

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

# Mémoire de Master

Présenté au

Département: Génie Électrique

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Electrotechnique Industrielle

Réalisé par

HAFSI LAMOURI

Et

BADIS NACER

## Thème

### Commande par backstepping de convertisseur DC/AC

Soutenu le : 10/07/2024

Devant le Jury composé de:

Mme: N.Kirech

M.C.B

Univ. Bouira

Président

Mr: K.Saoudi

Prof

Univ. Bouira

Encadreur

Mr: S.Ladjouzi

M.C.B

Univ. Bouira

Examineur

Année Universitaire: 2023-2024



*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université de Bouira, Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées*  
*Département de Génie électrique*



Bouira le : 06/07/2024

## **Autorisation de soutenance d'un mémoire de Master**

Je soussigné(e), l'enseignant (e) : Kamel SAOUDI

Encadreur des étudiants (es) :

1- HAFSI Lamouri

2- BADIS Nacer

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Les autorise à soutenir leur **mémoire** de Master.

Signature du rapporteur

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à ma très  
chère mère, mon cher père, mon cher  
frère et ma sœur, toute ma famille Hafsi,*

*Je dédie également ce travail à mon collègue  
Badis, tous mes amis, et toute la promotion  
.d'Électrotechnique 2024*

**HAFSI LAMOURI**

## *Dédicaces*

*Je dédie humblement ce travail à mes parents, dont le soutien et les encouragements inestimables ont été constants tout au long de ma vie. Je tiens également à adresser mes remerciements à mes frères, ainsi qu'à toute ma famille, proche et élargie. Je dédie également ce travail à mon collègue Lamouri, qui a partagé ce parcours avec moi, ainsi qu'à tous mes amis sans exception.*

**BADIS NACER**

## **Remerciement**

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre gratitude à Dieu le Tout-Puissant pour nous avoir donné le courage nécessaire à la réalisation de ce travail.

Ce travail a été réalisé au sein du Département des Sciences et Sciences Appliquées de l'Université de Bouira. Nous exprimons notre gratitude particulière au professeur SAOUDI Kamel pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de diriger ce mémoire. Nous remercions également tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner et de juger notre travail. Enfin, nous remercions à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

## Résumé

Ce mémoire présente divers types de convertisseurs DC-AC et se concentre sur le développement d'une commande par backstepping pour ces convertisseurs. Dans un premier temps, nous avons réalisé la modélisation d'un filtre actif de puissance en utilisant la technique de contrôle du courant indirect. Ensuite, cette méthode de commande a été appliquée aux convertisseurs DC/AC. Les simulations ont été réalisées à l'aide de logiciel Matlab/Simulink, et les résultats obtenus ont été présentés et analysés.

### Mots clés :

Convertisseurs DC-AC- backstepping-Filtre actif de puissance.

### Abstract

This memory presents various types of DC-AC converters and focuses on the development of a backstepping command for these converters. Initially, we realized the modeling of an active power filter using indirect current control technique. This control method was then applied to DC/AC converters. The simulations were carried out using the Matlab/Simulink software, and the results were presented and analyzed.

### Key words:

DC-AC converters- backstepping- active power filter.

### الملخص

يقدم هذا البحث مجموعة متنوعة من أنواع محولات التيار المستمر-التيار المتناوب وتتطلع إلى تطوير التحكم من خلال خطوة إلى الوراء لهذه المحولات. في البداية، لقد حققت نموذجًا لتكوين مرشح الطاقة النشط باستخدام تقنية التحكم بالطاقة غير المباشرة. بعد ذلك، تم تطبيق هذه الطريقة التحكم على محولات التيار المستمر-التيار المتناوب. ثم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج ماطلاب/سيمولينك، وتم عرض النتائج وتحليلها.

**الكلمات المفتاحية:** محولات التيار المستمر- التيار المتناوب- خطوة إلى الوراء - مرشح الطاقة النشط

## Table des matières

Remerciements .....	I
Résumé .....	II
Sommaire .....	III
Liste des figures .....	VI
Liste des tableaux .....	VII
Liste des acronymes .....	VIII
Introduction Générale .....	1
<b>Chapitre I: L'onduleur et le filtrage d'harmonique</b>	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition d'un onduleur « convertisseur DC-AC».....	4
I.3 Les différents types d'onduleur .....	4
I.3.1 Onduleur autonome .....	4
I.3.1.1 Onduleur de courant .....	5
I.3.1.2 Onduleur de tension .....	5
I.3.2 Onduleurs non autonome .....	5
I.3.3 L'onduleur hybride .....	6
I.3.4 Onduleur à résonance .....	6
I.4 Application des onduleurs .....	6
I.5 Types des onduleurs .....	7
I.5.1 Onduleur monophasé.....	7
I.5.1.1 L'Onduleur monophasé en demi-pont .....	7
I.5.1.2 L'Onduleur monophasé en pont .....	8
I.5.2 Onduleur triphasé .....	9
I.6 Avantages et Inconvénients de l'onduleur.....	9
I.6.1 Avantage des onduleurs.....	9
I.6.2 Inconvénients des onduleurs.....	10
I.7 Définition des harmoniques.....	11
I.8 Origine des harmoniques.....	11
I.9 Filtrage d'harmonique.....	12

# Sommaire

I.9.1 Filtre passif.....	12
I.9.1.1 Filtre à inductance anti-harmonique.....	13
I.9.1.2 Filtre passif résonant.....	13
I.9.1.3 Filtre passif amorti .....	14
I.9.2 Filtre Actif.....	14
I.9.2.1 Filtre actif série.....	14
I.9.2.2 Filtre actif parallèle .....	15
I.9.2.3 La combinaison parallèle-série actifs.....	16
I.11 Principe d'un filtre actif de puissance.....	16
I.10 Conclusion.....	20

## Chapitre II: \_Commande par backstepping d'un convertisseur DC/AC

II.1 Introduction .....	22
II.2 Les systèmes non linéaires.....	22
II.3 Stabilité des systèmes non linéaires .....	22
II.4 Méthodes de Lyapunov .....	23
II.4.1 La première méthode.....	23
II.4.2 La deuxième méthode .....	24
II.5 Stabilité au sens de Lyapunov .....	24
II.6 La nécessité d'un système de commande non linéaire.....	24
II.7 Définition backstepping.....	25
II.8 Historique de la commande par la méthode backstepping .....	25
II.9 Principe du backstepping .....	25
II.10 Principe de la commande par la méthode backstepping .....	26
II.11 Principe du réglage de backstepping.....	26
II.12 Les principaux avantages et inconvénients poses par la commande Backstepping.....	27
II.12.1 Avantages.....	27
II.12.2 Inconvénients.....	27
II.13 Conception d'une commande de backstepping.....	28
II.14 Conclusion.....	30

## Chapitre III: Résultats de simulations et discussions

III.1 Introduction.....	32
III.2 Description de système .....	32
III.3 Composants et Paramètres de simulation .....	33
III.4 Analyse de Simulation .....	33
III.5 Interprétation des résultats.....	43
III.6 Conclusion .....	44

Conclusion générale.....	46
--------------------------	----

Bibliographie.....	48
--------------------	----



## Liste des figures

Figure I. 1: Onduleur monophasé en demi-point. ....	7
Figure I. 2: Onduleur monophasé en pont .....	8
Figure I. 3: Onduleur triphasé .....	9
Figure I. 4: branchement de filtre passif .....	12
Figure I. 5: branchement d'inductance anti-harmonique.....	13
Figure I. 6: Installations de filtres résonants.....	14
Figure I. 7: Filtre Actif Série.....	15
Figure I. 8: Filtre Actif parallèle.....	15
Figure I. 9: Combinaison parallèle-série de filtres actifs.....	16
Figure I. 10: Bloc d'un filtre actif de puissance.....	17
Figure II. 1: Commande par backstepping.....	29
Figure III. 1: Simulation de filtre actif de puissance.....	31
Figure III. 2: Tension de réseau.....	33
Figure III. 3: THD de tension de réseau .....	33
Figure III. 4: Tension de référence .....	34
Figure III. 5: THD de tension de référence.....	35
Figure III. 6: Signal de synchronisation.....	35
Figure III. 7: THD de Signal de synchronisation.....	36
Figure III. 8: Tension Vdc.....	36
Figure III. 9: Courants de charge .....	37
Figure III. 10: THD de courant de charge.....	38
Figure III. 11: Courants de charge avec harmonique .....	38
Figure III. 12: THD de courants de charges sans filtre.....	39
Figure III. 13: Courants de charge sans harmonique.....	39
Figure III. 14: THD de courants de charge avec filtre.....	40
Figure III. 15: Courants de deux charges avec harmonique.....	40
Figure III. 16: THD de courants de deux charges sans filtre.....	41
Figure III. 17: Courants de deux charges Sans harmonique.....	41
Figure III. 18: THD de courants de deux charges avec filtre.....	42
Figure III. 19: courants de réseau.....	42
Figure III. 20: THD de courants de réseau.....	43

## Liste des Acronymes

AC/AC	Convertisseur alternatif/ alternatif
AC-DC	Convertisseur alternatif/continu
APF	Active power filter
DC-AC	Convertisseur continu/ alternatif
DC/DC	Convertisseur continu/ continu
FAP	Filtre actif de puissance
IGBT	Insolated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	Metal-oxide-semiconductor field-effect
SAPF	Shunt Active power filter
THD	Total harmonique distortion
UPQC	Unified Power Quality Conditioner

## Liste des Symboles

Fonction de commutation  $C_K$

$C(F)$	Capacité
$I(A)$	Courant
K1	Constant
$L_C(H)$	L'inductance de respectivement l'APF
$R_C(\Omega)$	Résistance de respectivement l'APF
$R_L(\Omega)$	Résistance dans la charge non linéaire
$L_L(H)$	Inductance dans la charge non linéaire
$S_k$	Interrupteur ou un commutateur.
$U(V)$	Tension
$V(x)$	Fonction de Lyapunov
$V'(x)$	Dérivée de la fonction de Lyapunov
$V_{dc}(V)$	Tension continue

---

## Liste des Acronymes et Symboles

---

$V_{MN}(V)$	La tension entre les points M et N.
$V_s (V)$	Tension du réseau
$d_{nk}$	La fonction d'état de commutation
$e$	L'écart entre la variable à réguler et sa référence.
$\dot{e}$	Dérivée de l'écart
$i_{dc}$	Le courant de C.
$i_L (A)$	Courant de charge
$i_s(A)$	Courant de puissance

**Introduction**

**Générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

L'électronique de puissance est un domaine essentiel dans le secteur de l'électricité, touchant diverses activités telles que le réseau électrique, le transport (urbain, ferroviaire, maritime...), l'énergie renouvelable et l'industrie. A l'époque actuelle, l'énergie est devenue un élément essentiel dans la vie quotidienne des individus.

L'amélioration des performances des dispositifs de l'électronique de puissance est devenue indispensable, car elle peut contribuer à l'amélioration du signal électrique. Les convertisseurs sont des appareils qui utilisent des composants semi-conducteurs ainsi que des éléments passifs tels que les résistances, les condensateurs et les inductances. La combinaison de ces éléments permet de transformer la forme de signal électrique, qu'il s'agisse de tension ou de courant, en une autre forme, une conversion qui est actuellement utilisée dans les activités industrielles.

Il existe quatre catégories de convertisseur, à savoir :

DC/DC : hacheur qui permet de convertir le signal continue en continue

DC/AC : onduleur qui permet de convertir le signal continue en alternative.

AC/DC : redresseur qui permet de convertir le signal alternatif en continue

AC/AC: gradateur qui permet de convertir le signal continue en continue [1].

Dans le domaine de l'électronique de puissance, les onduleurs sont essentiels pour convertir la tension continue (DC) en tension alternative (AC). L'efficacité et la performance des onduleurs dépendent largement des stratégies de commande utilisées. Parmi les techniques avancées, la méthode du backstepping s'est imposée comme une solution robuste et efficace pour gérer les dynamiques non linéaires et complexes des onduleurs.

Le backstepping est une méthode de commande non linéaire qui décompose le système en sous-systèmes plus simples, permettant une stabilisation progressive du système global. Cette approche facilite la conception de lois de commande stabilisantes tout en optimisant les performances. Dans le contexte des onduleurs, le backstepping est particulièrement avantageux car il gère efficacement les perturbations et les incertitudes, assurant ainsi une qualité de sortie élevée et une réponse rapide aux variations de charge.

## Introduction générale

---

La mise en œuvre du backstepping dans les onduleurs nécessite une compréhension approfondie des dynamiques du système et des techniques de modélisation avancées. L'objectif est de développer un contrôleur capable de stabiliser le système en temps réel et d'améliorer les performances globales. Les recherches récentes montrent que le backstepping surmonte plusieurs limitations des méthodes de commande traditionnelles, en améliorant la robustesse et la précision du contrôle des onduleurs [2].

Notre mémoire est organisé en trois chapitres principaux, chacun traitant de sujets spécifiques :

Dans le premier chapitre, nous nous parlons sur une présentation générale, les principes fondamentaux de fonctionnement des onduleurs, leur modélisation, ainsi que les différentes méthodes de filtrage des harmoniques.

Le deuxième chapitre consiste à étudier la commande par backstepping des convertisseurs (DC/AC).

Le dernier chapitre se concentre sur la présentation des résultats de simulation obtenus en utilisant la technique de commande par backstepping.

**Chapitre I:  
L'onduleur et le  
filtrage  
d'harmoniques**

## I. Introduction

En général, on transporte et distribue l'énergie électrique en utilisant des tensions alternatives sinusoïdales. L'électronique de puissance offre la possibilité de changer la nature de l'énergie électrique afin de l'ajuster aux diverses exigences [3].

En raison des avancées technologiques dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques tels que les onduleurs connaissent une expansion progressive de leur domaine d'utilisation. Le filtrage actif, les systèmes d'énergies renouvelables et l'entraînement des moteurs électriques sont les applications les plus courantes des onduleurs dans la vie quotidienne et dans les industries.

L'objectif de la conversion continue-alternative est de convertir un signal de tension continu en un signal de tension alternatif avec les amplitudes et les fréquences souhaitées. Le processus de conversion se déroule dans un convertisseur connu sous le nom d'onduleur[4].

### I.2 Définition d'un onduleur « convertisseur DC-AC»

Un onduleur est un appareil électronique qui convertit de manière régulière un courant continu en courant alternatif. En utilisant une alimentation continue, il reconfigure périodiquement les connexions entre son entrée et sa sortie pour générer une tension et un courant alternatif, voire même un système polyphasé [5].

### I.3 Les différents types d'onduleur

Les divers types d'onduleurs peuvent être regroupés en deux principales catégories :

#### I.3.1 Onduleur autonome

Un onduleur est qualifié d'autonome lorsqu'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire qui lui est propre pour commuter les thyristors ou autres semi-conducteurs, permettant ainsi de commander la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie. On distingue deux types d'onduleurs autonomes [6] [7] :

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



## I.3.1.1 Onduleur de courant

Un onduleur de courant représente un type spécifique d'onduleur DC-AC qui transforme le courant continu d'entrée en courant alternatif à une fréquence prédéterminée. La fréquence du courant alternatif produit dépend des dispositifs de commutation utilisés, tels que les thyristors, les transistors, etc. Aussi connu sous le nom d'onduleur alimenté en courant, ce type d'onduleur maintient un courant d'entrée constant. Les onduleurs à source de courant sont particulièrement adaptés à diverses applications, telles que les systèmes de commande de vitesse pour les moteurs à courant alternatif, le démarrage de moteurs synchrones et les générateurs de plasma. Un onduleur à source de courant est composé d'une source de courant continu (pouvant être une batterie connectée à une inductance ou à d'autres dispositifs de commutation comme des thyristors, des IGBT, des MOSFET, etc.), des filtres et une charge AC. Il est disponible en configurations monophasée et triphasée[8].

## I.3.1.2 Onduleur de tension

Un onduleur de tension est un dispositif conçu pour transformer une source d'énergie en tension continue (U) en une sortie de tension alternative (AC). Cette transformation est réalisée grâce à un circuit électronique capable de stabiliser la tension de sortie malgré les fluctuations de courant (i) induites par la charge connectée à l'onduleur. La source d'alimentation continue fournit la tension à l'entrée de l'onduleur, qui est ensuite convertie en une tension alternative régulée à la sortie [9].

## I.3.2 Onduleurs non autonome

Les onduleurs non autonomes sont ceux qui dépendent du réseau alternatif pour fournir l'énergie nécessaire à la commutation des thyristors, ce qui en fait un réseau actif. Cette situation est observée notamment dans le fonctionnement en mode onduleur des redresseurs, où la fréquence et la forme d'onde de la tension sont dictées par le réseau alternatif [10].

### I.3.3 L'onduleur hybride

L'onduleur hybride est spécialement conçu pour les systèmes d'alimentation hybrides, combinant l'énergie solaire avec celle d'un générateur diesel et d'autres sources d'énergie renouvelable telles que les éoliennes. Il peut être utilisé soit en tant qu'onduleur autonome, soit en tant qu'onduleur couplé au réseau. Connecté à une banque de batteries, aux lignes du réseau public, au générateur diesel et aux appareils électroménagers, il est idéal pour l'électrification des zones reculées telles que les villages ou les îles, en leur fournissant une alimentation électrique fiable et continue [11].

### I.3.4 Onduleur à résonance

Les onduleurs à résonance sont des dispositifs convertisseurs de tension ou de courant à un seul créneau par alternance, fonctionnant dans des conditions spécifiques. Pour leur bon fonctionnement, la charge doit être un circuit oscillant avec peu d'amortissement. Les interrupteurs sont contrôlés par une fréquence proche de celle de résonance de la charge. Si cette dernière varie, la fréquence de commande doit être ajustée en conséquence. Dans ce cas, l'onduleur est piloté par la charge et n'est plus autonome [12].

## I.4 Application des onduleurs

Dans une centrale solaire, ils sont utilisés pour transformer le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif.

Dans les systèmes d'alimentation électrique sans interruption, l'onduleur transforme la tension fournie par la batterie en courant alternatif.

Lorsque l'énergie électrique est transportée, l'onduleur transforme l'énergie en courant continu qui est ensuite transféré dans certaines lignes électriques afin d'alimenter le réseau de courant alternatif.

La mise en place d'une alimentation à découpage, destinée à la transformation en courant continu, présente de nombreux avantages en termes d'efficacité, de taille et de poids.

Dans le domaine de l'aviation, ils servent à fournir à l'avionique des avions un courant alternatif extrêmement stable, même lorsqu'il est alimenté par des batteries (en cas de panne de courant). Ils permettent également de modifier la vitesse des moteurs électriques [13].

## I.5 Types des onduleurs

Les onduleurs peuvent être catégorisés en deux groupes principaux en fonction du nombre de phases de courant alternatif qu'ils produisent : les onduleurs monophasés et les onduleurs triphasés.

### I.5.1 Onduleur monophasé

Les onduleurs monophasés peuvent être classés en deux types : l'onduleur à pont complet et l'onduleur à demi-pont.

#### I.5.1.1 L'onduleur monophasé en demi-pont

La configuration la plus simple est illustrée dans la Figure 1.1. On utilise une seule cellule de commutation avec deux interrupteurs complémentaires.

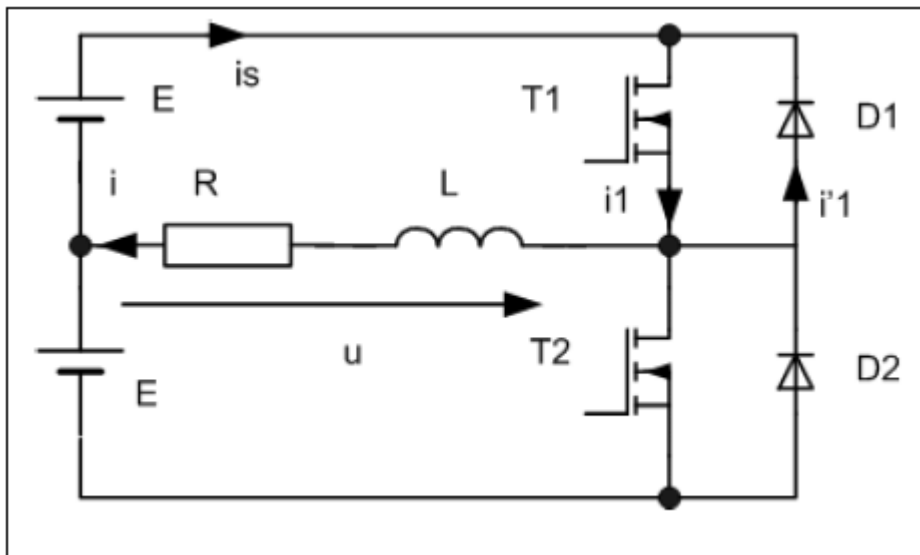


Figure I. 1: Onduleur monophasé en demi-pont.

On place des diodes en parallèle avec les transistors. Leur rôle est d'assurer la continuité du courant. En effet, une charge inductive ne tolère pas une interruption brusque du courant. Ainsi, après le blocage du transistor T1, le courant  $i$  continue à circuler à travers la diode  $D2$ , qui conduit spontanément.

Lorsque le transistor T1 est en conduction, la charge perçoit une tension  $U = E$ . Le courant  $i$  croît exponentiellement selon une constante de temps.

Lorsque le transistor T1 est bloqué, la diode  $D2$  prend le relais pour assurer la continuité du courant. La charge voit alors une tension  $U = E$ . Le courant  $i$  diminue.

## Chapitre I: l'onduleur et le filtrage d'harmonique

Lorsque le courant passe par zéro, un signal de commande est envoyé à la base du transistor T2. La diode D2 se bloque et le courant  $i$  continue à croître dans le sens opposé.

Lorsque le transistor T2 est bloqué, la diode D1 prend le relais et la charge voit à nouveau une tension  $V_{ch} = E/2$ . Lorsque le courant passe par zéro, le transistor T1 est remis en conduction et le cycle recommence [1].

### I.5.1.2 L'onduleur monophasé en pont

L'onduleur monophasé en pont est constitué de quatre transistors qui peuvent être substitués par des thyristors agissant comme des interrupteurs électroniques, accompagnés de quatre diodes montées en parallèle inversée aux bornes des transistors. Les circuits d'amorçage ou de blocage des transistors ne sont pas inclus. Ce schéma présente l'avantage d'utiliser une seule source de tension, notée E.

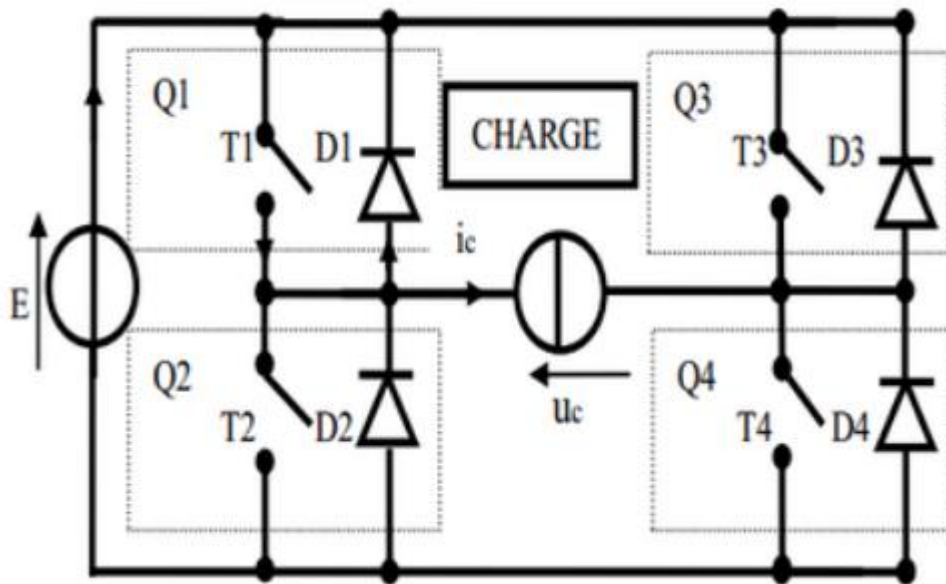


Figure I. 2: Onduleur monophasé en pont.

Lors d'une commande symétrique, les transistors T1 et T4 sont activés simultanément, tout comme T2 et T3. Cela génère une tension de sortie rectangulaire avec une valeur efficace de E.

Lorsque T1 et T4 conduisent, la tension aux bornes de la charge est de E et le courant augmente exponentiellement (Charge RL). En les désactivant (Circuit de commutation forcée), les diodes D2 et D3 assurent la continuité du courant, faisant chuter la tension de la

## Chapitre I: l'onduleur et le filtrage d'harmonique

charge à  $-E$ . Lorsque le courant atteint 0, T2 et T3 sont activés, inversant le sens du courant dans la charge. Le blocage de ces transistors active les diodes  $D1$  et  $D4$ , ramenant la tension de la charge à  $E$ . Lorsque le courant traverse à nouveau 0, T1 et T4 sont réactivés [1] [14].

### I.5.2 Onduleur triphasé

Pour créer un onduleur de tension triphasé, il suffit de rassembler en parallèle trois onduleurs monophasés et de contrôler les interrupteurs de manière à générer trois phases déphasées de  $120^\circ$  à la sortie. Ce regroupement forme un onduleur triphasé à six interrupteurs, avec deux interrupteurs pour chaque bras, comme illustré dans la figure I.3. Afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension et de maintenir les circuits de courant  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  continuellement fermés, les interrupteurs d'un même bras ne doivent jamais commuter simultanément, ce qui nécessite des signaux de commande complémentaires.

Ces interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant pour pouvoir maintenir les tensions de sortie quel que soit le courant de charge. Ils sont constitués d'une diode montée en opposition à un semi-conducteur contrôlé en ouverture et en fermeture [15] [16].

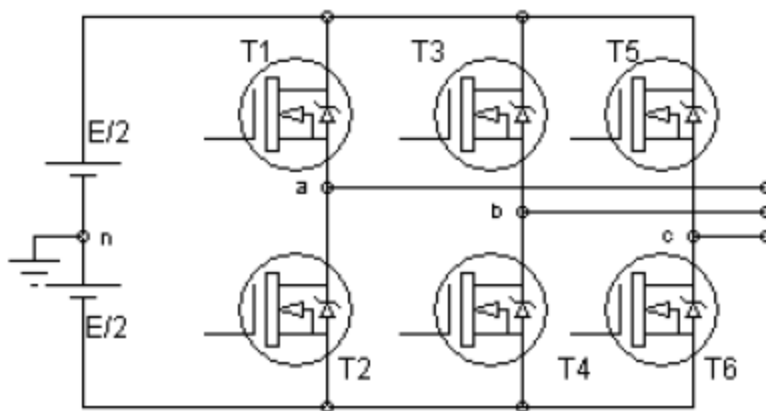


Figure I. 3: Onduleur triphasé

## I.6 Avantages et Inconvénients de l'onduleur

### I.6.1 Avantage des onduleurs

Prévention des Interruptions : Les onduleurs garantissent une alimentation ininterrompue en cas de coupure de courant, assurant ainsi le fonctionnement continu des appareils sans aucune perturbation.

## Chapitre I: l'onduleur et le filtrage d'harmonique

---

Prévention de la Perte de Données : En facilitant la fermeture sécurisée des systèmes informatiques, les onduleurs préviennent la perte de données non sauvegardées causée par des arrêts imprévus

Régulation des Fluctuations de Tension : Les onduleurs offrent une protection contre les surtensions et les sous-tensions, évitant ainsi les dommages potentiels à long terme aux appareils.

Absorption des Pics de Tension : Équipés de dispositifs de protection contre les surtensions, les onduleurs préservent les appareils des dommages immédiats causés par les pics électriques, comme la foudre.

Amélioration de la Qualité de l'Alimentation : En filtrant le bruit électrique, les onduleurs garantissent une alimentation plus propre, favorisant ainsi la performance et la durabilité des appareils électroniques.

Réduction des Coûts de Réparation : La prévention des dommages matériels par les onduleurs permet de réduire les frais de réparation ou de remplacement des équipements.

Sécurité Accrue : La protection des équipements et des données en cas de problème électrique offre une tranquillité d'esprit précieuse, surtout dans les environnements critiques où la continuité des opérations est essentielle [17].

### **I.6.2 Inconvénients des onduleurs**

Un des principaux inconvénients des onduleurs est leur potentiel à perturber le fonctionnement des appareils qu'ils alimentent. En effet, l'énergie délivrée par l'onduleur peut ne pas correspondre aux spécifications requises par l'appareil en termes de tension ou d'intensité. Dans de tels cas, l'appareil risque d'être endommagé ou altéré. De plus, la plupart des onduleurs ne disposent pas d'un écran affichant le niveau de charge ou la quantité d'énergie restante. Sans un système spécifique, comme un signal sonore qui augmente à mesure que l'onduleur se décharge, l'utilisateur peut être pris au dépourvu en cas de panne de courant, rendant l'onduleur inutile. En ce qui concerne les onduleurs solaires photovoltaïques, leur fonctionnement est limité aux heures ensoleillées où le surplus d'énergie est stocké dans une batterie pour une utilisation ultérieure, notamment pendant la nuit ou par temps nuageux. Cependant, ces onduleurs sont sensibles aux conditions météorologiques et peuvent cesser de fonctionner s'il n'y a pas suffisamment de soleil disponible [18].

## I.7 Définition des harmoniques

Les appareils électriques non linéaires tels que les fours à arc, les éclairages, les convertisseurs, les redresseurs et les onduleurs, consomment des courants qui ne suivent pas une forme d'onde sinusoïdale lorsqu'ils sont connectés au réseau électrique. Cette non-linéarité provoque une altération de l'onde de tension et de courant, se manifestant par l'émergence de multiples fréquences harmoniques.

La distorsion harmonique représente une forme de perturbation du réseau électrique, potentiellement problématique si la somme des courants harmoniques dépasse certains seuils. Les fréquences harmoniques généralement considérées dans les réseaux électriques se situent entre 100 Hz et 2500 Hz, couvrant les rangs harmoniques de 2 à 50.

Le rang harmonique est défini comme le rapport entre la fréquence d'une harmonique donnée et celle du fondamental, qui est habituellement la fréquence industrielle standard de 50 ou 60 Hz [19].

## I.8 Origine des harmoniques

Les dispositifs générateurs d'harmoniques sont présents dans tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques, représentant une composante omniprésente des systèmes électriques. Les harmoniques résultent de charges non linéaires, où le courant absorbé ne correspond pas à la forme sinusoïdale de la tension d'alimentation. Ces charges non linéaires comprennent une gamme variée d'équipements, tels que les machines à souder, les fours à arc, les redresseurs dans l'industrie, ainsi que les variateurs de vitesse pour moteurs, les onduleurs et les appareils électroniques de bureau et domestiques. Même des dispositifs apparemment anodins tels que les éclairages néon et les transformateurs peuvent contribuer à la production d'harmoniques. Ainsi, la présence et l'impact des harmoniques dans les réseaux électriques sont des considérations importantes à prendre en compte dans la conception et la gestion des systèmes électriques modernes.

Pour atténuer la pollution harmonique dans les réseaux de distribution, différentes méthodes sont mises en œuvre. Parmi celles-ci, on distingue l'utilisation de filtres passifs et de filtres actifs, deux approches couramment employées. Toutefois, le filtrage actif est largement considéré comme la solution moderne la plus efficace pour contrer les diverses perturbations électriques [20].

## I.9 Filtrage d'harmoniques

Une méthode largement reconnue et efficace pour atténuer les harmoniques est l'utilisation de techniques de filtrage, comprenant :

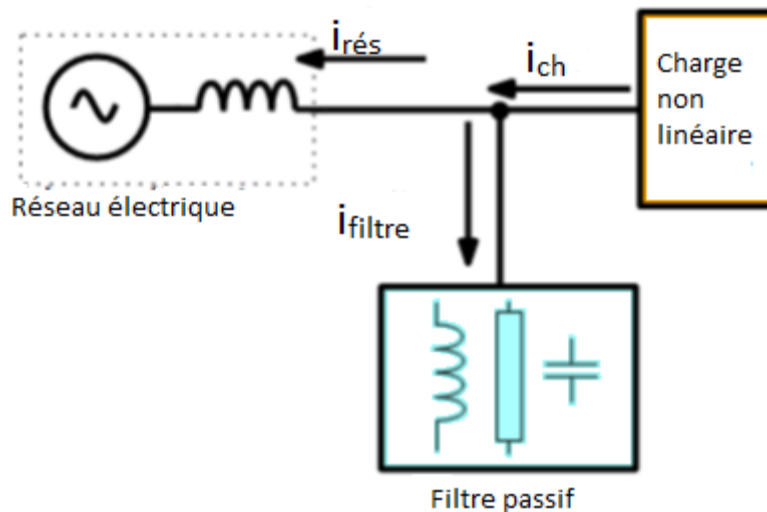
- **Filtrage passif**
- **Filtrage actif**

### I.9.1 Filtrage passif

Plusieurs stratégies ont été élaborées pour protéger les installations industrielles contre les effets néfastes des harmoniques. Actuellement, la méthode la plus répandue est le filtrage passif des harmoniques. Son principe consiste à ajuster localement l'impédance du réseau pour détourner les courants harmoniques et réduire les tensions harmoniques aux endroits nécessaires. Pour ce faire, on combine des composants capacitifs et inductifs afin de créer une résonance série accordée à une fréquence spécifique.

Pour atténuer les harmoniques non souhaitées en utilisant ce type de filtre, on les classe en deux catégories principales : les filtres en série et les filtres en parallèle.

On peut classer les filtres en parallèle en trois catégories: les filtres résonants, les filtres amortis et les filtres à inductance anti-harmonique [21][22].



**Figure I. 4:** branchement de filtre passif



## I.9.1.1 Filtre à inductance anti-harmonique

Cette première approche implique l'installation d'une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée

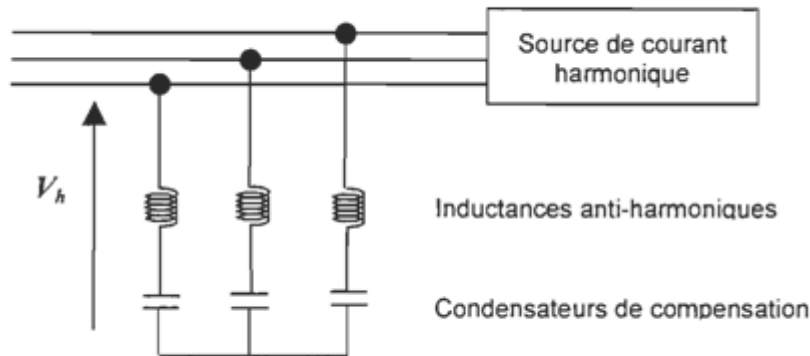


Figure I. 5: branchement d'inductance anti-harmonique

L'objectif principal de ce type de filtre est de protéger les batteries de condensateurs contre les surintensités causées par les harmoniques. En outre, il vise à diminuer les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Souvent, il permet également de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau, observées depuis le point d'injection à proximité de la fréquence d'accord, et donc de minimiser les tensions harmoniques sur le réseau.

Pour éviter toute résonance parallèle (anti-résonance) avec l'inductance du réseau auquel ils sont connectés, ces filtres sont accordés sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique [23].

## I.9.1.2 Filtre passif résonant

Le but d'un filtre résonant est d'offrir une impédance très basse lors du passage d'un courant harmonique à une fréquence spécifique.

Un filtre résonant avec un facteur de qualité élevé signifie que son accord est très précis, ce qui permet une filtration sélective. On installe souvent plusieurs de ces filtres en parallèle pour traiter différents rangs harmoniques [23].

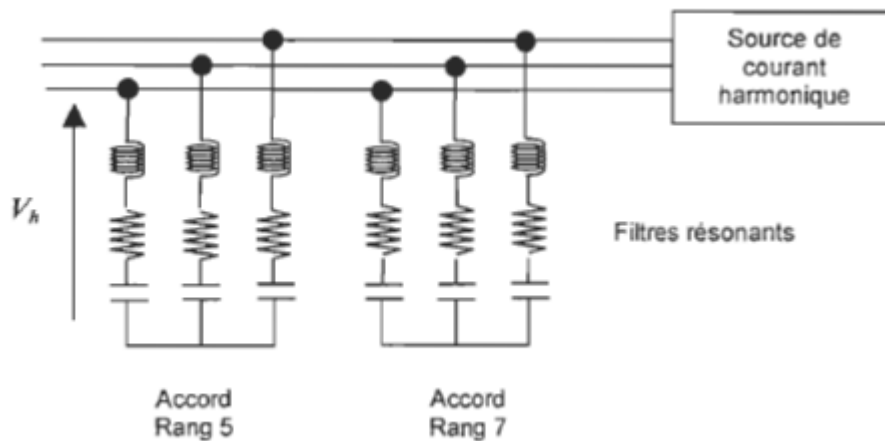


Figure I. 6 : Installations de filtres résonants

### I.9.1.3 Filtre passif amorti

Un filtre amorti est constitué d'une capacité connectée en série avec un ensemble formé par la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance, cette dernière étant appelée résistance d'amortissement. Ce type de filtre est employé lorsque les exigences de performance ne sont pas extrêmement élevées. Habituellement, un filtre passe-haut est utilisé pour filtrer simultanément les fréquences les plus élevées du spectre plutôt qu'une fréquence spécifique [24].

### I.9.2 Filtre actif

Un filtre actif est un dispositif qui utilise des sources de courant ou de tension pour éliminer les perturbations en les injectant dans le réseau, afin de s'opposer aux perturbations existante [24].

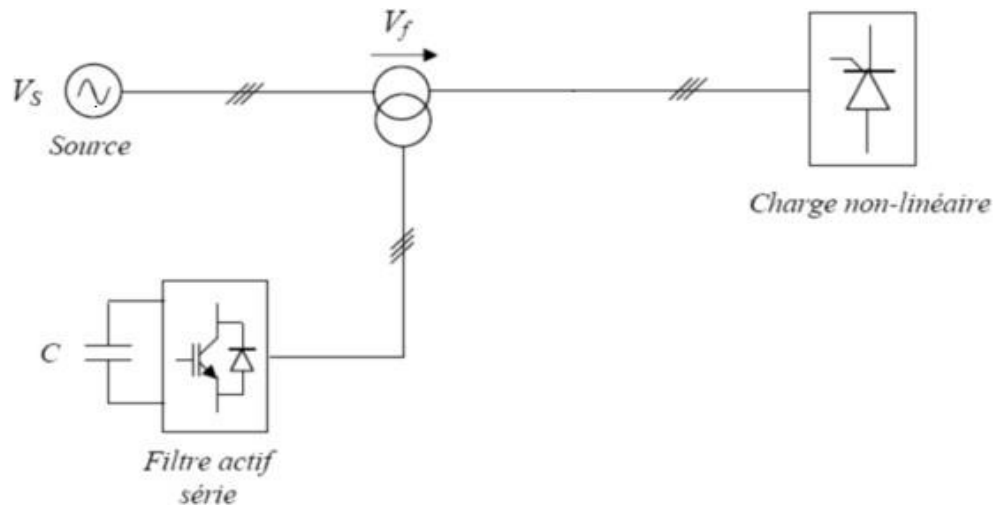
Trois types de filtres actifs peuvent être utilisés :

#### I.9.2.1 filtre actif série

Le filtre actif série fonctionne comme une source de tension harmonique qui annule les perturbations de tension telles que les creux provenant de la source, ainsi que celles induites par les courants perturbateurs circulant dans le réseau. Son rôle principal est de modifier l'impédance du réseau de manière locale pour atténuer les déséquilibres et les harmoniques, ce qui permet d'obtenir une tension plus sinusoïdale aux bornes de la charge. Cependant, il ne peut pas compenser les courants harmoniques absorbés par la charge.

## Chapitre I: l'onduleur et le filtrage d'harmonique

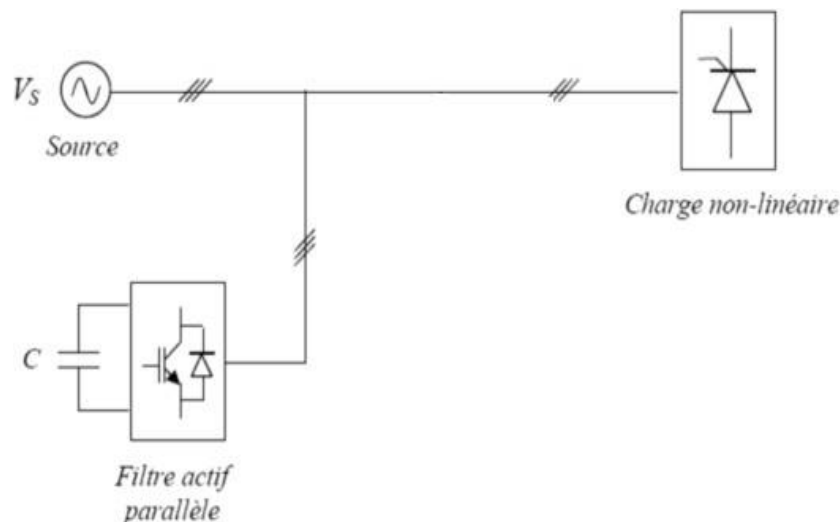
Son objectif est de pallier les perturbations de tension telles que les harmoniques, les déséquilibres et les fluctuations de tension [25] [27].



**Figure I. 7:** Filtre Actif Série

### I.9.2.2 filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle (FAP) est un dispositif qui s'intercale en parallèle avec le réseau électrique. Son rôle est d'analyser et de neutraliser en temps réel les composantes harmoniques des courants produits par les charges non linéaires connectées au réseau. Cette opération permet de restaurer la forme sinusoïdale du courant fourni par la source d'énergie. Le FAP est spécialement conçu pour atténuer les perturbations telles que les harmoniques, les déséquilibres de charge et la puissance réactive [26] [27].



**Figure I. 8:** Filtre Actif parallèle

## I.9.2.3 La combinaison parallèle-série actifs

L'association de deux filtres actifs, un en parallèle et un en série, connue sous le nom d'Unified Power Quality Conditioner (UPQC), est illustrée dans la figure I.9. Cette configuration combine les avantages des deux types de filtres actifs, à la fois parallèle et série. Par conséquent, elle permet de garantir simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale [26] [27].

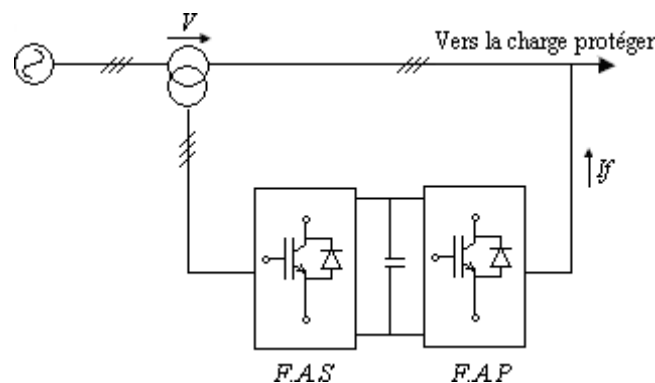
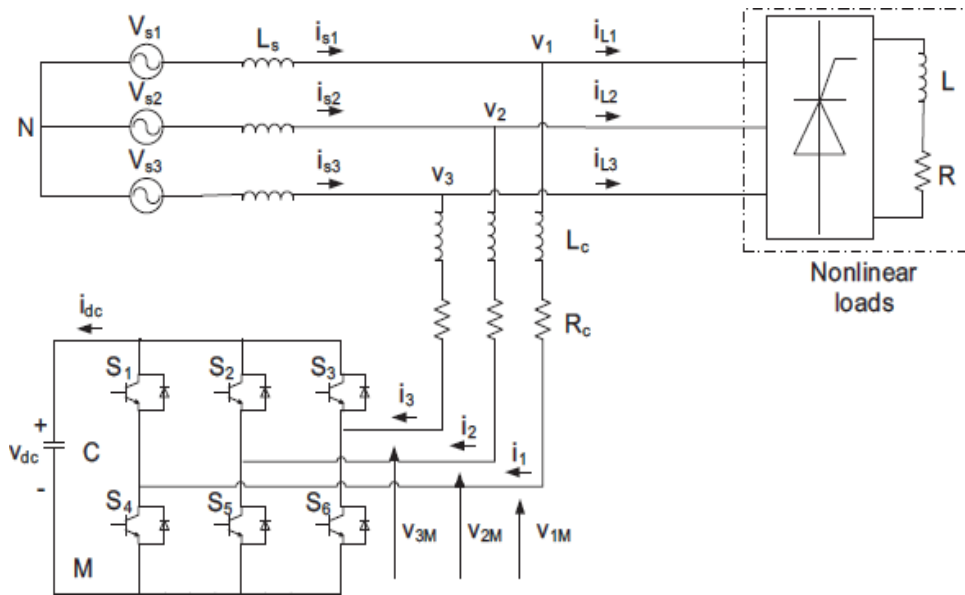


Figure I. 9: Combinaison parallèle-série de filtres actifs

## I.10 Principe d'un filtre actif de puissance

Les filtres de puissance active Shunt sont généralement utilisés dans les réseaux triphasés, particulièrement lorsque de grandes capacités sont nécessaires. Ce document se concentre principalement sur le type de filtre actif parallèle (APF) le plus couramment employé. En considérant l'application pratique, le SAPF est le plus fréquemment utilisé dans les systèmes triphasés en raison de ses excellentes performances et de sa facilité de mise en œuvre. Par conséquent, cette partie se concentrera sur le système triphasé à trois fils et développera un modèle analytique dynamique de l'APF.



**Figure I. 10:** Bloc d'un filtre actif de puissance [28].

En pratique, l'APF équivaut à une source de courant pour le contrôle du débit. Il se compose de trois sections principales : un module de détection de courant harmonique, un système de contrôle et un circuit principal.

La détection rapide du courant harmonique, basée sur la théorie de la puissance réactive instantanée est la méthode la plus couramment utilisée dans le module de détection de courant harmonique. Le circuit principal, constitué de dispositifs de commutation de puissance, génère des courants de compensation en fonction du signal de commande du système de contrôle.

Pour absorber les harmoniques générés par les charges non linéaires, les courants de compensation doivent avoir la même amplitude mais être en phase opposée aux courants harmoniques. La figure 1 illustre la structure d'un APF triphasé à trois fils.

Sur la figure I.10,  $V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}$  sont les tensions du réseau,  $i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}$  sont les courants de puissance,  $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}$  sont les courants de charge,  $V_1, V_2, V_3$  sont les tensions des points de jonction publics,  $i_1, i_2, i_3$  sont les courant de compensation de l'APF, C est le condensateur du côté DC,  $V_{dc}$  est la tension de C,  $i_{dc}$  est le courant de C.

## Chapitre I: l'onduleur et le filtrage d'harmonique

---

Le modèle analytique dynamique de l'APF est présenté de la manière suivante. En appliquant les lois de Kirchhoff sur la tension et le courant, nous pouvons obtenir les équations de circuit suivantes :

$$\begin{cases} V_1 = R_c i_1 + V_{1M} + V_{MN} + L_c \frac{di_1}{dt} \\ V_2 = R_c i_2 + V_{2M} + V_{MN} + L_c \frac{di_2}{dt} \\ V_3 = R_c i_3 + V_{2M} + V_{MN} + L_c \frac{di_3}{dt} \end{cases} \quad (I.1)$$

$L_c$  et  $R_c$  représentent respectivement l'inductance et la résistance de l'APF, tandis que  $V_{MN}$  correspond à la tension entre les points M et N.

$$V_{MN} = -\frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 V_{mM} \quad (I.2)$$

L'état marche/arrêt des périphériques dans les deux branches du pont IGBTB est indiqué par la fonction de commutation,  $C_k$  qui est définie comme :

$$C_k = \begin{cases} 1, \text{ si } S_k \text{ est marche et } S_{k+3} \text{ est arrêt} \\ 0, \text{ si } S_k \text{ est arrêt et } S_{k+3} \text{ est marche} \end{cases} \quad (I.3)$$

Quand  $K=1,2,3$

En tenant compte de la relation  $V_{KM} = C_k V_{dc}$  donc l'équation (2) se transforme en

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = -\frac{V_{dc}}{L_c} \left( C_1 - \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 C_m \right) + \frac{V_1 - R_c i_1}{L_c} \\ \frac{di_2}{dt} = -\frac{V_{dc}}{L_c} \left( C_2 - \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 C_m \right) + \frac{V_2 - R_c i_2}{L_c} \\ \frac{di_3}{dt} = -\frac{V_{dc}}{L_c} \left( C_3 - \sum_{m=1}^3 C_m \right) + \frac{V_3 - R_c i_3}{L_c} \end{cases} \quad (I.4)$$

Donc, la fonction de commutation d'état est définie comme suit :

$$d_{nk} = \left( C_k - \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 C_m \right) \quad (I.5)$$

## Chapitre I: l'onduleur et le filtrage d'harmonique

---

Cela démontre que  $d_{nk}$  dépend de la fonction de commutation de  $C_k$ . En outre, en utilisant la base (I.6) et pour les huit états de commutation autorisés de l'IGBT, il est possible d'obtenir que la fonction d'état de commutation est définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} d_{n1} \\ d_{n2} \\ d_{n3} \end{bmatrix} = (I.6) \frac{1}{3} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Équation (I.5) se transforme en :

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = -\frac{V_{dc}}{L_c} \left( C_1 - \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 C_m \right) + \frac{V_1 - R_C i_1}{L_c} \\ \frac{di_2}{dt} = -\frac{V_{dc}}{L_c} \left( C_2 - \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 C_m \right) + \frac{V_2 - R_C i_2}{L_c} \\ \frac{di_3}{dt} = -\frac{V_{dc}}{L_c} \left( C_3 - \sum_{m=1}^3 C_m \right) + \frac{V_3 - R_C i_3}{L_c} \end{cases} \quad (I.7)$$

Définie également deux autres variables :

$$\begin{cases} x_1 = i_k \\ x_2 = \dot{x}_1 = i'_k \end{cases} \quad (I.8)$$

La dérivée de  $x_1$  en fonction du temps donne :

$$\dot{x}_1 = i'_k = \frac{1}{L_c} (V_k - R_C i_k - V_{dc} d_k) \quad (I.9)$$

On pose 
$$f(x) = \frac{1}{L_c} (V_K - R_C i_k)$$

Et 
$$g = -\frac{1}{L_c} V_{dc}$$

$$u = d_K$$

### I.11 Conclusion

Ce chapitre offre une vue d'ensemble exhaustive des convertisseurs DC/AC, en débutant par une introduction générale aux onduleurs. On explique leur fonctionnement, les diverses catégories d'onduleurs et leurs principales applications, en soulignant les bénéfices et les désavantages de chaque catégorie. Par la suite, on met l'accent sur l'onduleur de courant, en examinant l'origine des harmoniques et les diverses techniques de filtrage disponibles pour réduire ces harmoniques. Enfin, on accorde une grande importance à l'analyse approfondie du filtre actif parallèle, qui est utilisé pour résoudre toutes les perturbations du courant, telles que les harmoniques et les déséquilibres.



**Chapitre II:**  
**Commande par**  
**backstepping de**  
**convertisseur DC/AC**

### II.1 Introduction

La plupart des systèmes physiques qui nous entourent sont non linéaires. Souvent, ces non linéarités sont faibles ou ne sont pas visibles dans la plage d'opérations de ces procédés. L'impératif constant d'améliorer les performances des systèmes commandés conduit à des modélisations de plus en plus précises, permettant une réponse sur une plage d'opérations plus large. À ce stade, les non-linéarités deviennent perceptibles, rendant les outils d'analyse et de synthèse des lois de commande utilisés dans le domaine linéaire obsolètes et incapables de rendre compte de certains phénomènes. C'est pourquoi, ces dernières années, de nombreuses recherches ont été menées dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires. Le backstepping est l'une de ces nouvelles méthodes de contrôle. Le but de ce chapitre est de concevoir des lois de commande non linéaires basées sur la technique de Backstepping [29].

### II.2 Les systèmes non linéaires

Ils se présentent comme un ensemble d'équations (différentielles par exemple) non linéaires qui décrivent l'évolution temporelle des variables du système sous l'influence d'un nombre fini de variables indépendantes, appelées entrées ou variables de commandes. Ces commandes peuvent être choisies librement pour atteindre certains objectifs. Les entrées peuvent être définies en boucle ouverte, c'est-à-dire dépendant uniquement du temps, ou en boucle fermée, c'est-à-dire en fonction des variables mesurées, appelées observations. Contrairement aux systèmes linéaires, qui ont généralement un seul point d'équilibre en régime permanent, les systèmes non linéaires peuvent converger vers plusieurs points d'équilibre. En termes simples, un système non linéaire est un système où le théorème de superposition ne s'applique plus [30].

### II.3 Stabilité des systèmes non linéaires

La stabilisation est un problème qui implique de maintenir le système à proximité d'un état d'équilibre  $y^*$ . L'objectif est de développer des lois de commande appelées stabilisantes, comme  $y^*$

Qui garantissent un équilibre asymptotiquement stable du système qui est soumis à ces lois.

Le défi du suivi de trajectoire est de maintenir le système sur une trajectoire souhaitée  $y(t) > 0$ , c'est-à-dire de trouver un contrôle tel que pour toute condition initiale dans une région  $D$ , l'erreur entre la sortie et la sortie souhaitée tend vers 0 lorsque  $t \rightarrow \infty$ , et l'état reste limité.

$$e(t) = y(t) - y_d(t) \quad (\text{II.1})$$

Il existe de nombreuses techniques de commande qui permettent de créer des lois de contrôle pour la stabilisation des systèmes. Dans la section suivante, nous exposons celles qui nous ont été les plus bénéfiques [31].

### II.4 Méthodes de Lyapunov

Pour commander les systèmes non linéaires, il existe deux approches principales. La première consiste à linéariser le système à contrôler, afin d'appliquer les techniques dédiées aux systèmes linéaires. La seconde approche cherche à déterminer une Fonction de Commande de Lyapunov qui assure certaines performances pour le système en boucle fermée. Trouver une telle fonction peut être particulièrement complexe pour un système non linéaire de haut ordre. La technique du backstepping permet de simplifier cette complexité de manière avantageuse. L'analyse de la stabilité dans le contexte du backstepping repose sur les méthodes de Lyapunov, qui sont des outils très puissants pour tester et établir des conditions suffisantes à la stabilité des systèmes dynamiques, sans nécessiter la résolution explicite des équations différentielles correspondantes [32].

#### II.4.1 La première méthode

Cette méthode permet d'analyser la stabilité d'un système en étudiant la stabilité locale par linéarisation de la dynamique autour d'un point d'équilibre. Cependant, son importance est limitée, car elle ne permet d'examiner que la stabilité locale et n'apporte pas d'information sur le domaine de stabilité global. En raison des approximations de premier degré (linéarisation), il est impossible de prendre en compte tous les types de phénomènes non-linéaires. En fait, l'étude locale est surtout utile pour décider de la pertinence de poursuivre l'analyse de la stabilité. Si le système linéarisé est trouvé instable, le système non linéaire le sera nécessairement aussi [32].

### II.4.2 La deuxième méthode

Cette méthode repose sur le concept d'énergie dans un système. Son principe consiste à analyser la stabilité du système sans avoir à résoudre les équations différentielles non linéaires qui le régissent. La stabilité est déterminée uniquement par l'étude des variations (signe de la dérivée) de l'énergie, ou d'une fonction équivalente, le long de la trajectoire du système. L'analyse de la stabilité d'un système, caractérisé par un vecteur d'état  $x$ , implique de trouver une fonction  $v(x)$  (représentative de l'énergie) de signe défini, dont la dérivée  $dv/dt$  est semi définie et de signe opposé dans le même domaine [32].

### II.5 Stabilité au sens de Lyapunov

La théorie de Lyapunov, en particulier sa deuxième méthode (également appelée méthode directe), consiste à trouver une fonction définie positive associée au système, notée  $V(x)$ , sans avoir à résoudre explicitement les équations différentielles qui le décrivent [33].

Si la fonction de Lyapunov est strictement décroissante, c'est-à-dire que:

$$V' < 0, \forall x \neq 0$$

Alors il faut garantir la stabilité asymptotique.

La fonction de Lyapunov  $V(x)$  est continue :

$$V(x) > 0, \forall x \neq 0 \text{ et } V(x) = 0, \text{ pour } x = 0.$$

$$V'(x) < 0, \forall x \neq 0 \text{ et } V(x) = 0, \text{ pour } x = 0.$$

### II.6 La nécessité d'un système de commande non linéaire

Un système de commande non linéaire est essentiel pour gérer les dynamiques complexes et imprévisibles des systèmes modernes. Contrairement aux systèmes linéaires, les systèmes non linéaires peuvent traiter des comportements tels que la saturation, les hystérésis, et les phénomènes chaotiques, qui sont courants dans les applications réelles. Ils offrent une meilleure robustesse et une performance améliorée dans des conditions variées et incertaines, rendant ainsi la commande plus efficace et fiable [31].

### II.7 Définition backstepping

La méthode du backstepping a émergé dans les années 1990 grâce à P. Kokotovic. Son histoire est résumée en détail dans l'ouvrage de Krstic, qui approfondit largement cette approche. Contrairement à la commande non linéaire avec linéarisation entrée-sortie, qui tend à annuler des non-linéarités qui pourraient être utiles, le backstepping est moins restrictif et n'impose pas au système de devenir linéaire. Son idée centrale est de synthétiser la loi de commande de manière récursive, en considérant certaines composantes du vecteur d'état comme des "commandes virtuelles" et en élaborant des lois de commande intermédiaires. Le backstepping est applicable aux systèmes non linéaires triangulaires [34].

### II.8 Historique de la commande par la méthode backstepping

La méthode de backstepping, élaborée par Kanellakopoulos et ses collaborateurs en 1991, s'inspire des travaux antérieurs de Feurer Morse en 1978 et ceux de Tsinias en 1989, ainsi que de Kokotovic et Sussmann en 1989. Elle constitue une approche systématique pour la conception de contrôleurs destinés aux systèmes non linéaires. Le terme "backstepping" trouve son sens dans le processus récursif inhérent à cette méthodologie de synthèse. Son application permet de construire de manière progressive une loi de commande pour les systèmes non linéaires, en se basant sur la théorie de Lyapunov. L'idée centrale réside dans le choix d'une fonction de Lyapunov définie positive, dont la dérivée est constamment négative [35].

### II.9 Principe du Backstepping

Le principe fondamental du "backstepping" consiste à rendre les systèmes en boucle équivalents à des sous-systèmes d'ordre un en cascade, lesquels sont stables selon les critères de Lyapunov. Ceci confère aux systèmes des propriétés de robustesse et une stabilité globale asymptotique

En d'autres termes, cette méthode est un processus en plusieurs étapes. À chaque étape, une commande virtuelle est générée pour garantir que le système converge vers son état d'équilibre

La fonction de Lyapunov est utilisée pour stabiliser progressivement chaque étape de la synthèse, assurant ainsi la convergence du système [36].

### II.10 Principe de la commande par la méthode backstepping

La plupart des techniques de commande non linéaire reposent sur la théorie de la stabilité de Lyapunov, visant à trouver une loi de commande qui rend la dérivée d'une fonction de Lyapunov, choisie au préalable, négative ou semi-définie négative. La principale difficulté réside dans le choix d'une fonction de Lyapunov appropriée. La technique du backstepping surmonte cette difficulté en construisant progressivement une fonction de Lyapunov adaptée au système, permettant de déduire la commande qui rend sa dérivée négative. Cette technique s'applique aux systèmes dits en strict feedback. La méthode du backstepping commence par définir une fonction d'énergie qui intègre l'écart entre les sorties régulées du système et les objectifs de commande. À chaque étape, elle construit un écart entre l'état courant du système et une commande virtuelle qui garantirait, si elle était appliquée telle quelle, la non-positivité de la dérivée de la fonction de Lyapunov. À la fin de chaque étape, la fonction d'énergie est ajustée par cet écart pour assurer sa convergence vers zéro. Le processus se termine lorsque le vecteur de commande du système apparaît : la commande virtuelle définie au dernier pas devient alors une commande réelle, garantissant la convergence des états du système vers zéro et l'équilibre des sorties régulées autour des objectifs de commande [37].

### II.11 Principe du réglage de backstepping

Le principe de réglage de la commande backstepping repose sur une approche récursive et systématique pour concevoir des contrôleurs pour des systèmes dynamiques non linéaires. Le processus commence par la décomposition du système complexe en sous-systèmes plus simples, chacun associé à une variable d'état intermédiaire. Pour chaque sous-système, un contrôleur intermédiaire est conçu en utilisant la théorie de Lyapunov pour assurer sa stabilisation. Ensuite, à chaque étape, l'erreur de stabilisation du contrôleur intermédiaire précédent est utilisée pour définir le contrôleur du sous-système suivant, et ce processus itératif se poursuit jusqu'à ce que l'ensemble du système soit stabilisé. Le contrôleur final est obtenu en combinant les contrôleurs intermédiaires, assurant ainsi la stabilisation globale du système. À chaque étape, la stabilité est vérifiée par une fonction de Lyapunov, et une fonction composée est construite pour garantir la stabilité de l'ensemble du système [38].

### II.12 Les principaux avantages et inconvénients poses par la commande Backstepping

#### II.12.1 Avantages

1. Simplicité de conception : La commande backstepping offre une méthode relativement simple pour concevoir des contrôleurs, grâce à son approche systématique et structurée.
2. Adaptabilité au non linéaire : Elle est particulièrement efficace pour les systèmes non linéaires, où les méthodes de linéarisation traditionnelles ne fonctionnent pas.
3. Suivi de consigne et rejet de perturbations : Cette technique permet de suivre les consignes de manière précise tout en rejetant efficacement les perturbations.
4. Stabilité assurée : Basée sur la théorie de Lyapunov, la commande backstepping garantit la stabilité du système contrôlé [36].

#### II.12.2 Inconvénients

L'utilisation de la technique de backstepping pour la commande non linéaire d'un système d'ordre  $n$  peut présenter des difficultés qui constituent des obstacles à la convergence des grandeurs du système. Parmi les principaux problèmes posés par la commande backstepping, on trouve :

1. Complexité croissante avec l'ordre du système : La complexité de la conception et de la mise en œuvre augmente rapidement avec l'ordre du système, rendant la technique difficile à appliquer pour des systèmes de haute dimension.
2. Problèmes de convergence : Il peut y avoir des difficultés pour assurer la convergence des différentes variables du système, surtout lorsque des incertitudes ou des perturbations non modélisées sont présentes.
3. Besoin de modèles précis : La technique nécessite des modèles précis et détaillés du système, ce qui peut être une limitation en présence de systèmes avec des dynamiques incertaines ou mal connues [36].

### II.13 Conception d'une commande de backstepping

La méthode de backstepping est une approche de commande efficace pour les systèmes non linéaires, utilisant la commande virtuelle pour simplifier la conception des lois de commande. En général, les systèmes non linéaires complexes peuvent être transformés en plusieurs sous-systèmes grâce à la conception backstepping, et un contrôleur virtuel pour chaque sous-système est alors conçu en se basant sur les fonctions de Lyapunov. Ainsi, à chaque étape, une loi de commande plus simple est traitée.

Dans cette section, la commande de backstepping est conçue pour l'APF afin d'assurer le suivi correct du courant de référence et de garantir la stabilité du système en boucle fermée en se basant sur l'analyse de Lyapunov. La conception du commande de backstepping pour l'APF comporte deux étapes. Dans un premier temps, une fonction de contrôle virtuel est proposée par une fonction de Lyapunov  $V_1$ . La véritable loi de contrôle est conçue à la deuxième étape. Ce qui suit détaille la procédure de conception du commande de backstepping.

Étape 01 : Définie le courant de référence en utilisant le terme  $y_d$ , Et on peut définir l'erreur de suivi comme suit :

$$e_1 = x_1 - y_d \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{y}_d \\ &= x_2 - \dot{y}_d \end{aligned}$$

Sélectionne le contrôle virtuel comme :

$$a_1 = -c_1 e_1 + \dot{y}_d \quad (\text{II.3})$$

Où  $c_1$  est une constante positive non nulle, définie l'erreur :

$$(\text{II.3}) e_2 = x_2 - a_1$$

Détermine la première fonction de Lyapunov :

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (\text{II.5})$$



Et dérivée de  $V_1$  est :

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= e_1 \dot{e}_1 = e_1(x_2 - \dot{y}_d) \\ &= -k_1 e_1^2 + e_1 e_2\end{aligned}\quad (\text{II.6})$$

$$\text{Si : } e_2 = 0 \quad \text{alors : } \dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0$$

La commande de backstepping est :

$$u = \frac{1}{g} [-f(x) + \dot{y}_d - k_1 e_1] \quad (\text{II.7})$$

### II.14 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord parlé de système non linéaire et Méthodes de Lyapunov, après nous avons fait une étude générale sur la commande backstepping, l'histoire de cette commande, son principe, et ses avantages et inconvénients, Finalement, nous sommes entrés le modèle dynamique de filtre actif de puissance dans les équations de backstepping.

**Chapitre III:  
Résultats de  
simulations et  
discussions**

# Chapitre III: Résultats de simulations

## III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats des simulations de la technique de commande par backstepping appliquée au convertisseur statique DC/AC. L'objectif principal est de produire un courant sinusoïdal avec un minimum d'harmoniques à la sortie de l'onduleur. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, choisi pour ses nombreux avantages distinctifs, notamment sa convivialité et son efficacité remarquable. Les résultats obtenus ainsi que les courbes correspondantes seront détaillés.

## III.2 Description du système

Le système comprend un filtre actif de puissance qui est connecté à un réseau triphasé à travers un convertisseur courant continu-alternatif (onduleur). La commande de l'onduleur est réalisée en utilisant une technique de réglage par backstepping.

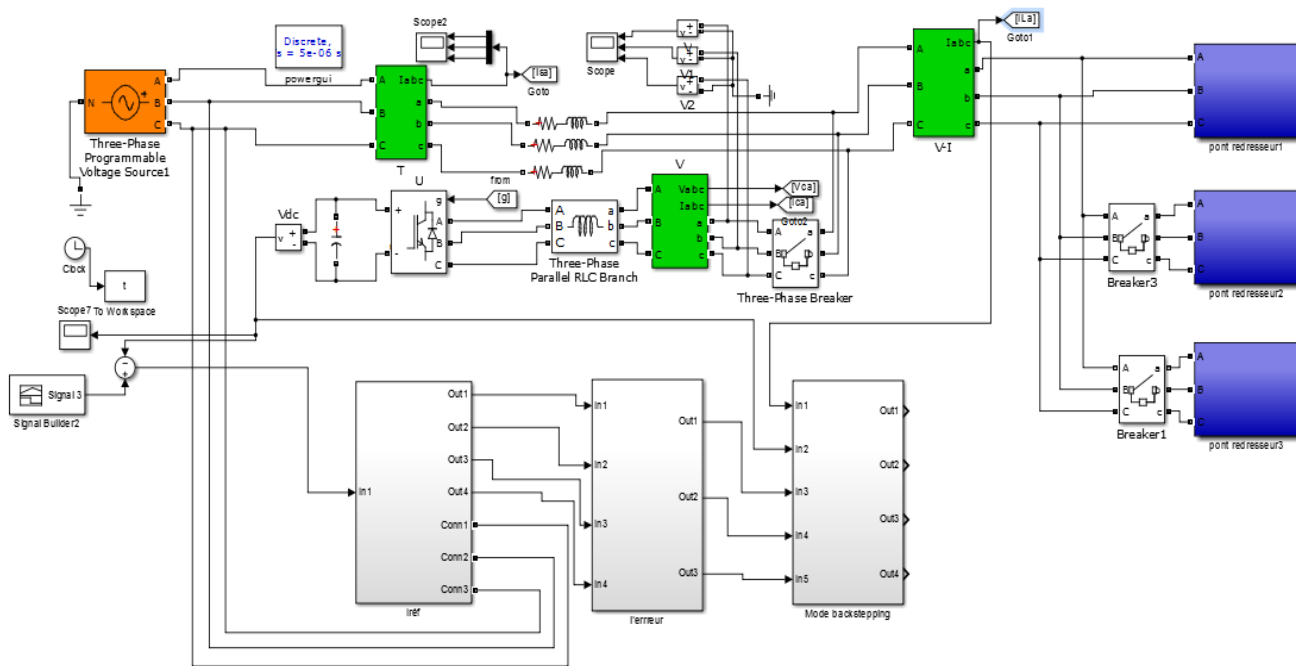


Figure III. 1: Simulation de filtre actif de puissance

## Chapitre III: Résultats de simulations

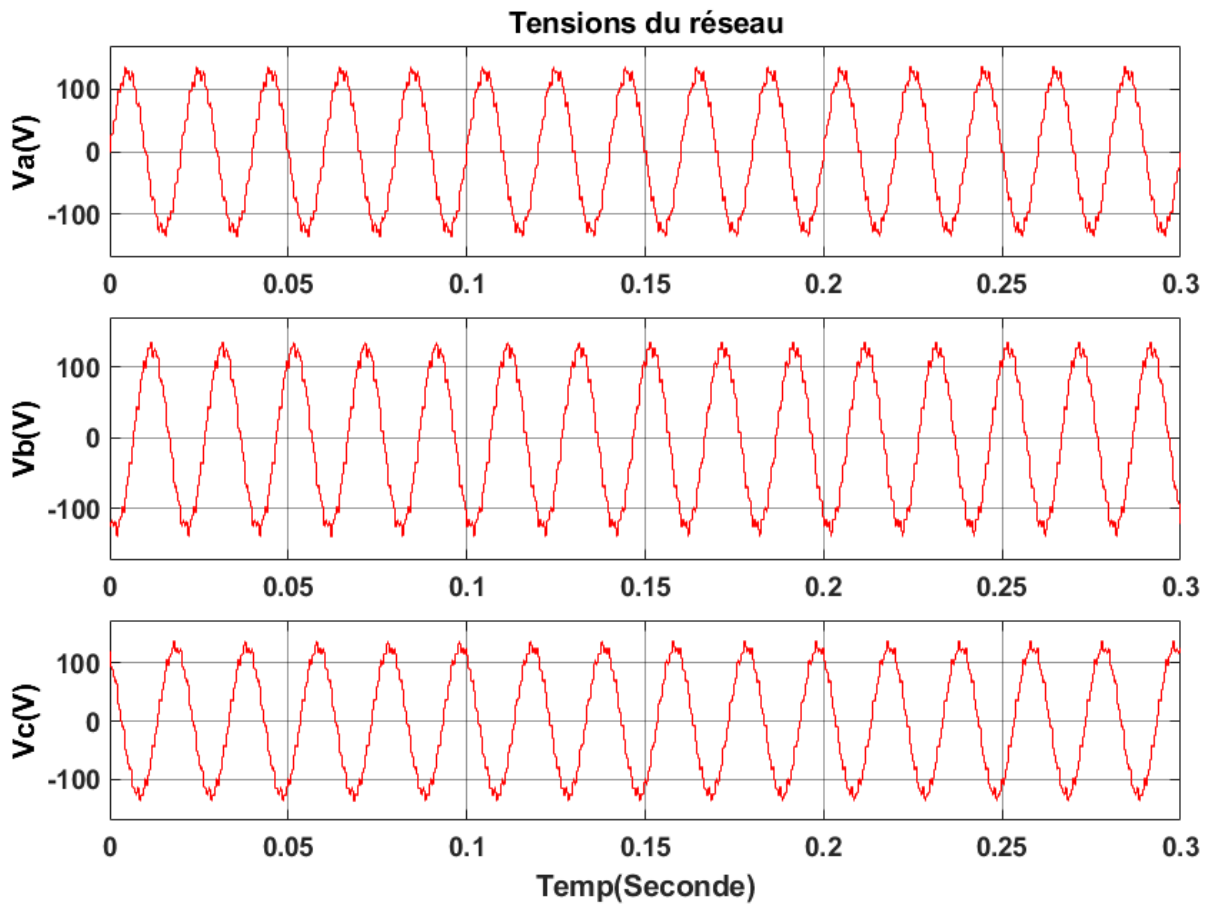
### III.3 Composants et Paramètres de simulation

Source de tension (Vs)	$110\sqrt{2}V$
Harmonique de source de tension	50 HZ
Ordre, Amplitude	(10 <sup>ème</sup> et 20 <sup>ème</sup> )20
Inductance et résistance	$5 \cdot 10^{-6} H, 5\Omega$
Inductance de compensation	$3 \cdot 10^{-3} H$
Condensateur coté DC	$320 \cdot 10^{-6} F$
La tension de la capacité	350 V
Résistance dans la charge non linéaire( $R_L$ )	10 $\Omega$
Inductance dans la charge non linéaire( $L_L$ )	$2 \cdot 10^{-3} H$
Résistance de compensation	1
K1	11000

### III.4 Analyse de Simulation

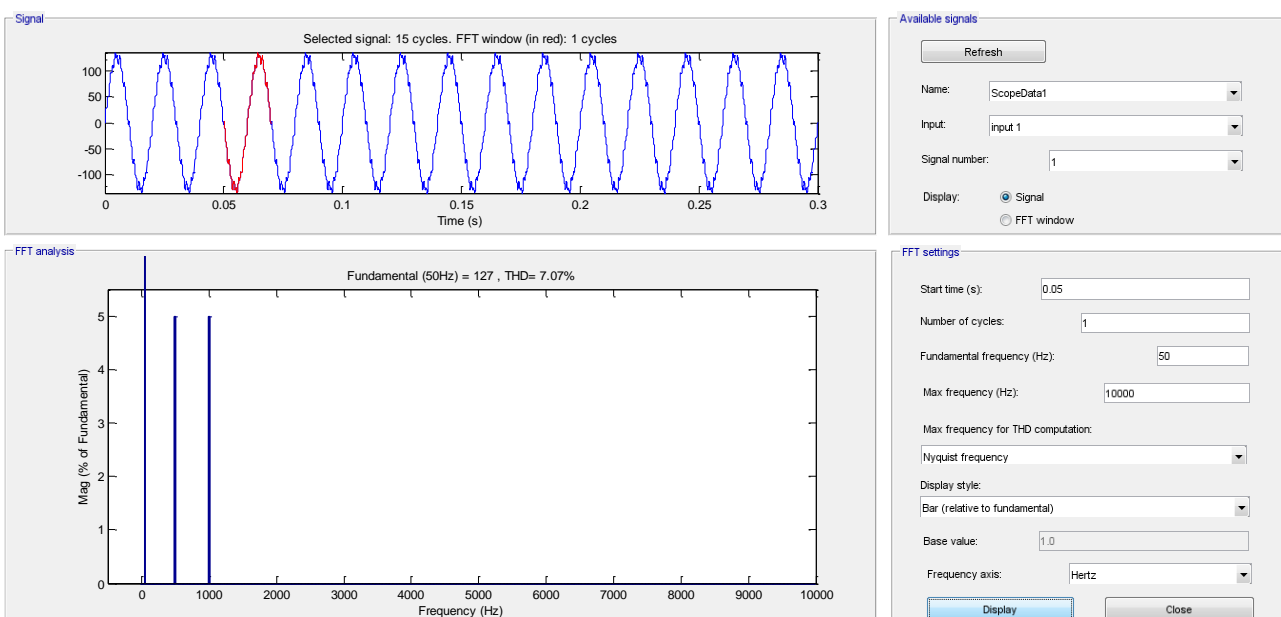
Les stratégies de contrôle du système de filtre actif de puissance sont mises en pratique dans cette section en utilisant le module SimPower Systems de MATLAB. Le pont triphasé universel et une branche RL en série forment la charge non linéaire. Le tableau III-1 présente les composants et les paramètres. Le mode de fonctionnement du filtre actif de puissance débute lorsque le disjoncteur se ferme à l'instant  $t=0.04s$ . Au sein d'un système d'alimentation électrique pratique, la tension d'alimentation peut présenter des harmoniques variés fréquemment et des charges non linéaires, ce qui altère l'effet de compensation harmonique. Afin d'analyser les résultats du filtre actif de puissance, nous élaborons la tension d'alimentation afin de prendre en compte les 10<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> harmoniques, et ajoutons séparément une autre charge non linéaire aux instants  $t=0.1s$  et  $t=0.2s$ .

## Chapitre III: Résultats de simulations



**Figure III. 2:** Tension de réseau

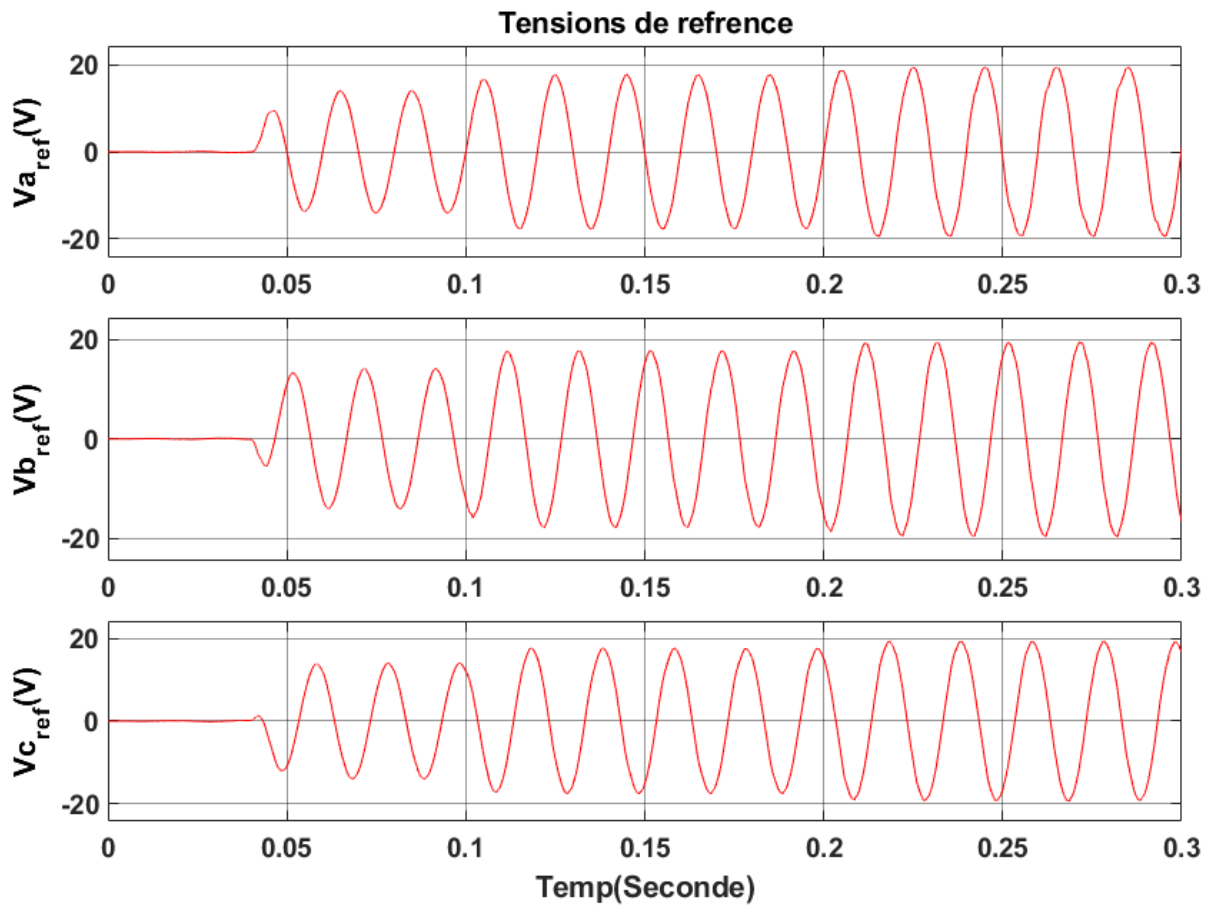
La figure III-2 illustre la variation de la tension de réseau en fonction du temps. On remarque que les trois tensions ( $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$  et  $V_{sc}$ ) présentent des harmoniques en raison de l'automate programmable triphasé et les trois charges.



## Chapitre III: Résultats de simulations

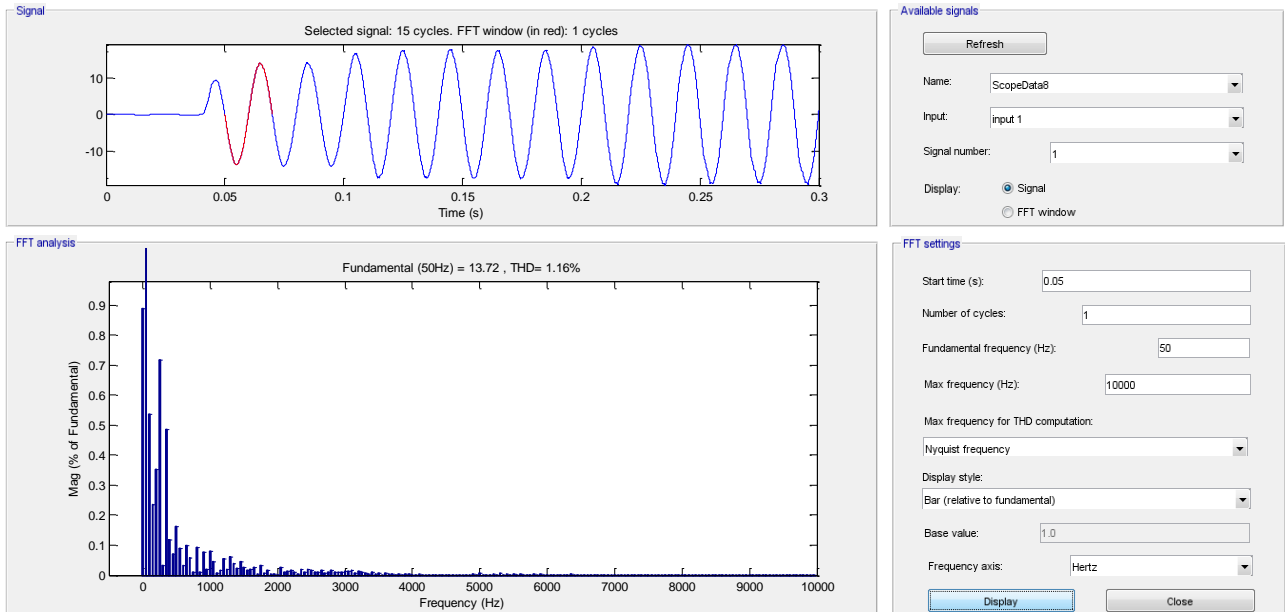
**Figure III. 3:** THD de tension de réseau

La figure III.3 montre que les ondes de tension d'alimentation sont déformées en raison du 10<sup>ème</sup> et du 20<sup>ème</sup> harmonique, avec une distorsion harmonique totale (THD) de 7.07 % d'après l'analyse harmonique.

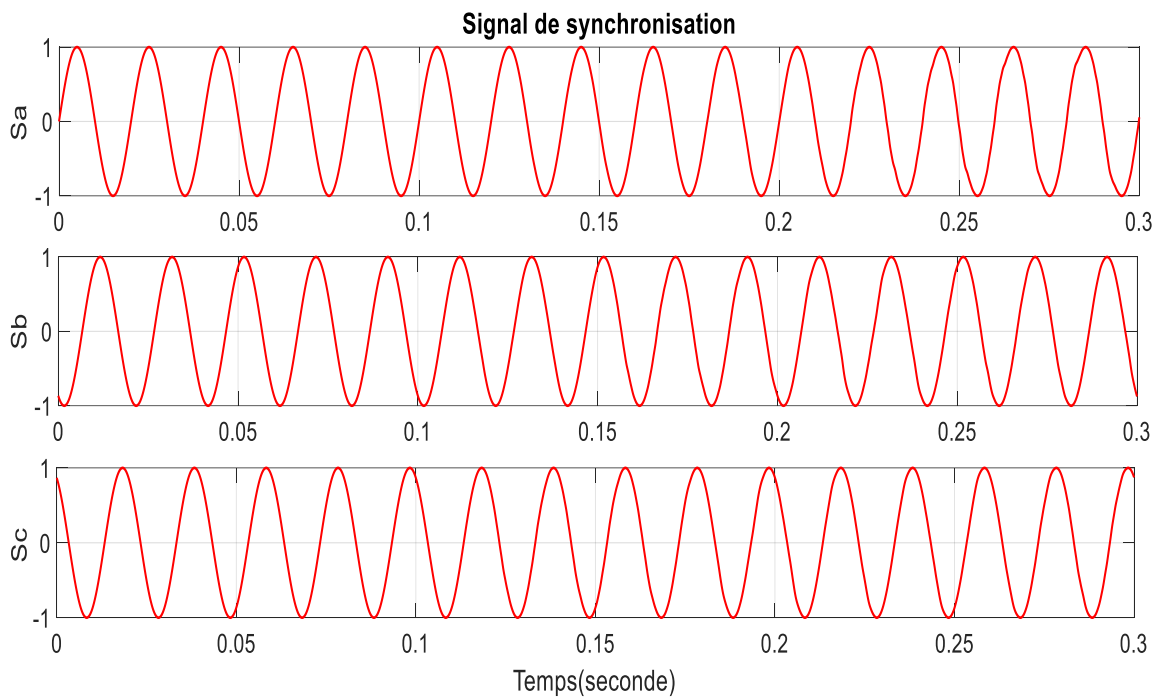


**Figure III. 4:** Tensions de référence

## Chapitre III: Résultats de simulations



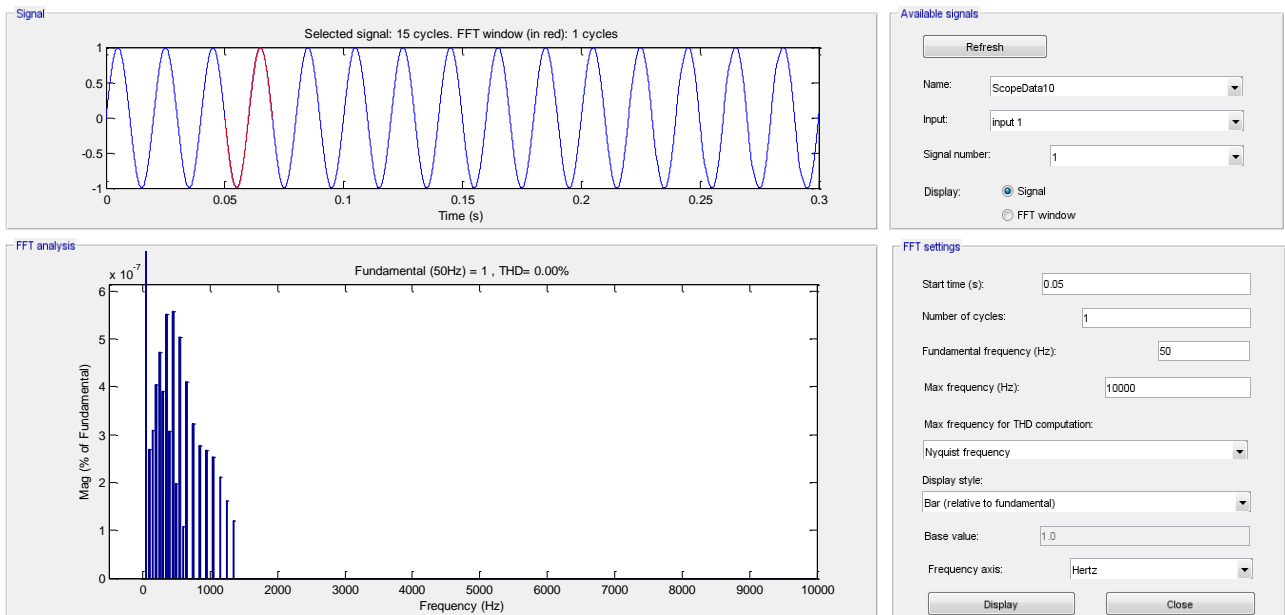
**Figure III. 5: THD de tensions de référence**



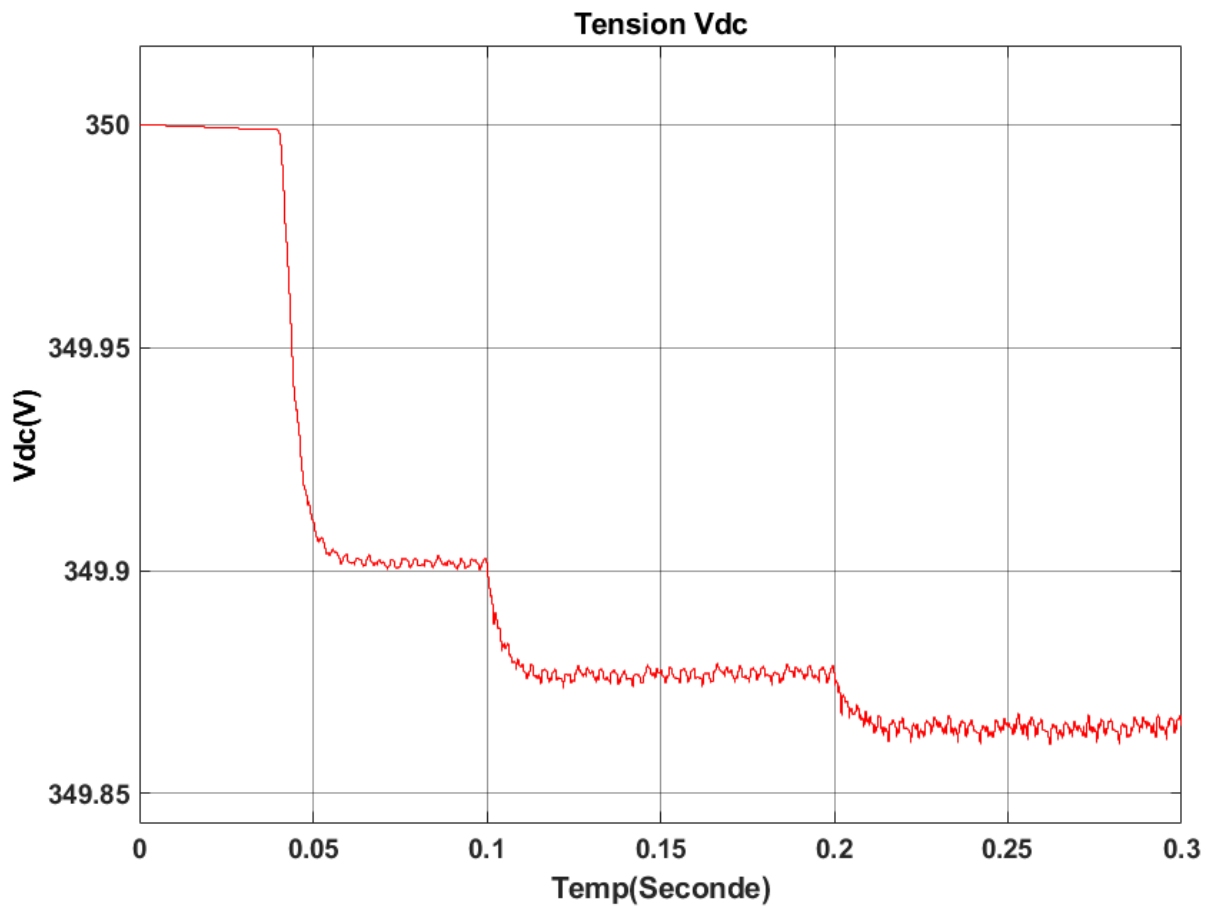
**Figure III. 6: Signal de synchronisation**

La figure III.6 représente le signal de synchronisation en fonction du temps en sortie de bloc phase locked loop (PLL).

# Chapitre III: Résultats de simulations



**Figure III. 7:** THD de Signal de synchronisation

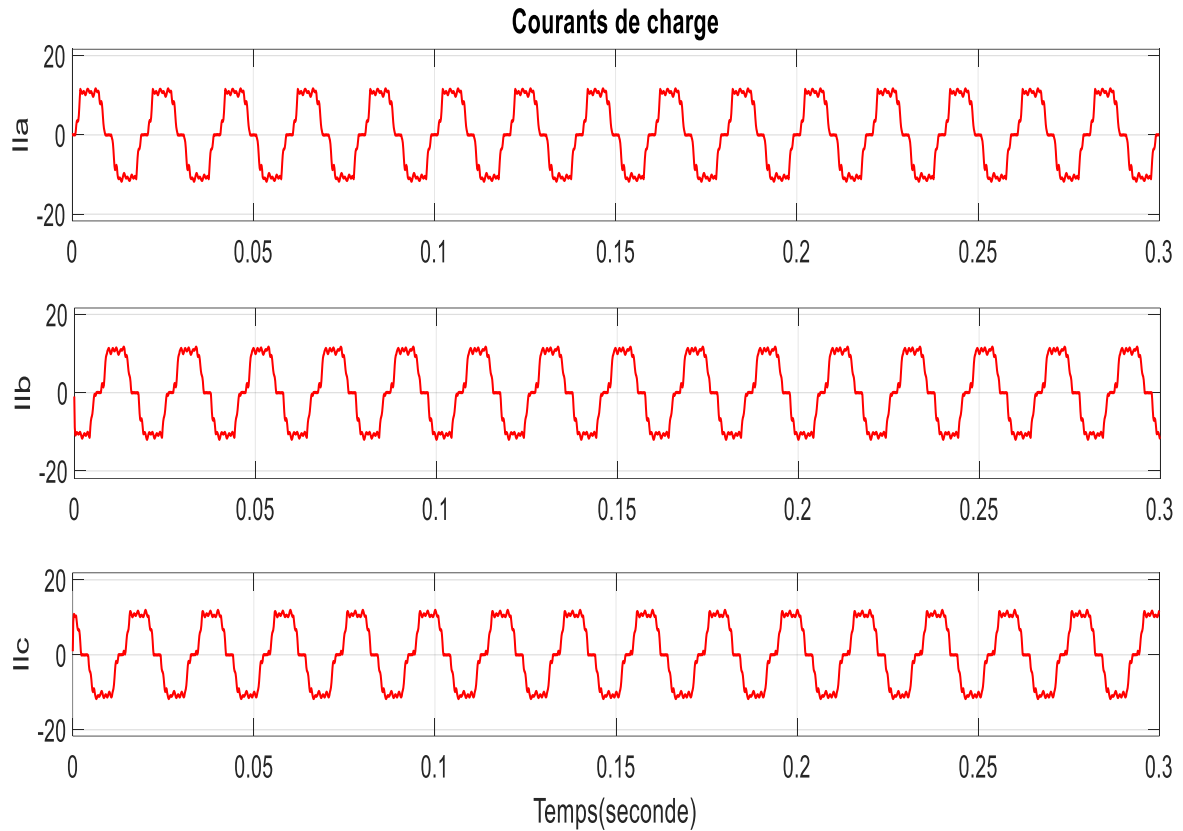


**Figure III. 8:** Tension Vdc



## Chapitre III: Résultats de simulations

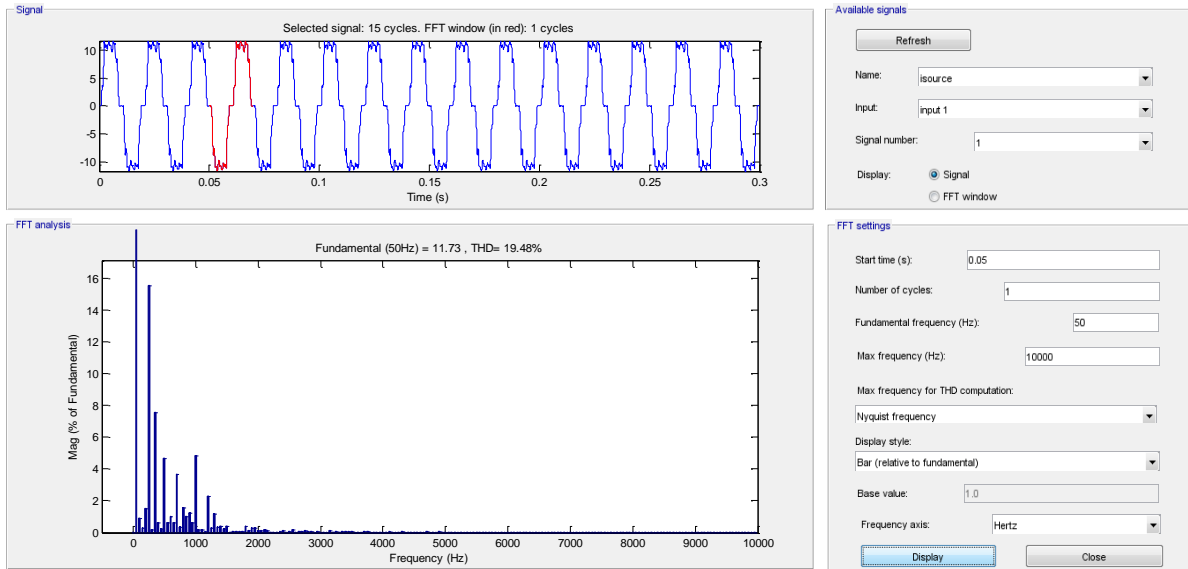
Nous avons fixé la valeur initiale de la tension continue (DC) à 350 V. La figure III-8 montre la variation de la tension continue (DC) en fonction du temps. On observe une erreur stable entre la tension continue et la valeur donnée, ce qui permet d'évaluer l'amplitude des courants de charge



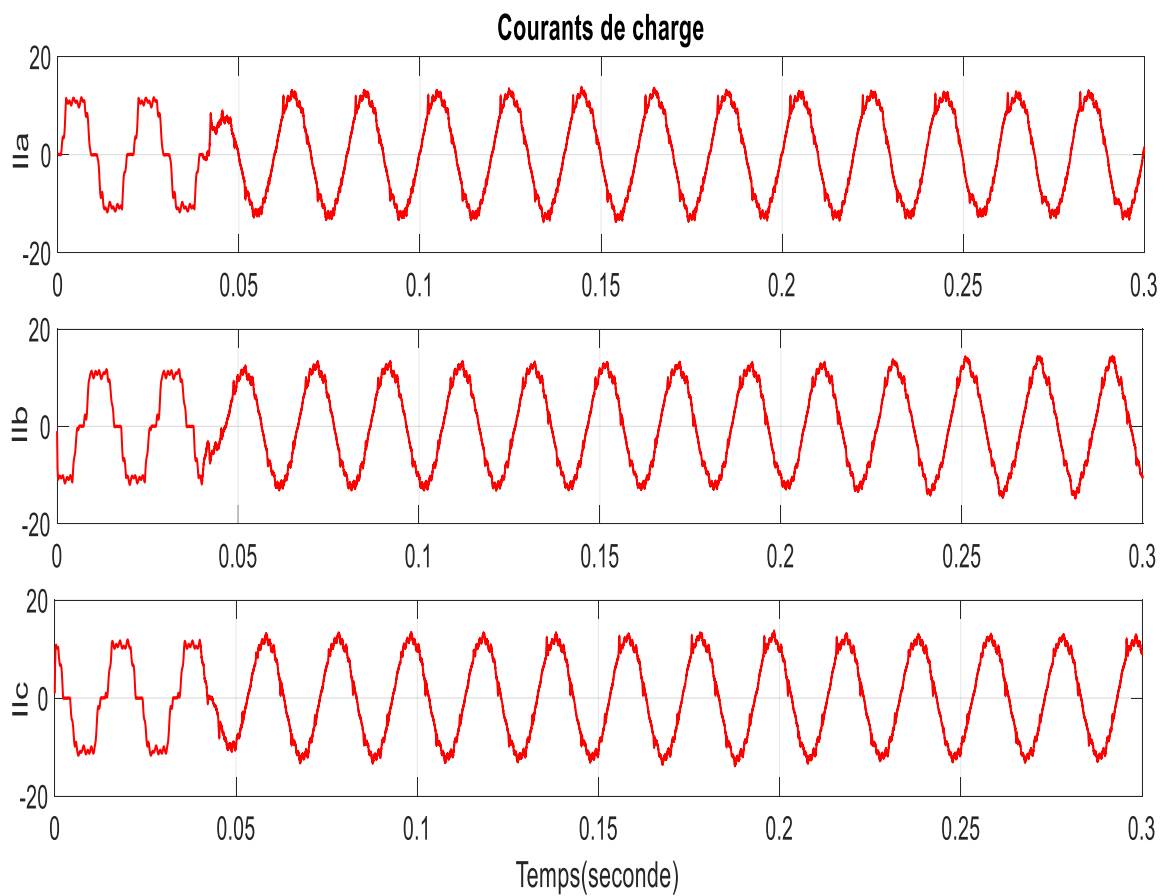
**Figure III. 9:** Courants de charge avec harmonique

La Figure.(III-9) représente les formes d'onde du courant de charge de la phase A ,b, c

## Chapitre III: Résultats de simulations

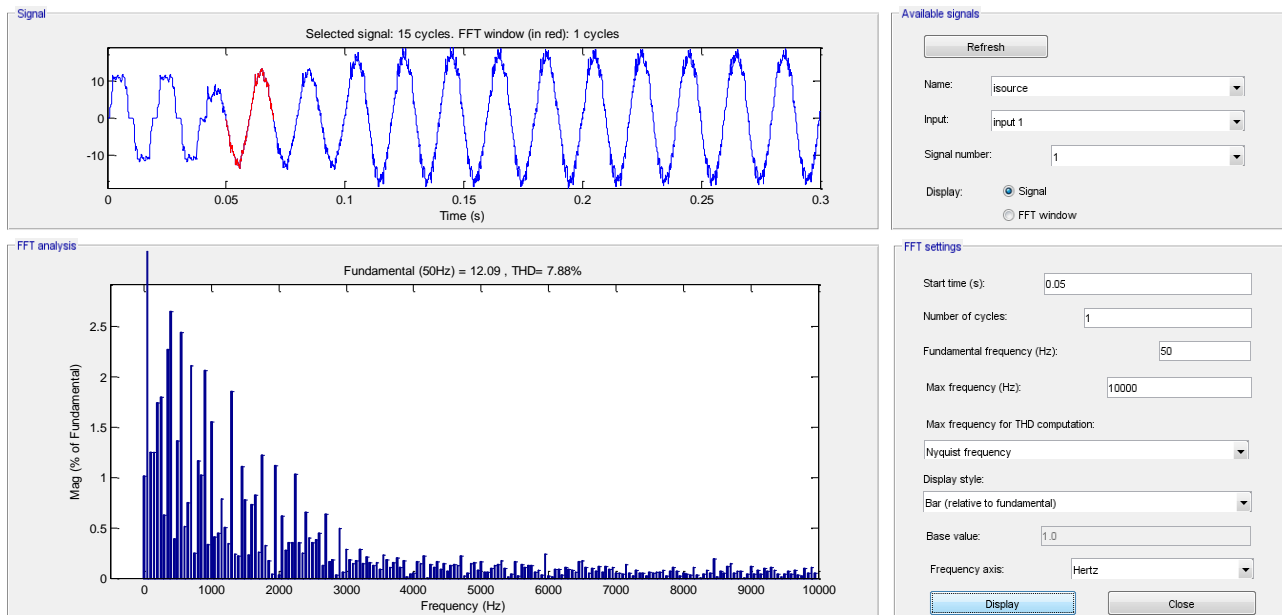


**Figure III. 10:** THD de courants de charges sans filtre



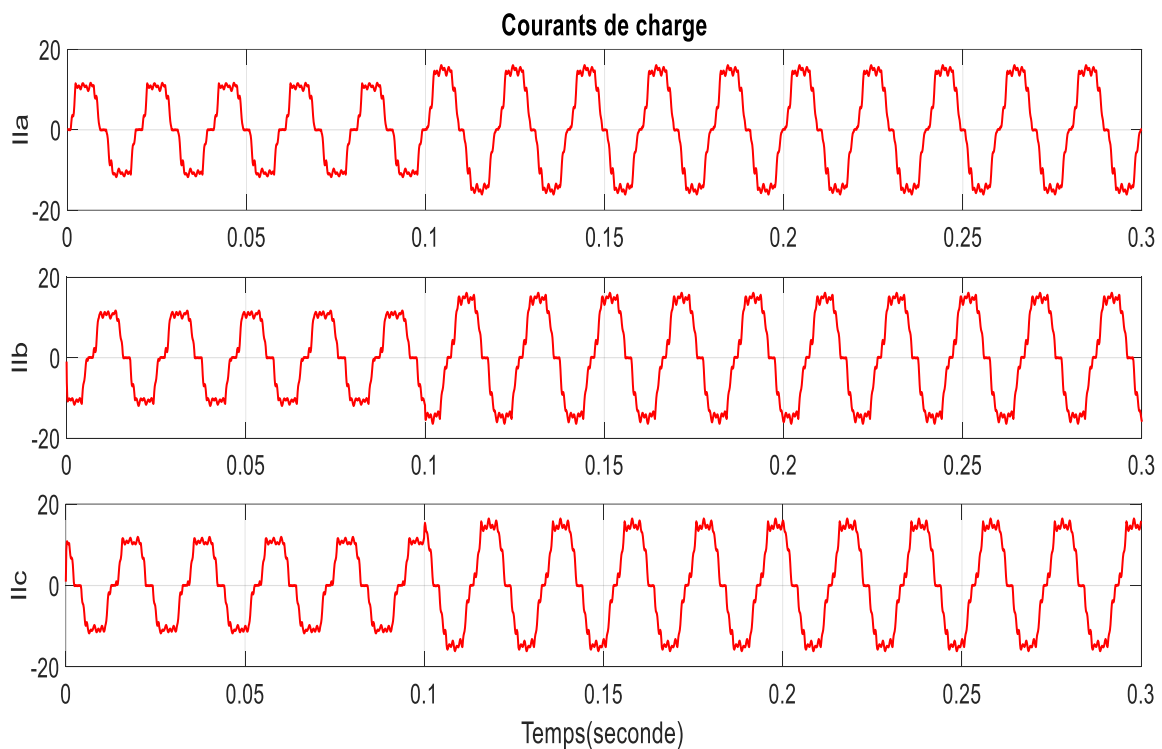
**Figure III. 11:** Courants de charge sans harmonique

## Chapitre III: Résultats de simulations



**Figure III. 12:** THD de courants de charge avec filtre

Le courant de charge est parfaitement sinusoïdal avec un taux de distorsion (THD) qui a passé de 19.48% dans la figure III.10 (avant compensation) à 7.88% dans la figure III.12 (après compensation).



**Figure III. 13:** Courants de deux charges avec harmonique

## Chapitre III: Résultats de simulations

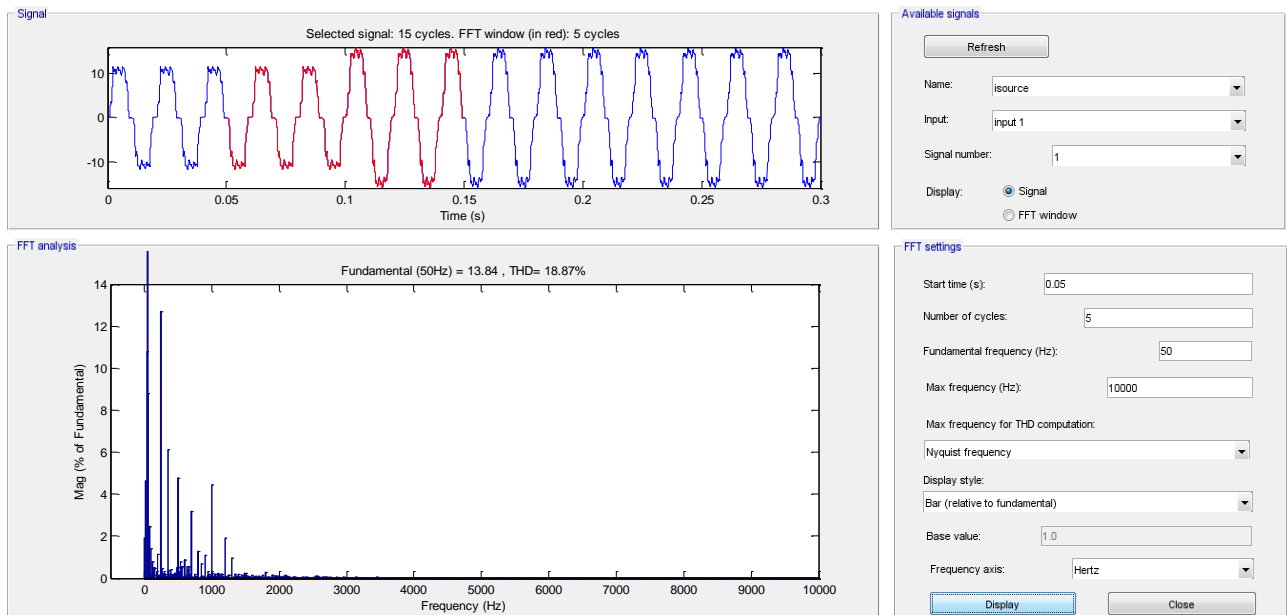


Figure III. 14: THD de courants de deux charges sans filtre

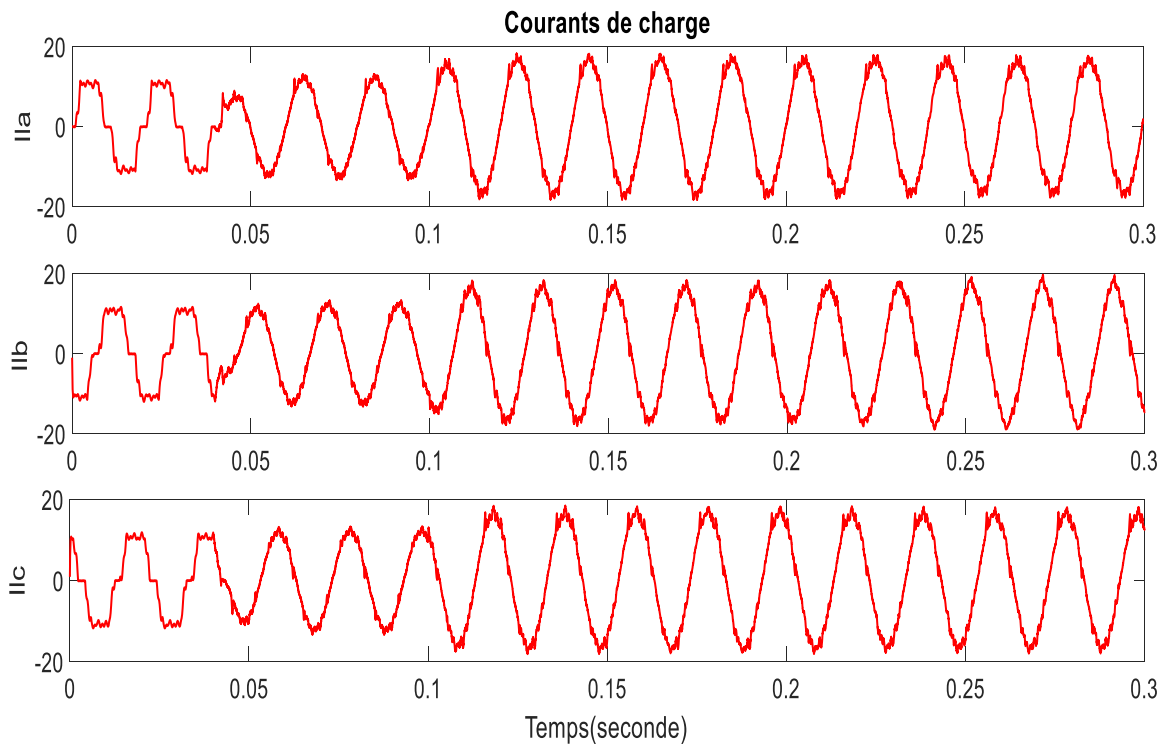


Figure III. 15: Courants de deux charges Sans harmonique

## Chapitre III: Résultats de simulations

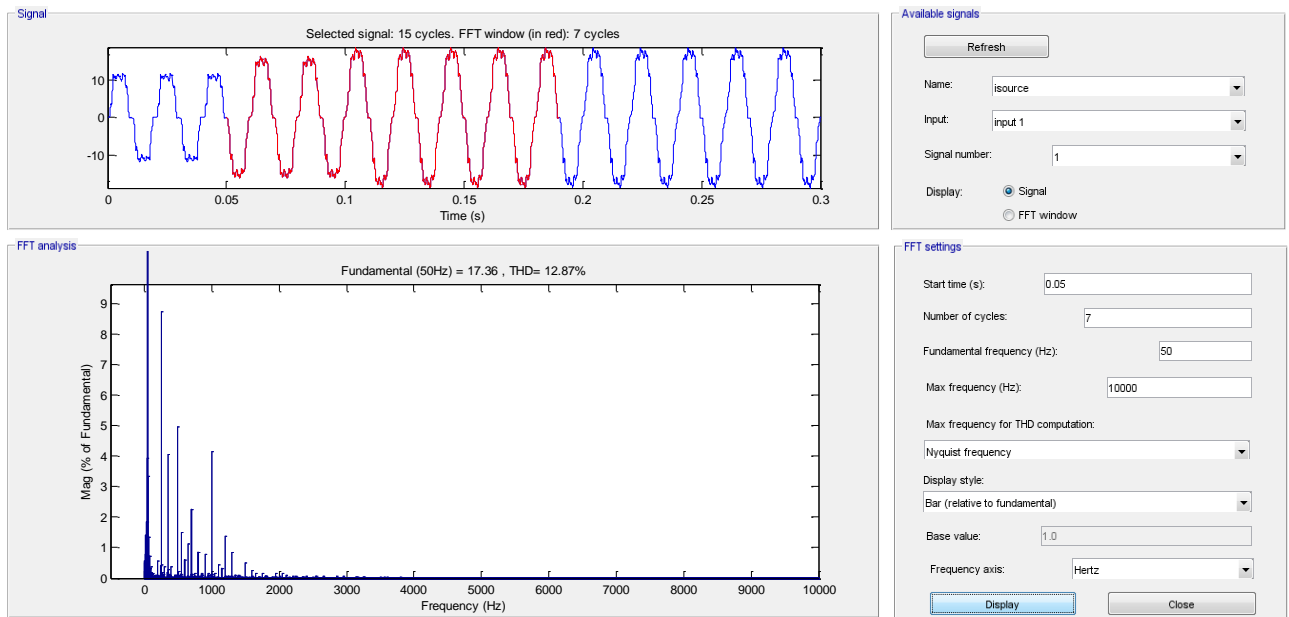


Figure III. 16: THD de courants de deux charges avec filtre

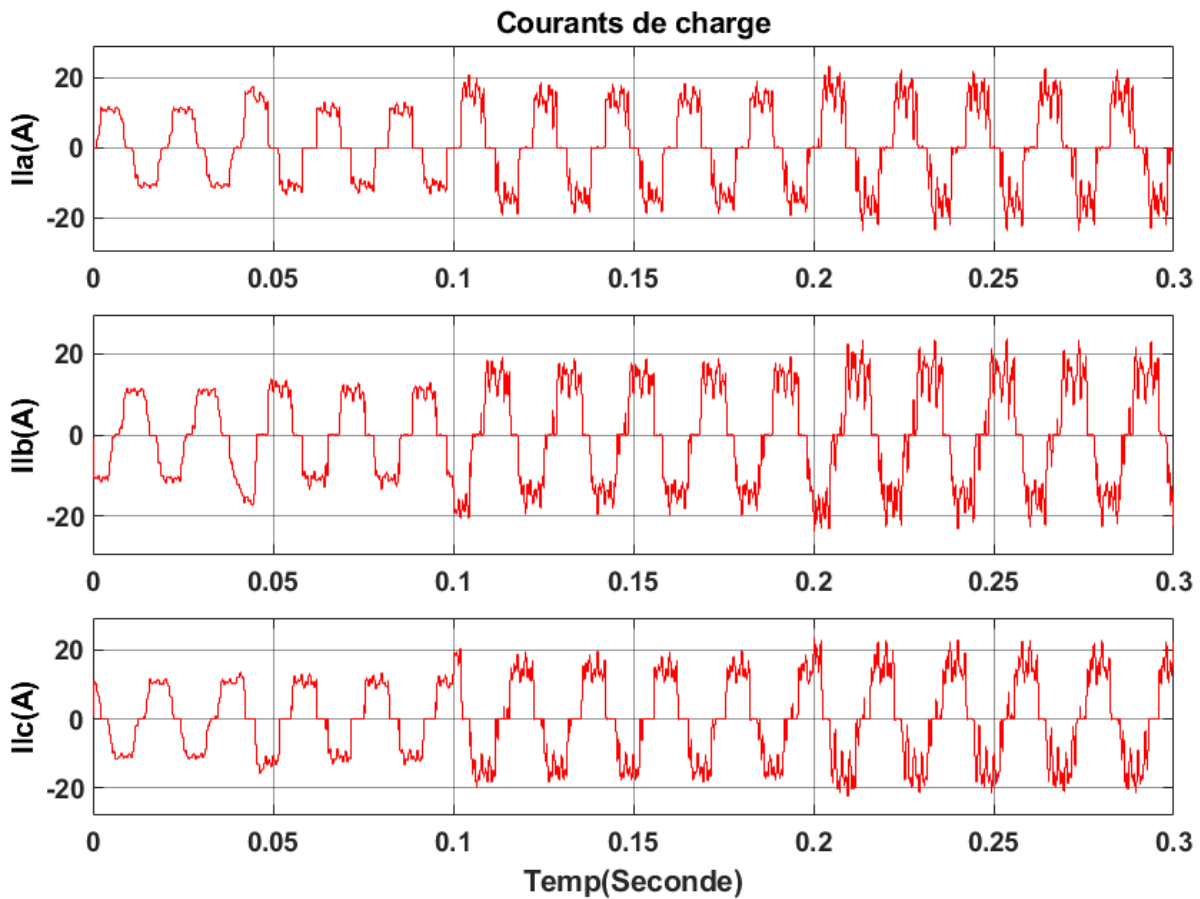


Figure III. 17: Courants trois de charges

## Chapitre III: Résultats de simulations

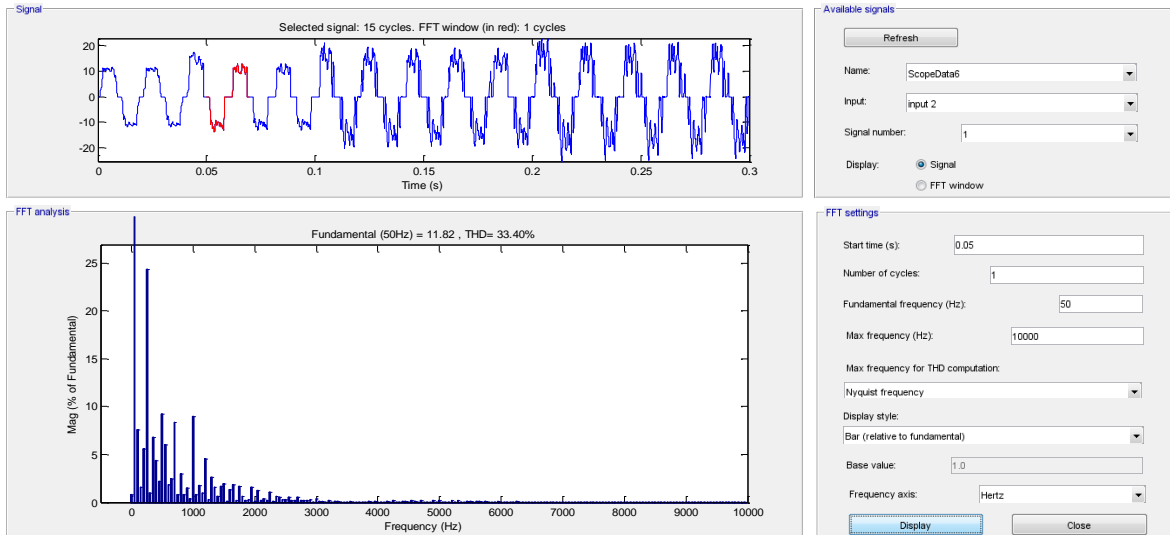


Figure III. 18: THD de courants de trois charges

Avant connecter le filtre, à partir de la figure (III.9), le courant de charge est totalement déformé avec un THD égale à 19.48% (voire la figure (III.10)), A  $t=0.04s$ , le filtre actif est connecté et commence à injecter les courants nécessaires pour rendre le courant de charge exempt d'harmoniques (Figure (III.15)). Le THD de courant de charge est réduit de 18.87% à 12,78 % (voire la figure (III.14 et III.16)).

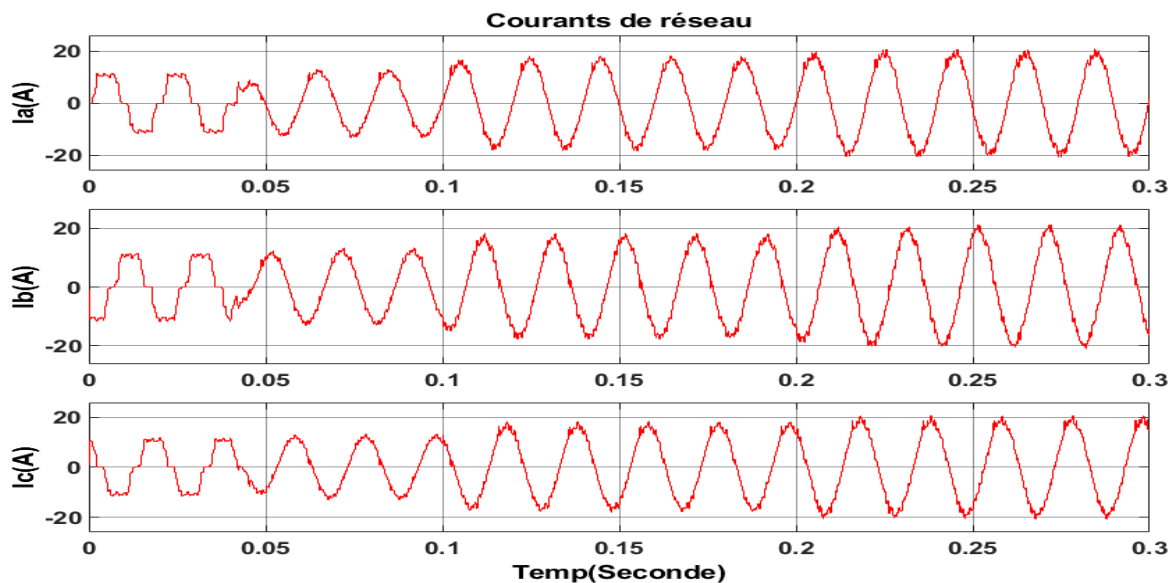
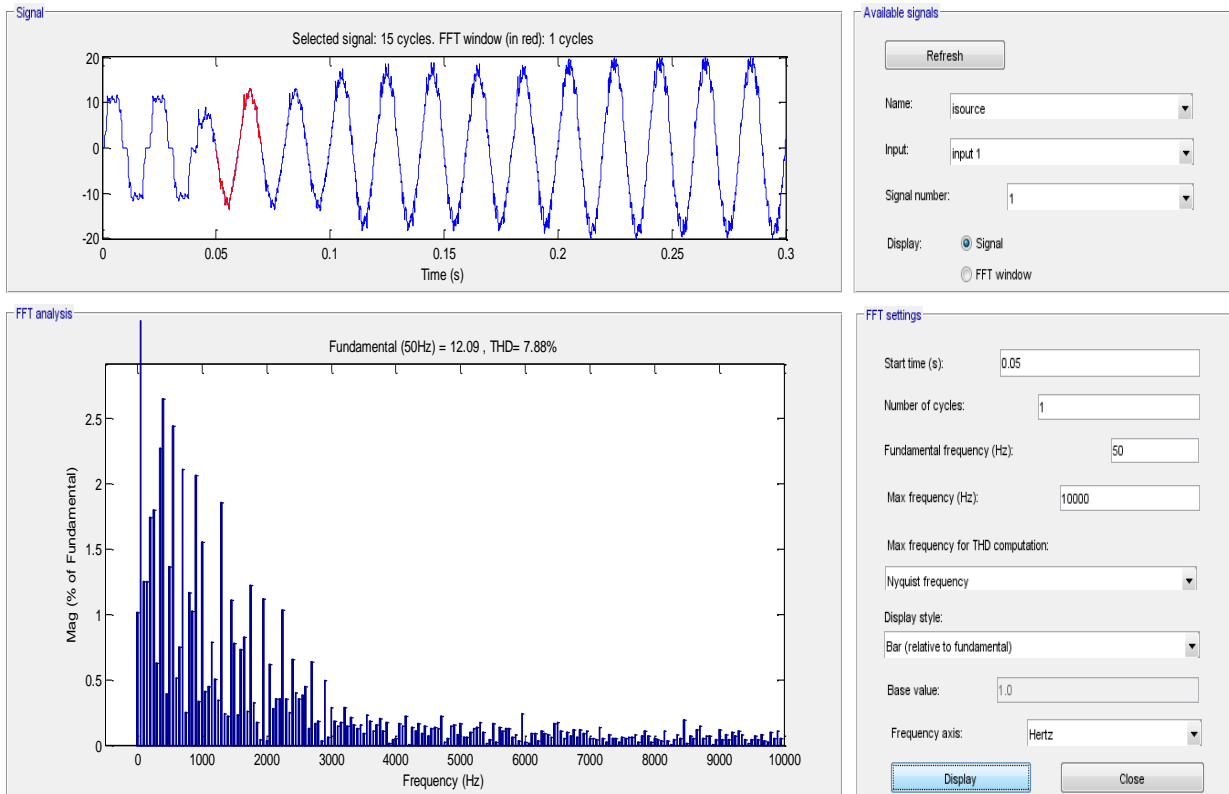


Figure III. 19: courants de réseau Sans harmonique

## Chapitre III: Résultats de simulations



**Figure III. 20:** THD de courants de réseau Sans harmonique

### III. 5 Interprétation des résultats:

#### Avant le filtrage :

Les figures (Figure III. 17 et la Figure III.18) montrent la forme d'onde du courant de charge ainsi que son spectre fréquentiel avant l'installation du FAP. Selon ces résultats, le courant du réseau n'est pas sinusoïdal car il contient de nombreuses harmoniques d'ordre impair qui ne sont pas des multiples de trois. Ces harmoniques sont générées par la charge non linéaire, avec un taux de distorsion de 33.40%. Cette observation est également valable pour le courant du réseau.

#### Après le filtrage :

Dans la figure Après la mise en service du FAP (connexion au système), il commence à injecter les courants de compensation, ce qui permet, après une période transitoire, aux courants du réseau de retrouver une forme quasi-sinusoïdale avec un THD qui diminue de 33.40% à 7.88%, et ils sont en phase avec leurs tensions correspondantes (voir figure III.20)

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons implémenté la commande par mode backstepping avec une composante intégrale sur un convertisseur DC-AC spécifiquement conçu pour le contrôle indirect du courant dans un filtre actif parallèle. Les résultats de nos simulations ont démontré l'efficacité de cette technique appliquée à ce modèle non linéaire. Le système de commande APF développé a montré une performance excellente en termes de réduction harmonique ainsi qu'une amélioration significative du taux de distorsion harmonique (THD). Le contrôleur par mode backstepping a réussi à compenser la plupart des harmoniques présentes dans le courant, confirmant ainsi son efficacité en termes de compensation.



Conclusion

Générale

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Ce mémoire a pour objectif de présenter une étude théorique sur l'application de la commande par backstepping à un filtre contrôlé par courant indirect, incluant une simulation pour réduction des harmoniques dans les réseaux électriques, souvent déséquilibrés et distordus, dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Le premier chapitre examine l'état actuel des convertisseurs DC/AC, en mettant l'accent sur les onduleurs. Il présente leur fonctionnement de base, les différentes classifications d'onduleurs ainsi que leurs principales utilisations. Les avantages et les inconvénients de chaque type d'onduleur sont mis en évidence. Ensuite, une attention particulière est portée sur l'onduleur de courant, en abordant les origines des harmoniques et les différentes méthodes de filtrage pour les atténuer.

Le deuxième chapitre repose sur l'étude de la commande par backstepping et fournit les détails nécessaires pour concevoir les algorithmes associés. On y modélise les systèmes du convertisseur DC/AC et on élabore la loi de commande correspondante. En appliquant cette méthode au convertisseur DC/AC intégré dans un filtre actif parallèle, des résultats prometteurs sont observés. La commande par backstepping, enrichie d'une composante intégrale, permet de compenser efficacement les harmoniques du courant, ce qui améliore les performances globales du système.

En conclusion, les résultats de la simulation réalisée sont encourageants, ce qui confirme l'efficacité de cette méthodologie. La diminution des harmoniques et la réduction du taux de distorsion harmonique (THD) contribuent à améliorer la qualité de l'énergie électrique en réduisant les perturbations et en assurant un fonctionnement plus stable du système.

Selon les résultats obtenus, nous avons conclu que la commande par backstepping est applicable aux systèmes non linéaires et robustes en raison de ses performances supérieures (moindres dépassements et excellente poursuite de la consigne de référence)

# bibliographie

## Bibliographie

---

- [1] H. Bellache, M, Saadaoui, "Étude et analyse des commandes d'un onduleur de tension triphasé", Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2021
- [2] A.Boukli, "Commande Non Linéaire par backstepping d'un Onduleur Triphasé." Mémoire de Master, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 2020
- [3] S.Lallam, "Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasés multi niveaux", Mémoire d'ingénieur d'état, Ecole militaire polytechnique, 2007
- [4] C.Cabal, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Université Toulouse III- Paul Sabatier, Toulouse, 2008
- [5] Guy Séguier, Francis Labrique, Philippe Delarue «Electronique de puissance, structures, commandes, applications », 10eme Edition, DUNOD, Paris, 2015
- [6] H.Elferd, M.Zegaar, "fonctionnement en mode d'egrade d'un onduleur multi niveaux application au filtre actif parallèle", Mémoire d'ingénieur d'état, Université Mohamed Boudiaf, M'Sila, 2017
- [7] M.Benaouicha, Y.Guerrou, "Réalisation d'un onduleur de tension commande par la carte Dspace 1104", Mémoire d'ingénieur, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2015
- [8] <https://www.everythingpe.com/community/what-is-a-current-source-inverter>,  
Consulté le : 19/01/2023
- [9] Y. Amara, F.Bensiahmed, "commande par mode de glissement d'une source photovoltaïque connectée au réseau à travers un onduleur triphasé", Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 2020
- [10] F.Berrezek, " Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone", Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2006
- [11] S. Larbi, M. Mouloudj, "Etude d'un onduleur hybride et réaliser Un basculement avec une carte Arduino", Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2018
- [12] G.Seguir, "Les formations de base et leurs principales application", 7eme édition Dunod, paris, 1999

## Bibliographie

---

- [13] <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/elements/onduleur>  
,consulté le : 23 octobre 2023
- [14] [https://www.researchgate.net/figure/Commande-donduleur-monophasé-en-pont-de-tension-et-la-forme-de-tension-V-a0\\_fig7\\_333323601](https://www.researchgate.net/figure/Commande-donduleur-monophasé-en-pont-de-tension-et-la-forme-de-tension-V-a0_fig7_333323601)
- [15] B.Ben Ahmed, F.Chelbi," Implémentation sur DSP F28335 des Stratégies de Commande d'un Convertisseur DC/AC", Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira,Bejaia, 2018
- [16] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, "Etat de l'art des aérogénérateurs", L'électronique de puissance, vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. Novelect-ecrin, pp. 97-154, 2002
- [17] <https://www.compufirst.com/compufirst-lab/serveur/le-guide-de-l-onduleur/main.do?appTreeId=42462>
- [18] <https://choisir-onduleur.info/inconvenients-onduleur/>
- [19] T.Gauroud," Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution d'énergie électrique", Thèse de doctorat, l'université de Nantes, janvier 1997
- [20] [https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Origine\\_des\\_harmoniques](https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Origine_des_harmoniques) , consulté le: 20 mai 2020
- [21] T.Deflandre, P.Mauras,"Les harmoniques sur les réseaux électrique", Direction des études et recherches d'EDF.EYROLLES, Paris, 1998.
- [22] [https://www.researchgate.net/figure/Raccordement-dun-filtre-passif\\_fig1\\_344798228](https://www.researchgate.net/figure/Raccordement-dun-filtre-passif_fig1_344798228)
- [23] S. Rechka," étude de méthode de filtrages des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution ", Mémoire présenté à l'Université de Québec à Trois-Rivières, 2002
- [24] L. Zellouma,"filtrage actif parallèle des harmoniques du courant génères par un pont redresseur triphasé non commandé ", Mémoire de magister, Université Annaba, 2006
- [25] M. Meftah,"Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales", Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, Mai 2008
- [26] M. Kouadria,"Techniques de commande avancées d'un filtre actif parallèle pour améliorer la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride", Thèse de Doctorat, Université Ibn

## Bibliographie

---

khaldoun, Tiaret, 2017

[27] I.Ghadbane "Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs", Mémoire Magister, Université Mohamed Kheider, Biskra ,2011

[28] H. Shixi, F. Juntao , "Adaptive fuzzy backstepping control of three-phase active power filter", Control Engineering Practice College of IOT Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China,2015

[29] A.S. Morse I. Kanellakopoulos, P.V. Kokotovic, " Adaptive feedback linearization of Nonlinear systems", Edition In: Foundations of Adaptive Control. pp. 311-346, Springer Verlag. Berlin, 1991

[30] H.Boudjemai, L.Ayadi.Loucif, "Etude comparative d'une commande équivalente par les modes glissants et d'une commande non linéaire par la théorie de Lyapunov d'une MSAP", Master en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2013

[31] A.Isidori, "Nonlinear control system", Springer, 1995

[32] J. Tisinias, "sufficient lyapunov-like conditions for stabilization ", Math .Control. Si gnal. 2000

[33] B, Moussi, " Modélisation et commande latérale d'un véhicule électrique ", PFE ingénieur d'état, départ. D'automatique .USTOran. Mohamed Boudiaf, 2010

[34] A.Morse, I. Kanellakopoulos, P.Kokotovic, " Systematic design of adaptive Controllers for feedback linearizable systems", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 36(11) : pp. 12411253, 1991.ontrol, vol. 36(11) : pp. 12411253, 1991.

[35] C.Labchaki, C.Aoun, " Backstepping control strategy for a class of non-linear dynamic systems", Memoire de Master, Université Larbi Tebessi, Tebessa, 2020

[36] S.Belegueliel, M.Smaili, "Commande par Backstepping d'un Moteur à Commutation Electronique", Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'SILA,2020

[37] J.Pflimlin, " Commande d'un mini drone à hélice carénée : De la stabilisation dans Le vent à la navigation autonome", Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Université de Toulouse, 2006

## Bibliographie

---

[38] Krstic, M., Kanellakopoulos, I., & Kokotovic, P. V, "*Nonlinear and Adaptive Control Design*", Wiley-Interscience, 1995