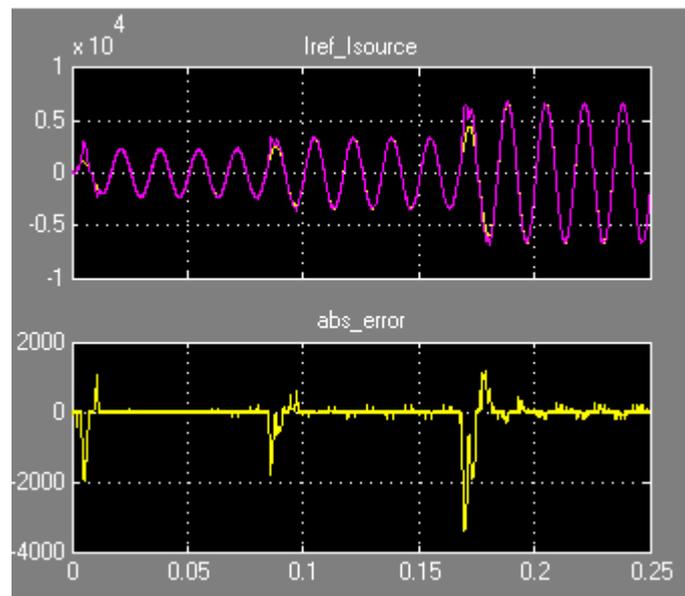


Figure 3.12: Graph de l'erreur absolue entre Iref et Isource

Le bouton à gauche permet d'ouvrir une interface contenant les outils d'analyse et les options de simulation

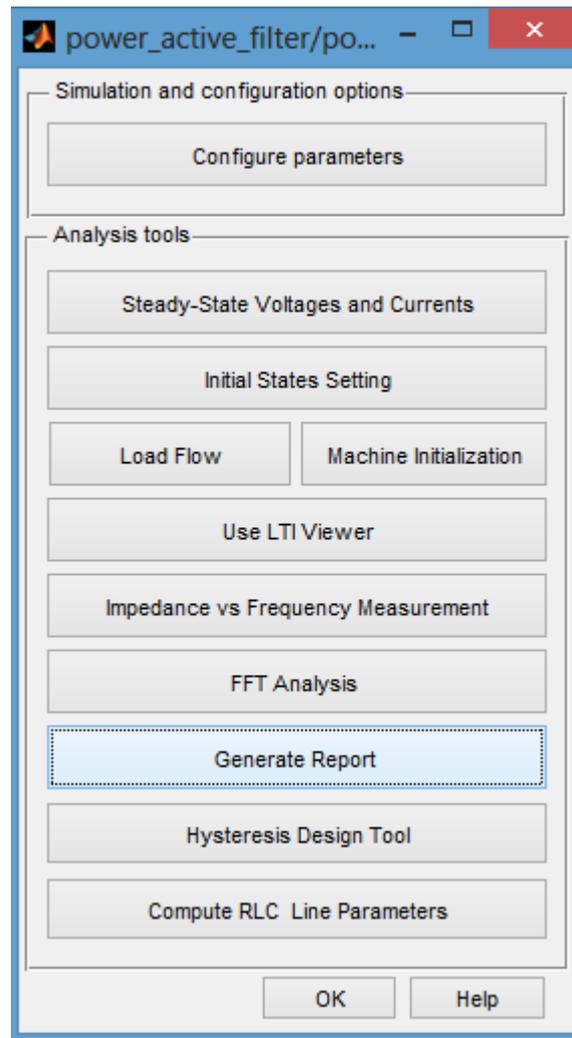


Figure3.13: Interface "power_active_filter/powergui"

Exemple : "FFT Analysis"

On va tracer le spectre de courant de source pour la charge non linéaire Z2 et calculer la THD

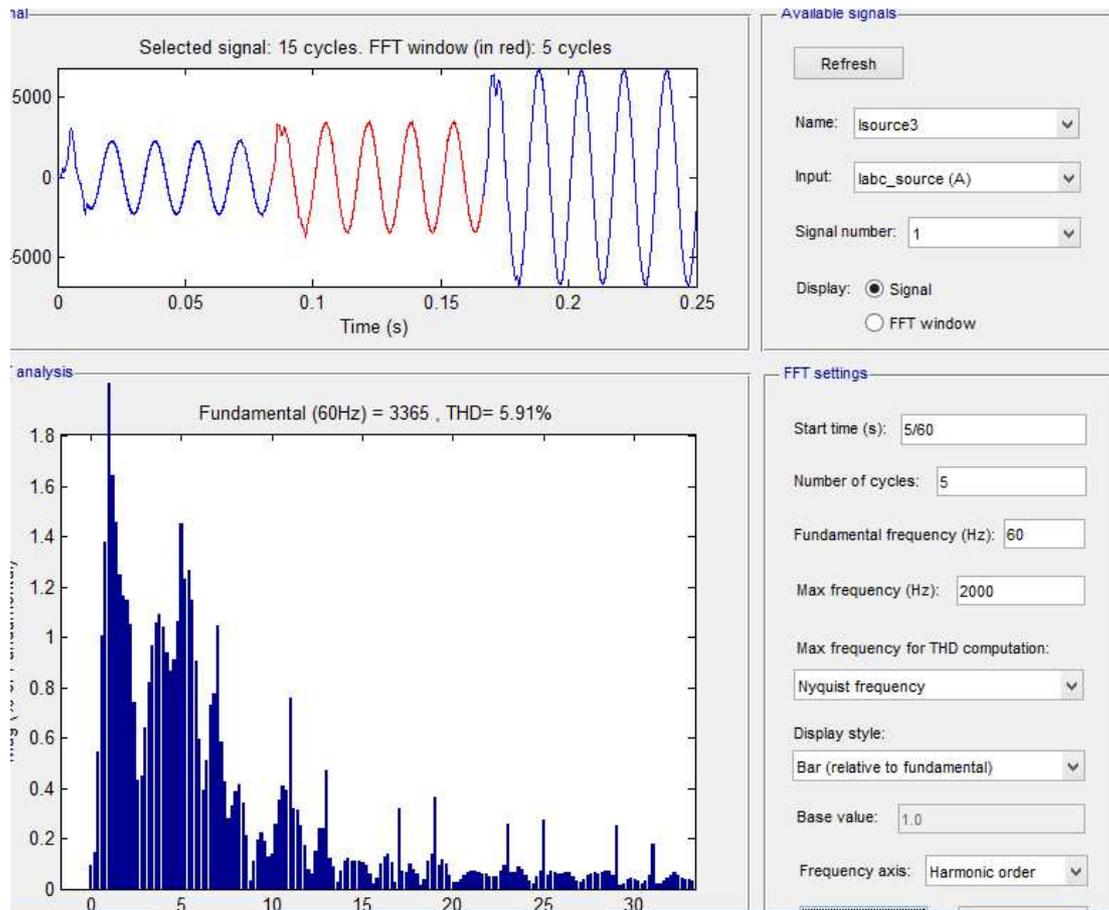


Figure 3.14: Fenêtre "Powergui FFT Analysis Tool"

THD=5.91%

Amplitude de fondamentale 3365

Le taux de distorsion est inferieur à 6% qui est un résultat acceptable

Conclusion

Dans ce mémoire on a vu le problème des harmoniques causées par des charges non linéaire, ensuite on a vu qu'il y a deux types de solutions de compensation des harmoniques: des solutions traditionnelles (ou classiques) telle que les filtres passifs et des solutions modernes. Les méthodes dites "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénient. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques). Ces inconvénients plus l'apparition de nouveau composant à commutation forcée, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif.

Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phase à l'aide d'un pont onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir.

Les résultats de simulation nous a montré l'efficacité de filtre actif parallèle. On peut diminuer le taux de distorsion jusqu'à moins de 6% qui est un résultat très acceptable

Bibliographie

- [1] L. ZELLOUMA, Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé, mémoire de magister 2006, Université Badji Mokhtar, Annaba
- [2] T.Gouroaud, "Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique", Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, 1997
- [3] S. RECHKA, Etude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution, mémoire présenté à l'université de Quebec à Trois Rivières
- [4] S. BEAULIEU, Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique, Université du Quebec a Chicoutmi 2007
- [5] F.BERREZZEK Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone, mémoire de magister, université Badji Mokhtar , Annaba 2006
- [6] A.GUELLAL Implémentation sur FPGA d'une commande MLI on-line basée sur le principe des réseaux de neurones, ENP 2009
- [7]S.TADJER, I.HABI, problème et identification des perturbations harmoniques dans un réseau basse, Laboratoire de la recherche sur l'électrification des entreprises industrielles, Faculté des Hydrocarbures et de la chimie-Université M'Hamed Bougara
- [8] H. DJEGHLOUD, filtrage de puissance, Thèse de doctorat, université Mentouri Constantine 2007
- [9] A. OMEIRI, Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant, thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba 2007

Table des matières

Introduction	1
I. L'origine des harmoniques et leurs effets sur le réseau	3
I.1 Définition	3
I.2 Décomposition d'un signal périodique	3
I.3 Notion des charges	5
I.4 Origines et sources des harmoniques	5
I.5 Différents types d'effets	5
I.6 Dépollution des réseaux électriques:	6
I.6.1 Solutions traditionnelles de dépollution	6
I.6.2 Solutions modernes de dépollution	6
II. Filtres actifs	9
II.1 Principe du filtre actif parallèle	9
II.2 Structure d'un filtre actif parallèle	10
II.2.1 Structure tension	11
II.2.2 Structure courant	12
II.3 Généralité sur les onduleurs	13
II-3.1 Notions sur les onduleurs [5]	13
II.3.2 Types d'onduleurs de tension [6]	13
II.4 La commande de l'onduleur	14
II.4.1 Commande par hystérésis	14
II.4.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	15
II.5 Identification des courants de référence	16
II.5.1 Méthodes de l'identification des courants harmoniques	16
II.5.2 Méthode des puissances instantanées	16
III. Simulation d'un filtre passif à l'aide de SIMULINK	23
Conclusion	32
Bibliographie	33

Liste des figures :

Figure 1.1: Décomposition d'un signal periodique

Figure 2.1: Schéma principe d'un filtre actif

Figure 2.2: Exemple de forme d'onde

Figure 2.3: Structure générale d'un filtre actif parallèle

Figure 2.4: Structure tension

Figure 2.5: Structure courant

Figure 2.6: Schéma de l'onduleur monophasé.

Figure 2.7: Schéma de principe d'un onduleur triphasé de tension.

Figure 2.8: Schéma de principe d'un onduleur commandé par hystérisé

Figure 2.9: Schéma synoptique de la loi de modulation triangulo-sinusoidale.

Figure 2.10: Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives P et q

Figure 2.11 : Algorithme 'P-Q' d'extraction des courants harmoniques.

Figure 3.1: Blocs de "power_active_filter" dans SIMULINK

Figure 3.2: Bloc "source triphasée"

Figure 3.3: Bloc de mesure source

Figure 3.4: Bloc "active harmonic Filter"

Figure 3.5 : Bloc de partie puissance de filtre

Figure 3.6: Bloc de partie commande de l'onduleur

Figure 3.7 : Bloc visualisation des signaux

Figure 3.8: Les graphs des courants et des tensions dans les trois branches

Figure 3.9: Bloc de charge non linéaire

Figure 3.10: Graph de Vdc1 et Vdc2

Figure 3.11: Bloc "measurement"

Figure 3.12: Graph de l'erreur absolue entre Iref et Isource

Figure3.13: Interface "power_active_filter/powergui"

Figure 3.14: Fenêtre "Powergui FFT Analysis Tool"