

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 :

LAOUIR OUSSAMA

Et

BELKHIR SALIM

## Thème

---

### Commande d'un convertisseur DC/AC par mode glissant

---

Soutenu le :03/07/2023

Devant le Jury composé de :

Mme : Madi Saida	M.C.B	Univ. Bouira	Président
Mr : Saoudi Kamel	Prof	Univ. Bouira	Rapporteur
Mme : Smail Houria	M.C.B	Univ. Bouira	Examineur



## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيدة(ة) بالحير سليم.....الصفة: طالب، استاذ، باحث.....

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 40873054.....والصادرة بتاريخ 02/02/2023

المسجل(ة) بكلية: العلوم و العلوم التطبيقية..... قسم: الهندسة  
الكهربائية.....

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Commande d'un convertisseur DC/AC par  
mode glissant.....

تحت إشراف الأستاذ(ة): كمال سحودي.....

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية  
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 08/07/2023.....

توقيع المعني(ة)

### رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

%

g

النسبة: itin:

الامضاء:



## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيدة(ة)..... لحرير أيساجمة.....الصفة: طالب، استاذ، باحث.....

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 11. 4. 6. 2. 7. 3. 11. والصادرة بتاريخ 2023/02/08

المسجل(ة) بكلية: العلوم و العلوم التطبيقية..... قسم: الهندسة  
الكهربائية.....

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Commande d'un convertisseur Dc/Ac par  
mode glissant

تحت إشراف الأستاذ(ة):.....

أصح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية  
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

توقيع المعني(ة)

التاريخ: 08/07/2023

### رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

%

9

النسبة: itin

الامضاء:

## *Dédicaces*

*C'est avec honneur que je dédie ce Simple travail à plusieurs personnes qui ont joué un rôle essentiel dans mon parcours :*

*Tout d'abord, à mes chers parents, mon père et ma mère, dont la patience, l'amour, le soutien et les encouragements ont été inestimables.*

*Je souhaite également dédier ce travail à mes très chers frères, ma sœur et à toute ma famille, qu'elle soit vaste ou restreinte. Leur présence a été une source constante de motivation et de soutien.*

*Un remerciement spécial à mon binôme, Oussama, ainsi qu'à tous mes amis.*

*BELKHIR SALIM*

## *Dédicaces*

*Je souhaite dédier humblement ce travail à mes chers  
parents qui m'ont apporté un soutien et des  
encouragements inestimables tout au long de leur vie  
jusqu'à ce jour.*

*Je tiens également à adresser mes dédicaces à mes très chers  
frères et ma sœur, ainsi qu'à toute ma famille, qu'elle soit  
élargie ou restreinte.*

*Ainsi qu'en particulier mon collègue Salim, qui ont partagé  
avec moi ce parcours.*

*À tous mes amis sans exception.*

*LAOUIROUSSAMA*

# Remerciement

Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences et sciences appliquées de l'Université de Bouira.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers le Professeur SAOUDI Kamel, qui a été le Directeur de ce mémoire. En lui accordant une reconnaissance particulière pour son attention soutenue et le temps précieux qu'il a consacré à notre travail Sans ses conseils avisés, ses encouragements et son implication, nous n'aurions pas pu mener à bien ce travail.

Je tiens également à remercier chaleureusement tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude envers tous ceux qui ont apporté leur contribution à la réalisation de ce travail.

## Résumé

Ce mémoire présente un type de convertisseur DC-AC et se concentre sur le développement d'une commande par mode glissant pour ce convertisseur. Dans un premier temps, nous avons réalisé la modélisation d'un filtre actif parallèle en utilisant la technique de contrôle du courant indirect. Ensuite, nous avons appliqué cette commande aux convertisseurs DC/AC. La simulation a été effectuée à l'aide de l'outil logiciel de conception assistée par package Matlab/Simulink, et les résultats obtenus ont été affichés et analysés.

## Mots clés :

Convertisseurs DC-AC- Mode glissant-Filtre actif parallèle.

## Abstract

This dissertation presents one type of DC-AC converters and focuses on the development of a sliding mode control for this converter. Initially, we conducted the modeling of a parallel active filter using the indirect current control technique. Then, we applied this control to the DC/AC converters. The simulation was performed using the Matlab/Simulink package aided design software tool, and the obtained results were displayed and analyzed.

**Key words:** DC-AC converters- Sliding mode- parallel active filter.

## المخلص

يقدم هذا البحث نوعاً من أنواع مختلفة من محولات التيار المستمر-التيار المتناوب ويركز على تطوير التحكم بواسطة وضع الانزلاق لهذا المحول. في البداية، قمنا بنمذجة مرشح نشط متوازي باستخدام تقنية التحكم في التيار غير المباشر. ثم، قمنا بتطبيق هذا التحكم على محول التيار المستمر/التيار المتناوب. تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج تصميم مساعد على عرض وتحليل النتائج باستخدام حزمة Matlab/Simulink

**الكلمات المفتاحية:** محولات التيار المستمر-التيار المتناوب - وضع الانزلاق- مرشح نشط متوازي.

# Sommaire

---

## Table des matières

Dédicaces

Remerciements.....	I
Résumé :.....	II
Sommaire.....	III
Liste de figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VII
Liste des acronymes.....	VIII
Introduction Générale .....	1

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

I.1	Introduction .....	3
I.2	Description de l'onduleur .....	3
I.3	Classification des onduleurs .....	3
I.3.1	Onduleur assisté (non autonome) .....	4
I.3.2	Onduleur autonome .....	4
I.3.3	Onduleurs hybrides.....	4
I.4	Application des onduleurs .....	4
I.5	Onduleur de courant .....	5
I.6	Onduleur de tension.....	5
I.7	Onduleur à résonance .....	5
I.8	Types de l'onduleur .....	5
I.8.1	Onduleur monophasé.....	6
I.8.1.1	Onduleur à demi-pont :.....	6
I.8.1.2	Onduleur à pont complet .....	6
I.8.2	Onduleur triphasé : .....	7
I.9	Avantages et Inconvénients de l'onduleur.....	7
I.9.1	Avantage des onduleurs :.....	7
I.9.2	Inconvénients des onduleurs : .....	8
I.10	Origine des harmoniques .....	8
I.11	Filtrage d'harmonique .....	8
I.11.1	Filtre passif .....	9
I.11.1.1	Filtre à inductance anti-harmonique .....	9
I.11.1.2	Filtre passif résonant.....	9
I.11.1.3	Filtre passif amorti.....	10
I.11.2	Filtre Actif .....	10



## Sommaire

---

I.11.2.1	Filtre actif série (FAS).....	10
I.11.2.2	Filtre actif parallèle.....	11
I.11.2.3	Filtre combiné parallèle-série .....	12
I.12	Modélisation d'un filtre actif parallèle .....	12
I.13	Conclusion .....	14
<b>Chapitre II: Commande par mode glissant des convertisseurs DC/AC</b>		
II.1	Introduction .....	15
II.2	Historique de la commande par mode glissant .....	15
II.3	Principe de la commande par mode glissant .....	15
II.4	Système à structure variable .....	15
II.4.1	Mode de convergence (MC).....	16
II.4.2	Mode de glissement (MG).....	16
II.4.3	Mode du régime permanent (MRP).....	16
II.5	Principe du réglage par mode glissant.....	17
II.6	Conception de la commande par mode glissant .....	17
II.6.1	Choix de la surface de glissement .....	18
II.6.1.1	Approche directe (fonction de commutation) :.....	19
II.6.1.2	Fonction de Lyapunov .....	19
II.7	Détermination de la loi de commande:.....	19
II.8	Phénomène de broutement (chattering) dans le mode glissant : .....	20
II.9	Commande équivalente .....	22
II.10	Commande discontinue .....	23
II.11	Régimes de mode glissant : .....	24
II.11.1	Régime glissant idéal :.....	24
II.11.2	Régime glissant réel : .....	24
II.12	Domaine d'application du réglage par mode glissant .....	25
II.13	Application de la commande par Mode glissant sur le système :.....	25
II.14	Conclusion .....	28
<b>Chapitre III: Résultats des simulations et discussions</b>		
III.1	Introduction .....	29
III.2	Description de système :.....	29
III.3	Composants et Paramètres de simulation .....	30
III.4	Analyse de Simulation.....	30
III.5	Conclusion .....	40
Conclusion générale.....		40

## Sommaire

---

Référence bibliographie.....	41
------------------------------	----

## Liste des figures

---

Figure I. 1: Onduleur monophasé en demi-point. ....	6
Figure I. 2: Onduleur monophasé en pont complet.....	6
Figure I. 3: Onduleur triphasé .....	7
Figure I. 4: Raccordement d'un filtre passif .....	9
Figure I. 5: Structure d'un Filtre Actif Série (FAS).....	11
Figure I. 6: Structure d'un Filtre Actif Parallèle (FAP) .....	12
Figure I. 7: schéma de bloc d'un filtre actif parallèle .....	12
Figure II. 1: Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.....	17
Figure II. 2: Phénomène de réticence .....	21
Figure II. 3: Approximation de la Signe par une fonction de saturation à rampe élevée.....	21
Figure II. 4: Commande équivalente.....	23
Figure II. 5: Mode glissant réel .....	25
Figure II. 6: Schéma du surface de Mode Glissant .....	28
Figure III. 1: Schéma de bloc de filtre actif parallèle .....	29
Figure III. 2: Tension de source sans harmonique .....	31
Figure III. 3: Tension de la source .....	31
Figure III. 4: THD de la source de tension.....	32
Figure III. 5: Signal de synchronisation .....	33
Figure III. 6: THD de Signal de synchronisation .....	33
Figure III. 7: Tension sur le point de connexion FAP.....	34
Figure III. 8: Courant de charge, $I_{sp}$ , Courant de référence.....	35
Figure III. 9: Tension $V_{dc}$ .....	35
Figure III. 10: Courant de source, Courant de filtre, l'erreur $e_a$ .....	36
Figure III. 11: THD de la charge.....	37
Figure III. 12: THD sur le point de connexion avant la compensation .....	38
Figure III. 13: THD sur le point de connexion avec mode glissant .....	38
Figure III. 14: THD de courant de source avec hystérésis .....	39
Figure III. 15: THD de courant de source avec mode glissant.....	39

---

## Liste des tableaux

---

Tableau III-1 : Les paramètres de simulations ..... 30

## Liste des Acronymes

<i>AC-DC</i>	Convertisseur alternatif/continu
APF	filtre actif parallèle
IGBT	Insolated Gate Bipolar Transistor
PI	Régulateur Proportionnel Intégral
<i>SMC</i>	Sliding Mode Control (commande en mode glissant)
THD	Taux de Distorsion Harmonique.
<i>ref</i>	référence

## Liste des Symboles

$C_k$	Fonction de commutation
$C(F)$	Capacité
$I(A)$	Courant
$I_L(H)$	Courant d'inductance
$I_C(A)$	Courant de capacité
$k, k_i$	Coefficients de glissement
$L_C(H)$	L'inductance de respectivement l'APF
$L_f(H)$	La dérivée de la fonction $f$
$L_s(H)$	La dérivée de la fonction $g$
$R_C(\Omega)$	Résistance de respectivement l'APF
$S(x, t)$ :	Surface de glissement
$Sign(x)$	Fonction signe
$Sat(x)$	Fonction de saturation
$U(V)$	Tension
$U(x, t)$	Loi de commande

## Liste des Acronymes et Symboles

---

$U_{eq}$	Grandeur de commande équivalente
$U_c$	La commande attractive
$V(x)$	Fonction de Lyapunov
$\dot{V}(x)$	Dérivée de la fonction de Lyapunov
$V_{dc}(V)$	Tension continue
$V_{MN}(V)$	La tension entre les points M et N.
$d_{nk}$	La fonction d'état de commutation
$e$	L'écart entre la variable à réguler et sa référence.
$g(x)$ :	Le vecteur de commande
$r$	Le degré relatif, égal au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaitre la commande.
$\lambda$	Une constante positive.

# **Introduction Générale**

## Introduction générale

L'électrotechnique est un domaine en constante évolution qui englobe le traitement et la régulation de l'énergie électrique afin d'Approvisionner des tensions et des courants adaptés aux diverses charges en fonction des besoins spécifiques.

Les premiers convertisseurs ont été créés en reliant mécaniquement des machines électriques, mais grâce aux avancées dans Constituants de puissance au 20ème siècle, il a été possible de concevoir des convertisseurs de puissance électrique sans nécessiter de machines tournantes, en utilisant des semi-conducteurs. Différents types de conversions sont distingués, tels que l'alternatif vers le continu, le continu vers l'alternatif, l'alternatif vers l'alternatif, le continu vers le continu, et l'alternatif vers le continu puis à nouveau vers l'alternatif. [1]

Les systèmes de mécanique, génie électrique ou électronique ont d'abord été abordés en supposant la linéarité, ce qui a permis le développement de théories qui ont conduit à des avancées significatives dans les branches d'asservissement et de régulation. Cependant, les ingénieurs et les universitaires ont rapidement réalisé que cette approche était inadéquate pour étudier le comportement de nombreux systèmes réels. À partir des années cinquante, de nombreuses études et recherches ont été entreprises dans les branches des systèmes non linéaires. Dans cette tâche, l'attention est centrée sur la conversion continu/alternatif (DC/AC), le but de ce travail est basé sur la réduction de la technique employée dans la commande des convertisseurs triphasés.

Le présent mémoire a pour but d'étudier et d'appliquer la commande d'un système non linéaire en utilisant directement le modèle non linéaire. La méthode de commande utilisée est celle du mode glissant.

Nous avons opté pour l'utilisation de la technique du mode glissant, reconnue pour sa grande robustesse en termes de stabilité et de performances, en raison de sa facilité de mise en œuvre, le mode glissant a été fréquemment adopté pour le contrôle d'une vaste gamme de systèmes non linéaires. Cette approche implique la définition d'une surface de glissement qui est basée sur les états du système de manière qu'elle soit attractive.[2]

Notre mémoire est structuré en trois chapitres majeurs, où nous abordons les sujets suivants :



Au premier chapitre, Nous nous concentrons sur la présentation générale et le principe fondamental. De fonctionnement des onduleurs et leur modélisation ainsi les différentes méthodes de filtrage d'harmonique.

Le deuxième chapitre consiste à étudier la commande en mode glissant des convertisseurs (DC/AC).

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

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

## **I.1 Introduction**

Les avancées technologiques récentes dans le domaine de l'électronique de puissance ont ouvert de nouvelles perspectives pour l'utilisation croissante des convertisseurs statiques.

Parmi ces nouvelles utilisations, on trouve des domaines exigeants en termes de performances dynamiques, comme le filtrage actif et la dépollution des réseaux électriques.

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs utilisés pour ajuster et convertir la source d'énergie électrique afin de l'adapter à un récepteur spécifique. Les premiers convertisseurs de puissance électrique utilisaient des machines électriques couplées mécaniquement. Cependant, l'avènement des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, tels que les diodes, les transistors et les thyristors, a conduit au développement de systèmes de conversion de plus en plus sophistiqués. Ainsi, les convertisseurs statiques modernes sont capables de remplir cette fonction sans recourir à des machines en rotation, marquant ainsi l'avènement de l'ère des convertisseurs statiques [3].

Les composants de puissance, accompagnés des dispositifs auxiliaires adéquats tels que les commandes de gâchettes, les dissipateurs thermiques et les circuits de protection RC, sont regroupés en modules standard qui permettent la conversion de puissance. Parmi ces modules, on retrouve des redresseurs, des onduleurs, des cyclo-convertisseurs, et bien d'autres encore.

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques parmi ces convertisseurs (DC/AC) connus sous le nom d'onduleur.

## **I.2 Description de l'onduleur**

Un onduleur est un appareil électronique utilisé pour transformer l'énergie électrique d'une forme continue (DC) en une forme alternative (AC). Cette transformation est effectuée à l'aide d'un dispositif de commande semi-conducteur. En utilisant la commande adaptée, l'onduleur a la capacité de produire une tension alternative réglable en termes de fréquence et de valeur efficace, laquelle est ensuite appliquée aux bornes du récepteur [3].

## **I.3 Classification des onduleurs**

Il y'a plusieurs schémas d'onduleurs, chaque schéma étant adapté à une application spécifique ou permettant d'atteindre des performances particulières. Les onduleurs sont

généralement regroupés en différentes catégories en fonction des modes de commutation utilisés par leurs interrupteurs.

### **I.3.1 Onduleur assisté (non autonome)**

Il s'agit de la conversion d'une tension ou d'un courant continu en une forme alternative, en utilisant une source de commutation pour aider à la conversion. Cependant, il ne peut pas fonctionner seul et doit être connecté au réseau électrique [4].

### **I.3.2 Onduleur autonome**

Le dispositif en question produit une tension dont la fréquence peut être soit fixe, soit ajustable grâce à un circuit de commande. Il ne requiert pas de connexion à un réseau électrique pour son fonctionnement [4].

### **I.3.3 Onduleurs hybrides**

Les onduleurs hybrides (intelligents) représentent une avancée dans la génération d'onduleurs conçus spécifiquement pour les applications d'énergie renouvelable, notamment l'autoconsommation des panneaux photovoltaïques. Étant donné que l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est limitée à la période diurne et présente des fluctuations, elle ne correspond pas toujours aux besoins de consommation énergétique des habitations, ce qui peut engendrer des problèmes [5].

## **I.4 Application des onduleurs**

Les onduleurs sont parmi les montages les plus couramment utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance, et ils offrent de nombreuses applications :

- Fournir des alimentations de secours.
- Assurer des alimentations sans interruption.
- Connecter des panneaux solaires au réseau électrique.
- Alimenter divers dispositifs nécessitant un fonctionnement à une fréquence spécifique.
- Fournir de l'énergie à des générateurs d'ultrasons ou d'électricité qui sont utilisés dans le secteur médical.
- Fournir de l'énergie aux lampes à cathode froide utilisées pour rétro-éclairer les écrans à cristaux liquides.
- Réguler la vitesse des machines à courant alternatif en utilisant des variateurs de fréquence : tout d'abord, la tension du réseau est redressée, puis un onduleur génère une tension modulable en fréquence et en forme.

**I.5 Onduleur de courant**

Un onduleur de courant est un type d'onduleur DC-AC qui convertit le courant d'entrée DC en courant AC à une fréquence donnée. La fréquence du courant alternatif de sortie dépend de la fréquence des dispositifs de commutation tels que les thyristors, les transistors, etc. Il est également appelé onduleur alimenté en courant et le courant d'entrée de cet onduleur reste constant. Les onduleurs à source de courant sont idéaux pour diverses applications telles que les entraînements de contrôle de vitesse pour les moteurs à courant alternatif, le démarrage de moteurs synchrones, les générateurs de plasma.

Un onduleur à source de courant se compose d'une source de courant continu (qui peut être une batterie connectée à une inductance ou à d'autres dispositifs de commutation tels que des thyristors, des IGBT, des MOSFET, etc.), des filtres et une charge AC. Il est disponible en configuration monophasée et triphasée [6].

**I.6 Onduleur de tension**

Un onduleur de tension est un dispositif qui permet de convertir une source d'alimentation à tension continue ( $U$ ) en une sortie de tension alternative (AC). Cette conversion est réalisée par un circuit électronique qui est capable de réguler la tension de sortie, en dépit des fluctuations de courant ( $i$ ) induites par la charge connectée à l'onduleur. La source d'alimentation continue fournit la tension à l'entrée de cet onduleur, qui est ensuite convertie en une tension alternative régulée à la sortie [7].

**I.7 Onduleur à résonance**

Les onduleurs offrent la possibilité de réguler à la fois la tension et la fréquence du courant. Dans le cas où la charge est composée d'un circuit amorti, les interrupteurs peuvent être contrôlés à une fréquence à proximité de la fréquence de résonance de la charge. Lorsque la charge varie. En conséquence, la fréquence de la commande fluctue, ce qui implique que la fréquence de l'onduleur est conditionnée par la charge et n'est donc pas indépendante. Il existe deux modèles de résonance clairement identifiés [3].

**I.8 Types des onduleurs**

Les onduleurs peuvent être classés en deux catégories principales en fonction du nombre de phases de courant alternatif qu'ils génèrent : les onduleurs monophasés et les onduleurs triphasés.

### I.8.1 Onduleur monophasé

Il y'a deux types d'onduleurs monophasés : l'onduleur en pont complet et l'onduleur en Demi-point.

#### I.8.1.1 Onduleur à demi-point

L'onduleur à demi-point est un composant essentiel de l'onduleur à pont complet. Il est constitué de deux interrupteurs et de deux condensateurs dont les tensions de sortie sont égales à  $V_{dc}/2$ . Les interrupteurs sont complémentaires, ce qui signifie que lorsqu'un interrupteur est activé, l'autre est désactivé [6] [8].

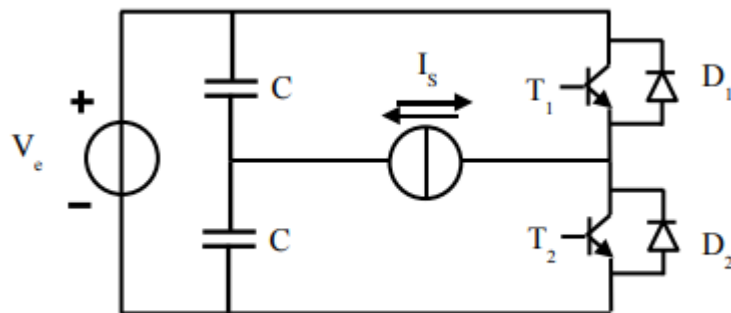


Figure I. 1: Onduleur monophasé en demi-point.

#### I.8.1.2 Onduleur à pont complet

Ce convertisseur d'onduleur transforme le courant continu en courant alternatif en alternant la fermeture et l'ouverture des interrupteurs selon une séquence bien définie. En fonction des interrupteurs fermés, il propose quatre modes de fonctionnement différents [6] [8].

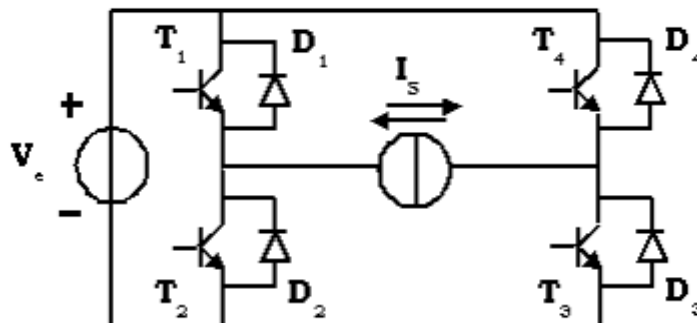


Figure I. 2: Onduleur monophasé en pont complet

### I.8.2 Onduleur triphasé

L'onduleur triphasé est un dispositif qui transforme une entrée DC en une sortie AC triphasée. Pour générer une alimentation alternative triphasée. Un onduleur de tension triphasé est composé de trois bras de commutation. Chaque branche est constituée de deux cellules qui comprennent chacune une diode et un transistor, et la sortie est prise au point médian de la branche. Ses trois bras sont retardés de  $120^\circ$ . Le taux de commutation de l'onduleur est de 50% pour chacun des bras, et la commutation se produit ultérieurement chaque intervalle de  $T/6$  du temps  $T$ , correspondant à un angle de  $60^\circ$ . Les commutateurs  $K_{11}$  et  $K_{22}$ ,  $K_{12}$  et  $K_{31}$ , et  $K_{21}$  et  $K_{32}$  sont complémentaires. On considère que tous ces éléments agissent comme des interrupteurs idéaux [7] [9].

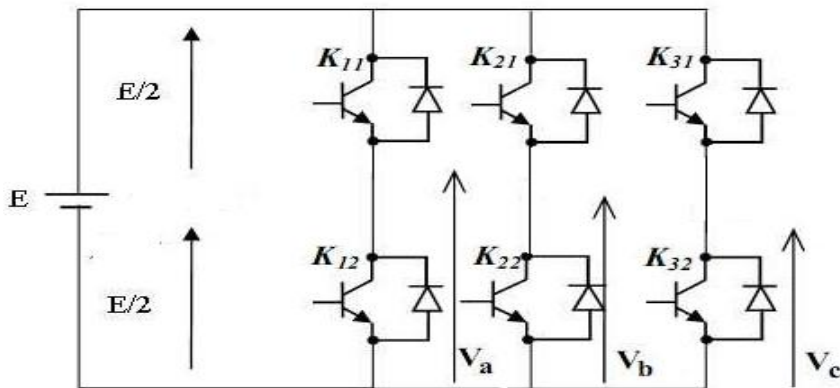


Figure I. 3: Onduleur triphasé

## I.9 Avantages et Inconvénients de l'onduleur

### I.9.1 Avantage des onduleurs

Le principal avantage de l'onduleur est de protéger des installations électriques contre les coupures brusques ou intempestives du courant. Ces coupures peuvent endommager ces installations, faire laisser inachevé un travail qu'on a commencé où faire perdre des données ou des textes en cours de traitement [10].

- Dépannage facile
- Coût le plus bas possible
- Plus faible probabilité d'incident de câblage
- Entretien relativement facile
- Excellentes performances sans ombrage.

- Le montage de l'onduleur centralisé est vraiment simple.
- La possibilité d'augmenter la productivité globale de l'installation grâce à l'ajout de strings.
- La compatibilité avec les batteries de nombreuses marques

### **I.9.2 Inconvénients des onduleurs**

- Difficile pour l'expansion du système.
- En cas de détérioration du câblage, la sécurité de l'édifice peut être compromise avec un risque d'incendie.
- En cas de problème sur panneaux, la perte de production est probable.
- Le dimensionnement de l'onduleur centralisé doit-être fait de manière professionnelle.
- Durée de vie comparativement plus courte, où ceux-ci sont garantis pour durer entre 15 et 20 ans [10].

### **I.10 Origine des harmoniques**

Les harmoniques sont générées par des charges qui ont une relation tension/courant non linéaire, telles que les convertisseurs électroniques de puissance, les fours à arc, etc. Ces harmoniques se propagent dans le réseau électrique, créant des tensions harmoniques qui perturbent le fonctionnement des autres utilisateurs connectés à la même source. L'impédance de la source a un rôle crucial dans la sévérité de la distorsion harmonique en tension, avec une faible impédance de la source (une haute puissance de court-circuit) entraînant une faible distorsion harmonique [11].

Dans le but de minimiser la pollution harmonique dans les réseaux de distribution, différentes méthodes sont utilisées. Parmi ces méthodes, on trouve le filtre passif et le filtre actif. Ces deux stratégies de mitigation mentionnée sont largement répandues. Le filtrage actif est la solution modern la plus adaptée aux différentes perturbations électriques.

### **I.11 Filtrage d'harmonique**

La méthode prédominante et la plus efficace consiste à utiliser le filtrage :

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



### I.11.1 Filtre passif

Un filtre passif est une combinaison entre des composantes qui pourraient être capacitif, inductif ou résistif. Ensemble, ils forment une impédance qui change en fonction de la fréquence. Ce filtre est généralement connecté en parallèle avec le réseau pour absorber un courant harmonique spécifique. Pour atténuer les harmoniques indésirables à l'aide de ce type de filtre, on classe deux types : les filtres en série et les filtres en parallèle. Les filtres en parallèle. Leurs avantages ont conduit à une utilisation répandue, notamment une consommation d'énergie réduite. En ce qui concerne les filtres en parallèle, ils peuvent être classés en trois catégories : les filtres à inductance anti-harmonique, les filtres résonants et les filtres amortis [12] [13].

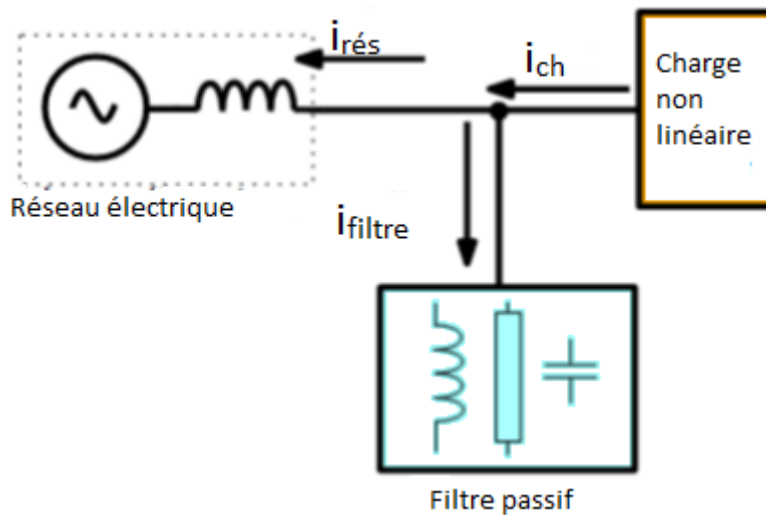


Figure I. 4: Raccordement d'un filtre passif

#### I.11.1.1 Filtre à inductance anti-harmonique

Une première approche consiste à additionner une inductance en série avec les condensateurs de compensation dans chaque branche monophasée. Le but principal de ce filtre est de préserver les batteries de condensateurs contre les surintensités causées par les harmoniques. En outre, il contribue à minimiser les tensions des harmoniques qui apparaissent aux bornes de ces condensateurs. De plus, ce filtre peut souvent minimiser les valeurs d'impédance harmonique du réseau au niveau de l'injection près de la fréquence d'accord, ce qui offre la capacité de diminuer les tensions harmoniques sur le réseau [14].

#### I.11.1.2 Filtre passif résonant

Un circuit RLC en série résonant à la fréquence d'une harmonique spécifique. Inférieure est appelé un filtre passif résonant. Son principe consiste à présenter une impédance très faible

aux courants harmoniques de ce rang particulier. Pour filtrer plusieurs rangs harmoniques, il est courant d'installer plusieurs filtres résonants en parallèle [14].

### **I.11.1.3 Filtre passif amorti**

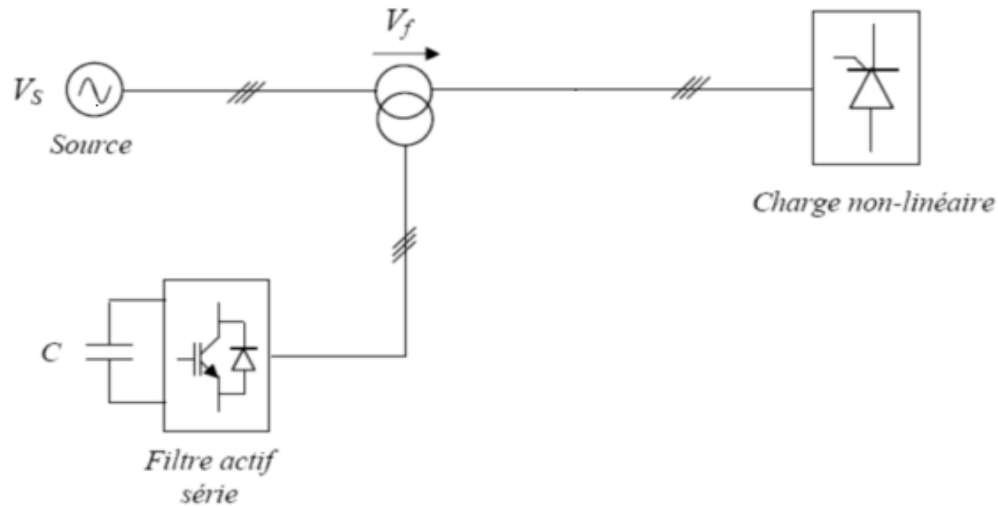
Le filtre passif amorti est constitué d'un circuit RLC composé d'une capacité en série avec un ensemble comprenant une résistance d'amortissement et une inductance en parallèle. Il est utilisé pour filtrer de manière simultanée des harmoniques de rang supérieur, plutôt qu'une harmonique spécifique. Ce type de filtre est recommandé lorsque des performances modérées sont requises et il est également appelé filtre passe-haut [14].

### **I.11.2 Filtre Actif**

Les filtres de puissance active sont des dispositifs qui permettent une élimination plus efficace des harmoniques par rapport aux filtres passifs. Leur utilisation se concentre sur la filtration des harmoniques de haut et bas ordre dans les systèmes d'alimentation électrique. Leur fonction principale consiste à compenser en temps réel les perturbations présentes dans les réseaux électriques [15].

#### **I.11.2.1 Filtre actif série (FAS)**

Les filtres actifs de puissance en série sont utilisés pour compenser la distorsion du système de courant provoquée par les charges non linéaires. Ils accomplissent cela en fournissant un chemin d'impédance élevée aux harmoniques de courant, ce qui oblige les courants hautes fréquences à passer à travers le filtre passif LC connecté en parallèle à la charge. L'impédance élevée imposée par le filtre actif de puissance en série est créée en générant une tension de même fréquence que le composant harmonique de courant à éliminer. Dans ce cas, le filtre actif de puissance en série génère une composante de tension qui est ajoutée en série avec la tension d'alimentation. Par conséquent, il peut être considéré comme une source de tension contrôlée, compensant la régulation de tension du côté de la charge (affaissements ou surtensions) et le déséquilibre de tension. L'injection de tension de phase arbitraire par rapport au courant de charge implique des capacités de transfert de puissance active qui augmentent la puissance nominale du filtre actif de puissance en série et nécessitent dans la plupart des cas un élément de stockage d'énergie connecté au bus DC [16] [17].



**Figure I. 5:** Structure d'un Filtre Actif Série (FAS)

### I.11.2.2 Filtre actif parallèle

La Figure I-6 montre le schéma d'un filtre actif parallèle qui est composé d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. La présence d'une inductance en sortie de l'onduleur confère au filtre actif une nature de source de courant. Les filtres de puissance actifs shunt ont pour fonction de compenser les harmoniques de courant en injectant un courant de compensation harmonique de même amplitude mais de polarité opposée. Pour cela, le filtre de puissance active shunt se comporte comme une source de courant qui injecte les composantes harmoniques générées par la charge, mais déphasées de 180 degrés. De ce fait, les composantes de courant harmonique présentes dans le courant de charge sont annulées par l'effet du filtre actif, permettant ainsi à la courante source de rester sinusoïdal et en phase avec la tension phase-neutre correspondante [16] [17].

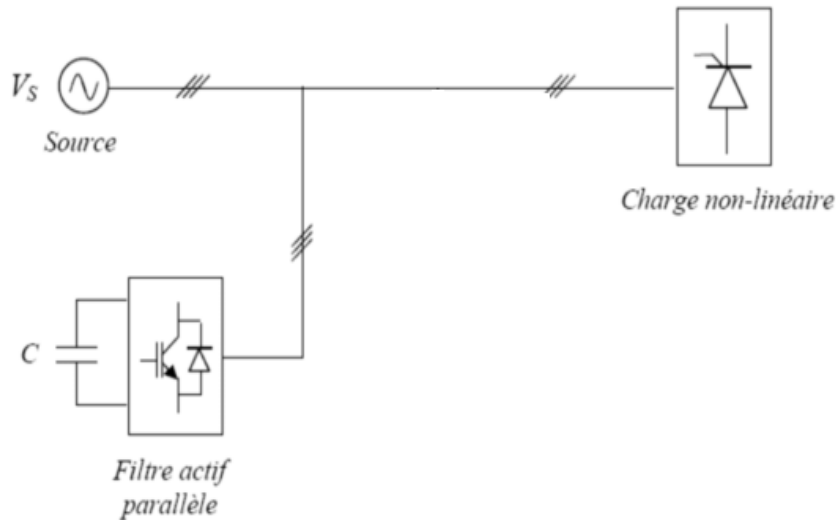


Figure I. 6: Structure d'un Filtre Actif Parallèle (APF)

I.11.2.3 Filtre combiné parallèle-série

Un filtre combiné parallèle-série est un type de filtre électronique qui combine les caractéristiques des filtres passifs parallèles et série. Ce type de filtre utilise des composants passifs disposés à la fois en parallèle et en série pour filtrer les signaux électriques. En tirant parti des avantages des deux filtres actifs, est capable de fournir des courants et des tensions sinusoïdaux à partir de signaux perturbés [18].

I.12 Modélisation d'un filtre actif parallèle

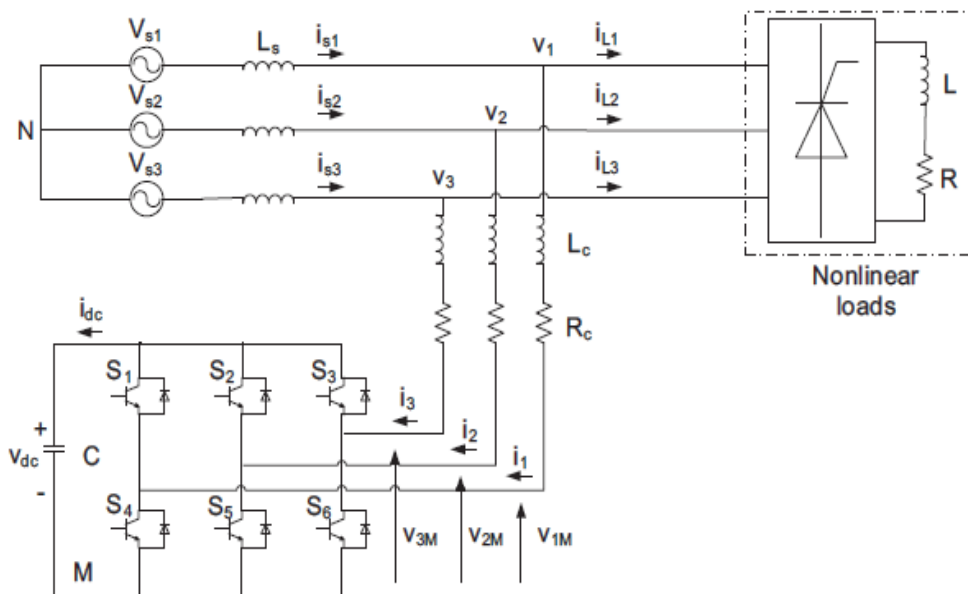


Figure I. 7: schéma de bloc d'un filtre actif parallèle [19]

$$\begin{cases} V_1 = L_c \frac{di_1}{dt} + R_C i_1 + V_{1M} + V_{MN} \\ V_2 = L_c \frac{di_2}{dt} + R_C i_2 + V_{2M} + V_{MN} \\ V_3 = L_c \frac{di_3}{dt} + R_C i_3 + V_{3M} + V_{MN} \end{cases} \quad (I.1)$$

Les paramètres de  $L_c$  et  $R_C$  sont respectivement l'inductance et la résistance de l'APF,  $V_{MN}$  est la tension entre les points M et N.

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

La fonction de commutation  $C_K$  indique l'état ON/OFF des appareils dans les deux branches du pont IGBT Bridge.  $C_K$  est défini comme :

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

Ou  $k=1,2,3$

En tenant compte de la relation  $V_{KM} = C_K V_{dc}$  alors (I.1) devient

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

Alors la fonction d'état de commutation  $d_{nk}$  est définie comme :

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

Ce qui montre que  $d_{nk}$  dépend de la fonction de commutation  $C_k$ . De plus, sur la base de (I.5) et pour les huit commutations autorisées états de l'IGBT, on peut obtenir que

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

Équation (I.4) devient

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = -\frac{R_C}{L_C} i_1 + \frac{V_1}{L_C} - \frac{V_{dc}}{L_C} d_{nk} \\ \frac{di_2}{dt} = -\frac{R_C}{L_C} i_2 + \frac{V_2}{L_C} - \frac{V_{dc}}{L_C} d_{nk} \\ \frac{di_3}{dt} = -\frac{R_C}{L_C} i_3 + \frac{V_3}{L_C} - \frac{V_{dc}}{L_C} d_{nk} \end{cases} \quad (I.7)$$

### I.13 Conclusion

Ce chapitre présente un aperçu complet des convertisseurs DC/AC, en commençant par une introduction générale sur les onduleurs. Leur principe de fonctionnement, les différentes classifications d'onduleurs et leurs principales applications sont expliqués, en mettant en évidence les avantages et les inconvénients de chacun. L'accent est ensuite mis sur l'onduleur de courant, en abordant l'origine des harmoniques et les différentes méthodes de filtrage disponibles pour atténuer ces harmoniques. Enfin, une attention particulière est portée sur l'étude approfondie du filtre actif parallèle, qui est mis en place pour corriger toutes les perturbations du courant, notamment les harmoniques et les déséquilibres.

**Chapitre II:**  
**Commande par mode**  
**glissant des**  
**convertisseurs**  
**DC/AC**

## II.1 Introduction

Le mode glissant est une technique de contrôle utilisée en ingénierie pour stabiliser et contrôler les systèmes soumis à des incertitudes ou à des perturbations. Dans ce chapitre, nous allons étudier la commande en mode glissant (SMC) pour les onduleurs [11]. Cette technique de commande est employée pour contrôler les systèmes non linéaires. Nous commencerons par une présentation de la surface de glissement, puis nous aborderons les développements nécessaires pour la mise en place de la commande par mode glissant. Enfin, nous évaluerons l'efficacité de cette technique pour différents types de convertisseurs DC/AC.

## II.2 Historique de la commande par mode glissant

Le concept de fonctionnement appelé "glissement" est un aspect spécifique des systèmes à structure variable. L'union soviétique a été le lieu où la théorie de ces systèmes a connu son développement, principalement par le professeur Emelyanov, ainsi le chercheur Utkin, en se basant sur les travaux du mathématicien Filipov sur les équations différentielles discontinues du second ordre. Par la suite, ces recherches ont été reprises. La gestation de cette théorie s'est opérée de part et d'autre du globe, prenant racine aux États-Unis sous l'égide de Slotine, et au Japon par l'entremise de Young, Harishima et Hashimoto. De fait, elle s'est établie en tant que l'une des approches les plus épurées pour la régulation des systèmes non linéaires ainsi que des systèmes à modélisation incertaine [20].

## II.3 Principe de la commande par mode glissant

La commande par mode glissant, ou Sliding Mode Control (SMC), est une approche de contrôle non linéaire qui a été conçue pour réguler les systèmes à structure variable, tels que les convertisseurs statiques. La méthodologie des modes glissants consiste à guider la trajectoire d'état d'un système en direction d'une surface de glissement en utilisant une logique de commutation appropriée. Une fois sur cette surface, la technique permet de faire glisser la trajectoire le long de celle-ci jusqu'à atteindre le point d'équilibre souhaité, d'où le nom évocateur de « phénomène de glissement ».

La commande par mode glissant offre de nombreux avantages significatifs, notamment une grande précision, une excellente stabilité, une simplicité d'utilisation, une invariance et une robustesse élevée. ...etc. [21].

## II.4 Système à structure variable

Un système à structure variable se réfère à un système dont la configuration subit des changements durant son fonctionnement, avec l'utilisation d'une fonction et d'une logique de



commutation. Cette particularité confère au système la capacité de passer d'une structure à une autre à tout moment, permettant ainsi l'émergence de propriétés inédites qui n'existent pas dans chaque structure individuelle. Dans le contexte de la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire de l'état du système est soigneusement dirigée en direction d'une surface spécifique. Une fois atteinte, cette surface est maintenue grâce à une loi de commutation adéquate, assurant ainsi une proximité constante. Cette surface est communément nommée surface de glissement, et le mouvement le long de celle-ci est désigné comme mouvement de glissement. De ce fait, la trajectoire dans le plan de phase se compose de trois parties [22] :

#### **II.4.1 Mode de convergence (MC)**

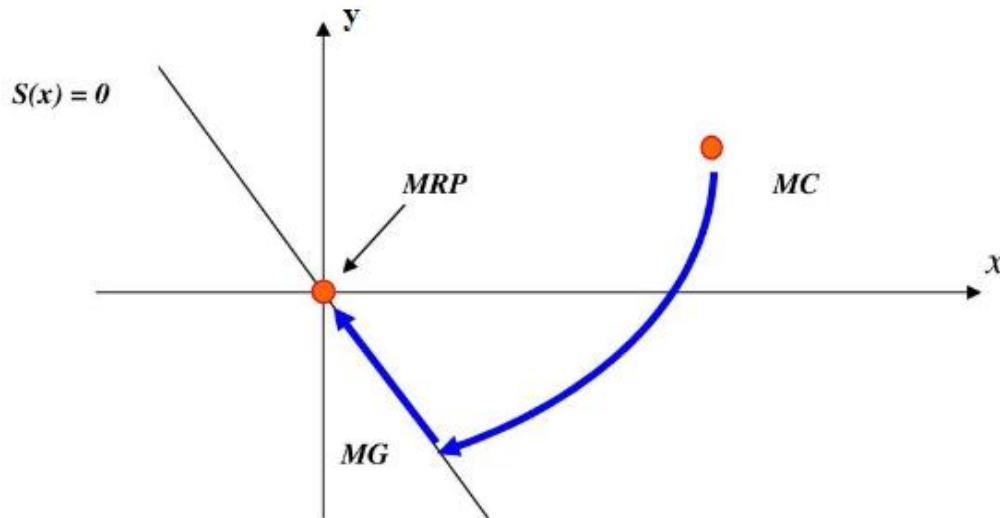
Le mode en question est celui au cours duquel la variable de contrôle se déplace à partir de tout point initial dans le plan de phase et converge vers la surface de commutation, représentée par  $S(x) = 0$ . Ce mode est spécifiquement distingué par une loi de commande et un critère de convergence bien définis.

#### **II.4.2 Mode de glissement (MG)**

Il s'agit là du mode dans lequel la variable d'état a effectivement atteint la surface de glissement et s'approche progressivement de l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est définie par la détermination rigoureuse de la surface de glissement  $S(x) = 0$ .

#### **II.4.3 Mode du régime permanent (MRP)**

Ce mode est incorporé dans l'analyse afin d'étudier la réponse du système dans les environs de son point d'équilibre, qui correspond à l'origine du plan de phase. Il se distingue par les attributs et les performances remarquables de la commande qui y sont associés [23][24].



**Figure II. 1:** Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

## II.5 Principe du réglage par mode glissant

La technique de mode glissant consiste à guider le système vers une surface spécifique et à le faire passer par des changements contrôlés grâce à une logique appropriée. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le système atteigne un point d'équilibre, ce qui entraîne le phénomène de glissement.

Parmi les caractéristiques des modes glissants, on peut mentionner [23] :

- La théorie des modes glissants est particulièrement adaptée aux systèmes à commande discontinue.
- Le choix des coefficients de la surface de glissement est le seul déterminant de la dynamique du système en mode glissant
- En mode glissant, la trajectoire du système se limite à une surface plus petite que l'espace d'état, ce qui rend les équations différentielles qui décrivent son comportement plus simple.

## II.6 Conception de la commande par mode glissant

La conception de la commande peut être subdivisée en trois étapes principales, indépendantes les unes des autres :

- Sélection de la surface.
- Détermination des conditions requises pour que quelque chose existe.
- Identification de la loi de commande [25].

### II.6.1 Choix de surface de glissement

Considérons le système non linéaire écrit par l'équation différentielle suivante [25] :

$$\dot{x}_1 = f(x) + g(x)u \quad (\text{II. 1})$$

Les fonctions non linéaires  $f(x)$  et  $g(x)$  sont utilisées dans ce système. Le vecteur  $x$  représente l'état du système, tandis que le vecteur  $u$  correspond à la commande.

Soit  $x_{ref}$  le vecteur de référence (l'état désiré) et  $e$  le vecteur de l'écart définie par :

Considérons le vecteur  $x_{ref}$  comme la référence de l'état désiré, et définissons le vecteur  $e$  comme l'écart entre les deux, tel que

$$e = x - x_{ref} \quad (\text{II. 2})$$

Slotine a formulé une équation générale qui permet calculer la zone de glissement afin de garantir que la variable converge vers sa valeur souhaitée.

$$s(x) = \left( \frac{\partial}{\partial t} + \lambda \right)^{r-1} e \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

$e$  : L'écart entre la référence et sa variable.

$\lambda$  : Positive Constante.

$r$  : Le degré relatif, noté  $r$ , correspond au nombre de dérivées nécessaires de la sortie pour mettre en évidence la commande.

$$\begin{cases} \dot{S}(x) > 0 \text{ si } S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) < 0 \text{ si } S(x) > 0 \end{cases} \quad (\text{II. 4})$$

On peut exprimer cette condition de la manière suivante :

$$\dot{S}(x)S(x) < 0 \quad (\text{II. 5})$$

Les exigences pour assurer la convergence et l'existence :

Les critères de convergence et de stabilité sont essentiels pour jouent un rôle crucial dans la capacité des différentes dynamiques du système de converger en direction la surface de glissement et de s'y maintenir malgré les perturbations. Pour assurer cette convergence, deux aspects doivent être pris en compte [22].

### II.6.1.1 Approche directe (fonction de commutation)

Cette approche suggérée et examinée par Emilyanov et Utkin, est la plus ancienne parmi les différentes approches existantes. Elle est présentée sous une forme structurée et rigoureuse [22] :

### II.6.1.2 Fonction de Lyapunov

La fonction de Lyapunov est définie comme une fonction scalaire positive,  $V(x) > 0$ , pour la variable d'état du système. La loi de commande doit être conçue de manière à faire décroître cette fonction,  $\dot{V}(x) < 0$ . L'idée est de sélectionner une fonction scalaire,  $V(x)$ , Il est nécessaire d'assurer L'attrance de la variable à réguler vers sa valeur de référence, ainsi que de concevoir une commande  $u$  de manière que le carré de la norme du gradient de la fonction  $V$  corresponde à une fonction de Lyapunov [25].

La fonction de Lyapunov est allée définir comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (II.6)$$

Cette fonction est une fonction scalaire positive, et sa dérivée est positive.

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) \quad (II.7)$$

Pour permettre la décroissance de la fonction  $V(x)$ , il est suffisant de s'assurer que sa dérivée est négative. Cette condition est remplie lorsque l'équation suivante est satisfaite : la diminution constante du carré de la distance entre un point donné dans le plan de phase et la surface de glissement, représenté par  $S^2(x)$  . Cette condition restreint la trajectoire du système à converger vers la surface de glissement à partir des deux côtés. Afin que cela se réalise, d'autres facteurs doivent être pris en compte.

## II.7 Détermination de la loi de commande

La détermination de la commande nécessaire pour apporter la variable de contrôle à la surface sélectionnée, tout en garantissant les exigences d'existence et d'attraction., repose sur deux composantes principales : la commande équivalente  $U_{eq}$  et la commande attractive  $U_c$  [7].

$$u = u_{eq} + u_c \quad (II.8)$$

$U_{eq}$  : La commande équivalente est employée dans le but d'assurer que la variable contrôlée reste sur la zone de glissement, en assurant ainsi une stabilité optimale.  $S(x) = 0$

La dérivée de la surface de glissement est :

$$\frac{ds}{dt} = \frac{ds}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{ds}{dx} \{f(x) + g(x)u_{eq}\} + \frac{ds}{dx} g(x)u_c = 0 \quad (\text{II. 9})$$

Lorsque le système atteint la surface de glissement  $u_c = 0$  alors :

Et lorsque

$\frac{ds}{dx} g(x)u_c \neq 0$  Dans ce cas :

$$u_c = k \text{sign} S(x) \quad (\text{II. 10})$$

Où  $K$  est un constant positive

Un problème associé au réglage par mode de glissement réside principalement dans la présence du phénomène de Chattering. Ce phénomène est causé par des défauts au niveau de certains composants tels que les capteurs ou les relais, entraînant ainsi des imperfections [7].

## II.8 Phénomène de broutement (chattering) dans le mode glissant

Dans la pratique, il n'existe pas de régime glissant idéal car les organes de commande ont une limite finie en termes de fréquence de commutation. En d'autres termes, aucun dispositif de commutation ne peut effectuer des commutations à une fréquence infinie, car cela impliquerait une demande d'énergie infinie.

La nature discontinue de la commande entraîne une conduite dynamique particulière près de la zone de glissement, connu sous le nom de "chattering" ou phénomène de réticence (Figure II-2). Les oscillations observées à proximité de la surface sont induites par les imperfections inhérentes aux éléments de commutation ou les limitations technologiques et physiques, comme les délais lors des commutations ou les conduites avec hystérésis. Ces facteurs peuvent engendrer l'excitation de dynamiques négligées à des fréquences élevées.

Le broutement peut nuire aux performances du système et même entraîner son instabilité. De plus, la réticence entraîne des contraintes mécaniques importantes sur les actionneurs, ce qui accroît la Dépense d'énergie et Peut causer des dommages aux circuits électriques de puissance.

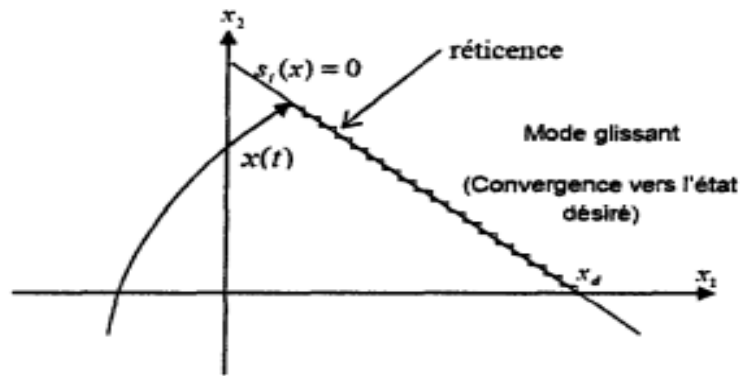


Figure II. 2: Phénomène de réticence

Le phénomène de réticence, présent dans la commande à structure variable, a des répercussions sur la commande et le système, entraînant notamment : Il peut entraîner une diminution de la précision de la commande.

- Il peut générer une importante perte de chaleur dans les machines électriques.
- Il peut provoquer Une usure des composants mécaniques mobiles.

Ces effets négatifs font du phénomène de réticence un véritable obstacle à l'application de la commande à structure variable [26].

Une approche pour résoudre le problème de broutement implique l'approximation de la fonction non linéaire Signe en utilisant une fonction de saturation non linéaire de tangente hyperbolique. Cette dernière évite la transition abrupte de -1 à 1 imposée par la fonction Signe [27].

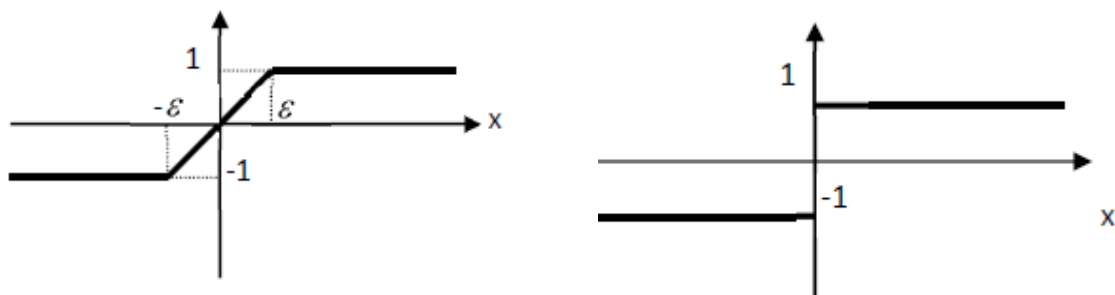


Figure II. 3: Approximation de la Signe par une fonction de saturation à rampe élevée.

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad \text{Sat}(x) = \begin{cases} \frac{x}{\varepsilon} & |x| \leq \varepsilon \\ \text{sgn}(x) & |x| > 0 \end{cases} \quad (II.11)$$

## II.9 Commande équivalente

Prenons en compte un système linéaire qui est écrit par l'équation différentielle ci-dessous :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (II.12)$$

Nous définissons un vecteur de commande équivalente  $u_{eq}$  qui représente les équations du régime glissant idéal. La condition pour obtenir cette commande équivalente peut être exprimée comme suit :

Nous établissons la définition d'un vecteur de commande équivalente. La condition requise pour obtenir cette commande équivalente peut être formulée de la manière suivante :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} (f(x) + g(x)u_{eq}) = 0 \quad (II.13)$$

Lors du mode de glissement en régime permanent, la surface d'erreur est nulle, ce qui implique que sa dérivée ainsi que la partie discontinue sont également nulles. Par conséquent, nous pouvons déduire l'expression de la commande équivalente en utilisant cette condition :

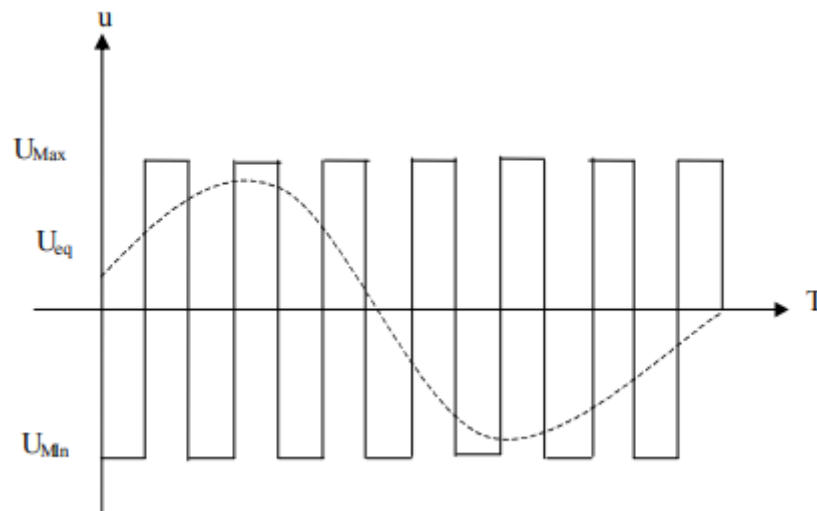
$$L_f s(x) + [L_g s(x)]u_{eq} = 0 \quad (II.14)$$

Alors :

$$u_{eq} = -\frac{L_f s(x)}{[L_g s(x)]} \quad (II.15)$$

$L_f$  Représente la dérivée de la fonction  $F$ , tandis que  $L_g$  représente la dérivée de la fonction  $G$ . Dans le cas des convertisseurs statiques que nous examinons, il est essentiel de comprendre la signification de la commande équivalente  $0 < u_{eq} < 1$ .

La commande équivalente peut être envisagée comme une fonction continue qui représente la moyenne des alternances successives de la commande " $u$ " entre " $u_{max}$ " et " $u_{min}$ ". Cela se traduit par la condition suivante [28] :



**Figure II. 4:** Commande équivalente

## II.10 Commande discontinue

La fondation de la commande discontinue est renforcée par l'ajout du terme  $n u$  à la loi de commande, ce qui garantit l'attractivité de la surface de glissement  $S$ . La surface de glissement est considérée comme attractive uniquement si le produit de  $S(x)\dot{S}(x) < 0$ . Cette condition délimite la région où le mode glissant se manifeste. Pendant le mode de convergence, cela conduit à une nouvelle expression pour la dérivée de la surface

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \{B(x, t)u_c\} \quad (II. 16)$$

La tâche consiste à trouver une valeur  $u_n$  appropriée pour lequel :

$$S(x)\dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} \{B(x, t)u_c\} < 0 \quad (II. 17)$$



Une approche simple consiste à utiliser un relais comme solution. Dans ce cas, la commande est formulée de la manière suivante :

$$u_c = K \cdot \text{sign}(S(x)) = K \frac{|S(x)|}{s} \quad (II.18)$$

Le gain  $K$  doit être positif pour satisfaire les conditions d'attractivité et de stabilité.

En remplace II-19 dans II-18 on trouve :

$$S(x)\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) K |S(x)| < 0 \quad (II.19)$$

$\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t)$  Il est négatif pour la catégorie de systèmes que nous examinons [29].

### II.11 Régimes de mode glissant

D'un point de vue théorique, la trajectoire en mode glissant correspond de manière exacte à l'équation  $S(x) = 0$ , et l'organe de commutation est considéré comme insensible au bruit [21]. On peut distinguer deux modes distincts :

#### II.11.1 Régime glissant idéal

Il est défini par une amplitude qui tend vers zéro et une oscillation de fréquence infinie.

#### II.11.2 Régime glissant réel

Dans le contexte pratique, l'organe de commutation est couramment implémenté à l'aide de relais qui exhibent des imperfections inhérentes, telles que des délais de commutation. Dans cette situation, la trajectoire de phase du régime glissant demeure en proximité immédiate de la surface de commutation, engendrant des oscillations indésirables. Ces oscillations compromettent la précision du système et peuvent également engendrer des perturbations sur sa stabilité [23][30].

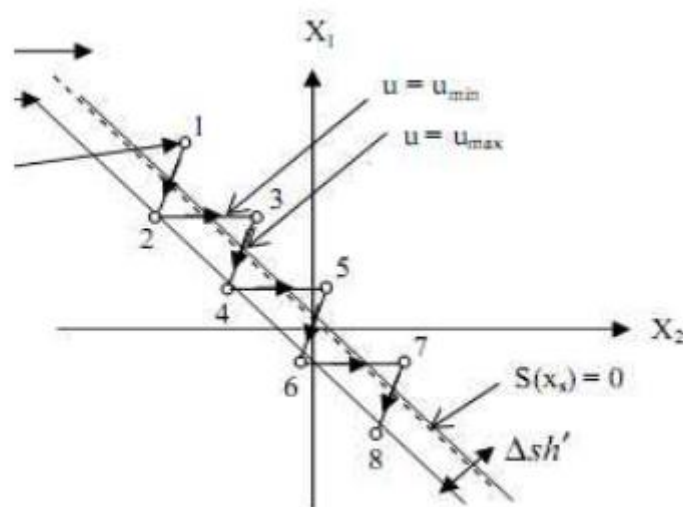


Figure II. 5: Mode glissant réel

### II.12 Domaine d'application du réglage par mode glissant

Le réglage basé sur le mode glissant a connu des avancées significatives dans tous les domaines de la commande. Dans les systèmes de commande hydrauliques ou pneumatiques, par exemple, des valves à tout-ou-rien sont utilisées, ne disposant que de deux états stables : complètement ouvertes ou complètement fermées. Ces valves peuvent commuter à des fréquences atteignant 10 Hz. Dans le cas des entraînements électriques pour les machines électriques ou les robots, il est essentiel de régler soit la vitesse de rotation, soit la position. Il est important de souligner que dans certains domaines, tels que les processus chimiques nécessitant des réglages basés sur des régulateurs à deux positions, l'utilisation du mode glissant peut offrir plusieurs avantages, comme :

- La robustesse et la résistance aux perturbations sont des caractéristiques essentielles.
- L'existence de la grande liberté dans le choix de la surface de commutation
- La présence de la commande équivalente contribue à atténuer l'impact de la commande.
- La possibilité d'appliquer cette technique à des surfaces de dimensions arbitraires, qui ne se limitent pas uniquement aux lignes droites [31].

### II.13 Application de la commande par Mode glissant sur un filtre actif parallèle

On applique le modèle d'état de l'onduleur et le filtre actif parallèle [19] :

$$\begin{cases} x_1 = i_k \\ x_2 = \dot{x}_1 = \dot{i}_k \end{cases} \quad (II. 20)$$

On a :

$$x = i_k = -\frac{R_c}{L_c} i_k + \frac{V_k}{L_c} - \frac{V_{dc}}{L_c} d_k \quad (II. 21)$$

La dérivée de  $x_1$  et  $x_2$  par rapport au temps donne :

$$\dot{x}_1 = -\frac{R_c}{L_c} i_k + \frac{1}{L_c} \frac{d_{vk}}{dt} - \frac{1}{L_c} \frac{dv_c}{dt} d_k \quad (II. 22)$$

On remplace II.21 dans II.22 :

$$\dot{x}_1 = -\frac{R_c}{L_c} \left( -\frac{R_c}{L_c} i_k + \frac{V_k}{L_c} - \frac{dv_c}{L_c} d_k \right) + \frac{1}{L_c} \frac{d_{vk}}{dt} - \frac{1}{L_c} \frac{dv_c}{dt} d_k \quad (II. 23)$$

Donc :

$$\dot{x}_1 = \frac{R_c^2}{L_c^2} i_k - \frac{R_c}{L_c^2} v_k + \frac{1}{L_c} \frac{d_{vk}}{dt} + \left( \frac{R_c}{L_c^2} v_{dc} - \frac{1}{L_c} \frac{dv_c}{dt} \right) d_k \quad (II. 24)$$

Prise en compte de la survenance de perturbations externes inconnues dans des applications pratiques, le modèle dynamique d'APF peut être écrit comme

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + bu \end{cases} \quad (II. 25)$$

Où

$$f(x) = \frac{R_c^2}{L_c^2} i_k - \frac{R_c^2}{L_c^2} v_k + \frac{1}{L_c} \frac{d_{vk}}{dt} + d ,$$

Et

$$b = \frac{R_c}{L_c^2} v_{dc} - \frac{1}{L_c} \frac{dv_c}{dt}$$

$$u = d_k \quad (II. 26)$$

$d$  : est le une perturbation externe inconnue et sa limite sont supposées être donnée par  $d < D$ ,  $D$  est une constante positive.

L'erreur est donnée par :

$$e = I - I_{ref} \quad (II. 27)$$

$I_{ref}$  : le courant de référence.

La surface de glissement pour le courant peut être donnée sous la forme :

$$S = k_1 e + k_2 \int e + \dot{e} \quad (II.28)$$

La dérive de la surface de glissement

$$\dot{S} = k_1 \dot{e} + k_2 e + \ddot{e} \quad (II.29)$$

On a

$$\begin{cases} I = x \\ I_{ref} = x_{ref} \end{cases} \quad (II.30)$$

En remplaçant II-2 dans II.28

$$\dot{S} = k_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_{1ref}) + k_2 (x_1 - x_{1ref}) + (\ddot{x}_2 - \ddot{x}_{2ref}) \quad (II.31)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x \\ \dot{x}_2 = f(x) + bu \end{cases} \quad (II.32)$$

En remplace II.32 dans II.31 :

$$\dot{S} = k_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_{1ref}) + k_2 (x_1 - x_{ref}) + (f + bu - \ddot{x}_{2ref}) \quad (II.33)$$

On trouve :

$$k_1 \dot{e} + k_2 e + f + bu - \ddot{x}_{2ref} = -K \text{sign}(S) \quad (II.34)$$

Donc la loi de commande écrit comme suit :

$$u = \frac{1}{g} (-f - k_1 \dot{e} - k_2 e - n \text{sign}(S) + \ddot{x}_{2ref}) \quad (II.35)$$

Lors du suivi d'une trajectoire aléatoire, la méthode traditionnelle de commande par mode glissant (SMC) ne peut pas éviter les erreurs à l'état stable en présence de perturbations externes. Dans cette section, une technique améliorée de commande par mode glissant pour le suivi de position, comprenant une partie intégrale, est proposée pour résoudre ce problème. La fonction de commutation du nouveau SMC peut être décrite comme suit [19]

$$S = k_1 e + k_2 \int e + \dot{e} \quad (II.36)$$

Le diagramme bloc de la commande par mode glissant proposée est présenté dans la Figure II-6. L'entrée est l'erreur de suivi  $e$  et la sortie du contrôleur par mode glissant est utilisée pour générer des signaux d'impulsion PWM qui contrôlent la mise en marche ou l'arrêt des IGBT [32].

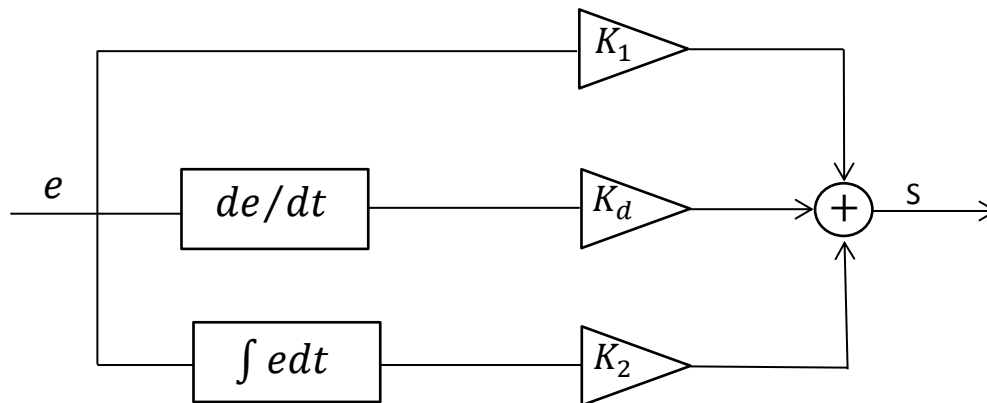


Figure II. 6: Schéma de surface de Mode Glissant

Tel que  $K_d = 1$

## II.14 Conclusion

Ce chapitre explique le nouveau concept des systèmes à structure variable ou modes glissants. La commande par mode glissant a été créée pour être utilisée dans les systèmes non linéaires, où les paramètres incertains et variables ne sont capables pas d'affecter la fiabilité de cette méthode. De plus, il est admissible de sélectionner entre les différentes formes de surfaces de glissement. En tenant compte Des multiples avantages de cette approche, nous avons essayé d'appliquer à un convertisseur de courant continu en courant alternatif spécifique.

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

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de simulations de la technique de commande par mode glissant appliquée au convertisseur statique DC/AC. L'objectif est de générer un courant sinusoïdal le plus dépourvu d'harmoniques possible à la sortie de l'onduleur. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

L'utilisation de MATLAB/Simulink pour la simulation du système est justifiée par ses nombreux avantages distinctifs, tels que sa convivialité et son efficacité remarquable. Les résultats obtenus ainsi que les courbes associées seront présentés en détail.

### III.2 Description de système

Le système comprend un filtre actif parallèle 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 mode glissant.

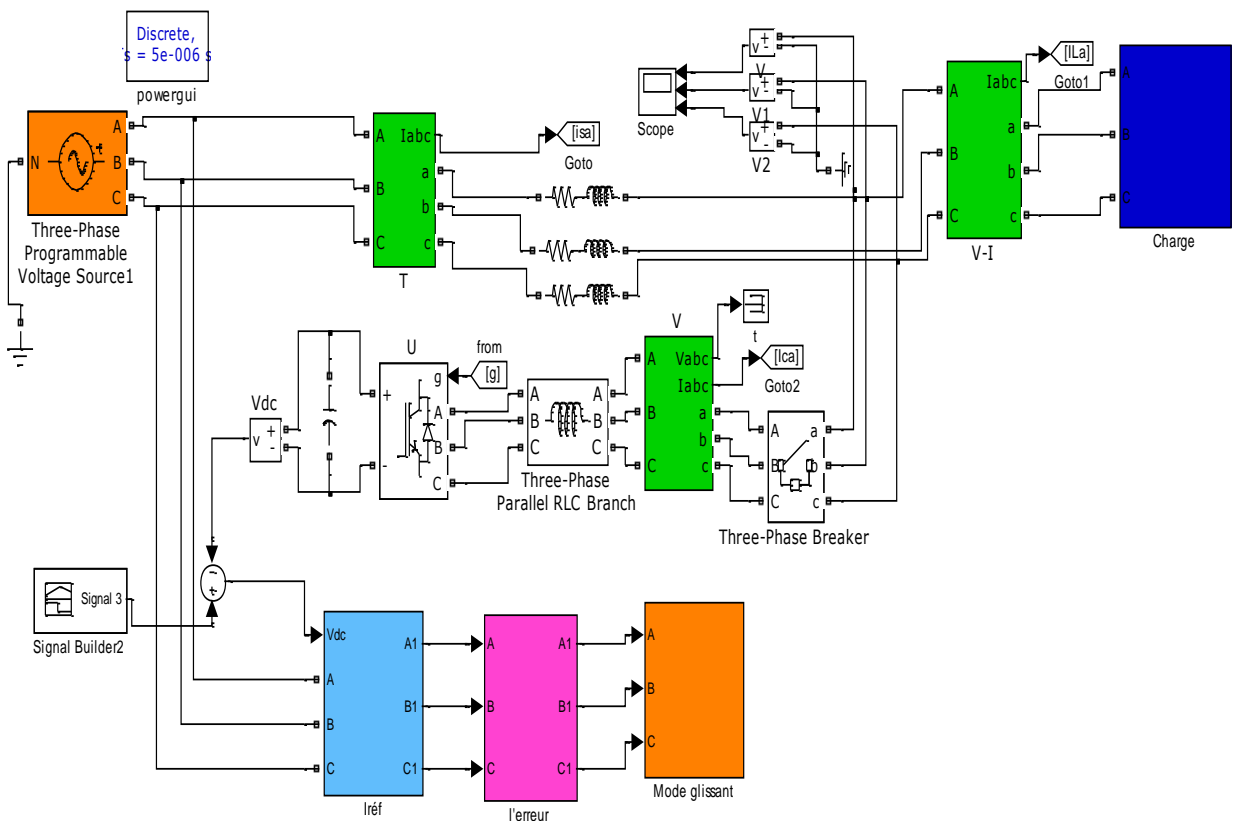


Figure III. 1: Schéma de bloc de filtre actif parallèle

### III.3 Composants et Paramètres de simulation

Le tableau III-1 illustre les paramètres de simulation utilisés dans notre étude. Ces paramètres ont été soigneusement sélectionnés pour représenter différentes conditions expérimentales et permettre une évaluation approfondie de notre système, ce qui nous permet de mieux comprendre son comportement et sa robustesse face aux variations des paramètres.

**Tableau III-1** : Les paramètres de simulations

Source de tension (Vs)	$110\sqrt{2}$
Harmonique de source de tension	50
Ordre, Amplitude	(10 <sup>ème</sup> et 20 <sup>ème</sup> ) 20
Inductance et résistance	5e-6, 5
Inductance de compensation	3e-3
Condensateur coté DC	320e-6
La tension de la capacité	350
Résistance dans la charge non linéaire ( $R_L$ )	10
Inductance dans la charge non linéaire ( $L_L$ )	2e-3
Paramètre de régulateur PI ( $K_p$ , $K_i$ , $K$ )	0.9, 100, 1.05
Paramètre de mode glissant ( $K_e$ , $K_d$ , $K_i$ )	1, 0.9e-5, 0.9

### III.4 Analyse de Simulation

Cette section met en œuvre les stratégies de contrôle du système de filtre actif parallèle sur des modèles réalistes à l'aide du module SimPower Systèmes de MATLAB. La charge non linéaire est constituée d'un pont universel triphasé et d'une branche RL en série. Les composants et les paramètres sont répertoriés dans le Tableau.III-1. Le APF commence à fonctionner lorsque la fermeture de disjoncteur est effectuée à l'instant  $t=0.04s$ . Dans un système d'alimentation électrique pratique, la tension d'alimentation peut contenir des harmoniques variantes fréquemment ainsi que des charges non linéaires, ce qui détériore l'effet de compensation harmonique. Afin d'analyser les performances du système de filtre de puissance active, nous concevons la tension d'alimentation pour contenir les 10<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup>



harmoniques, et nous ajoutons séparément une autre charge non linéaire aux instants  $t=0.1s$  et  $t=0.2s$ .

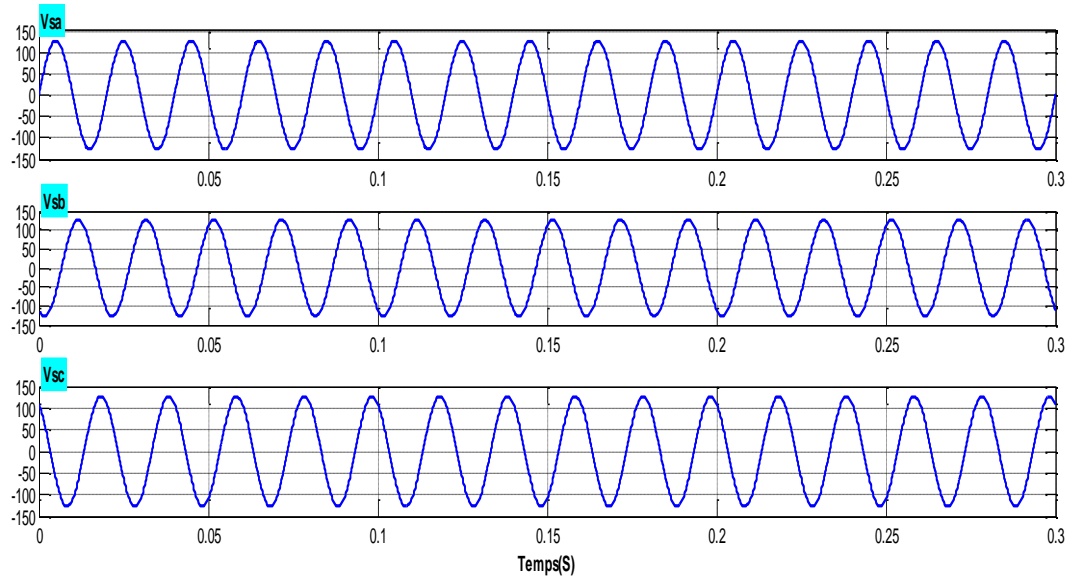


Figure III. 2: Tension de source sans harmonique

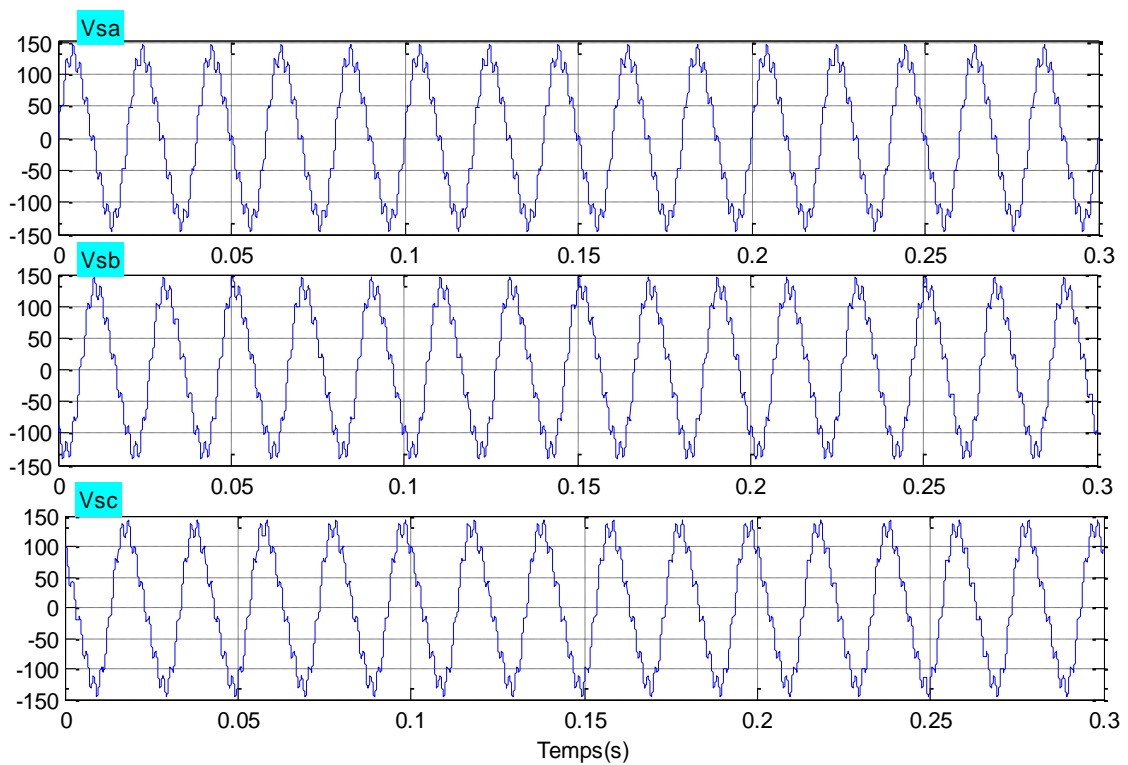


Figure III. 3: Tension de source avec harmonique

La figure. (III-3) représente la variation de la tension de source en fonction du temps. On observe que les trois tensions ( $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$  et  $V_{sc}$ ) contiennent des harmoniques à cause de la source automate programmables triphasé et les trois charges.

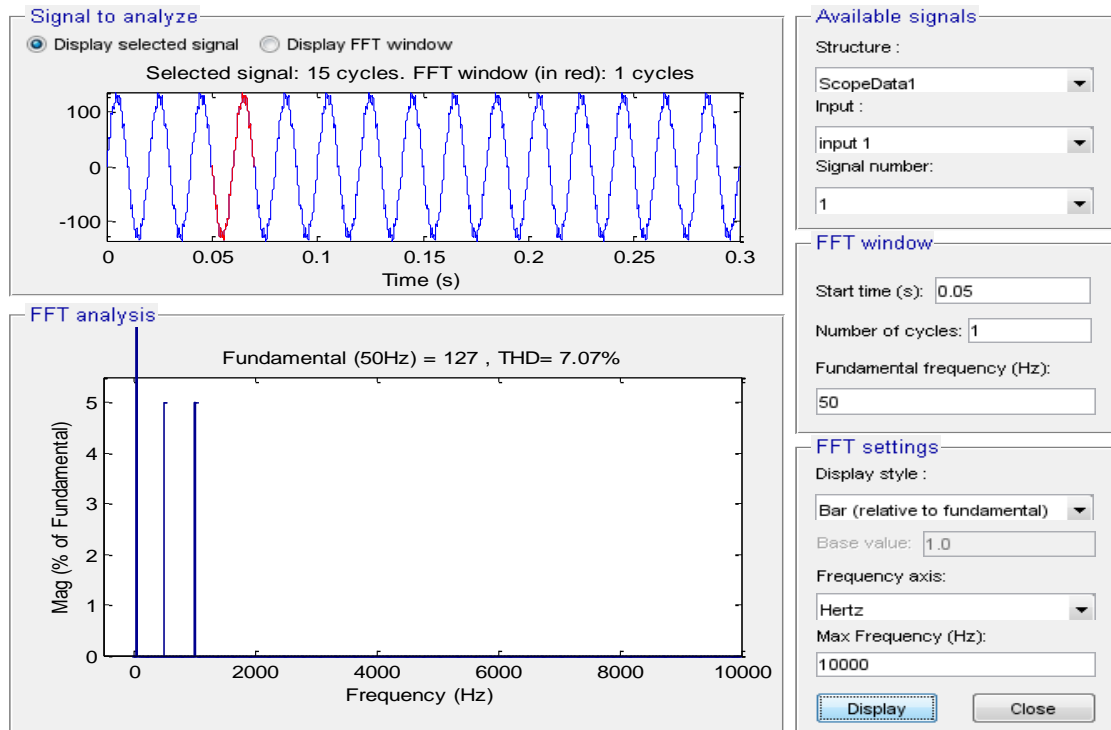


Figure III. 4: THD de source de tension

La Fig. (III-4) montre les ondes de tension d'alimentation se distordent en raison du 10<sup>ème</sup> et du 20<sup>ème</sup> harmonique, et la distorsion harmonique totale (THD) est de 7,07% selon l'analyse harmonique.

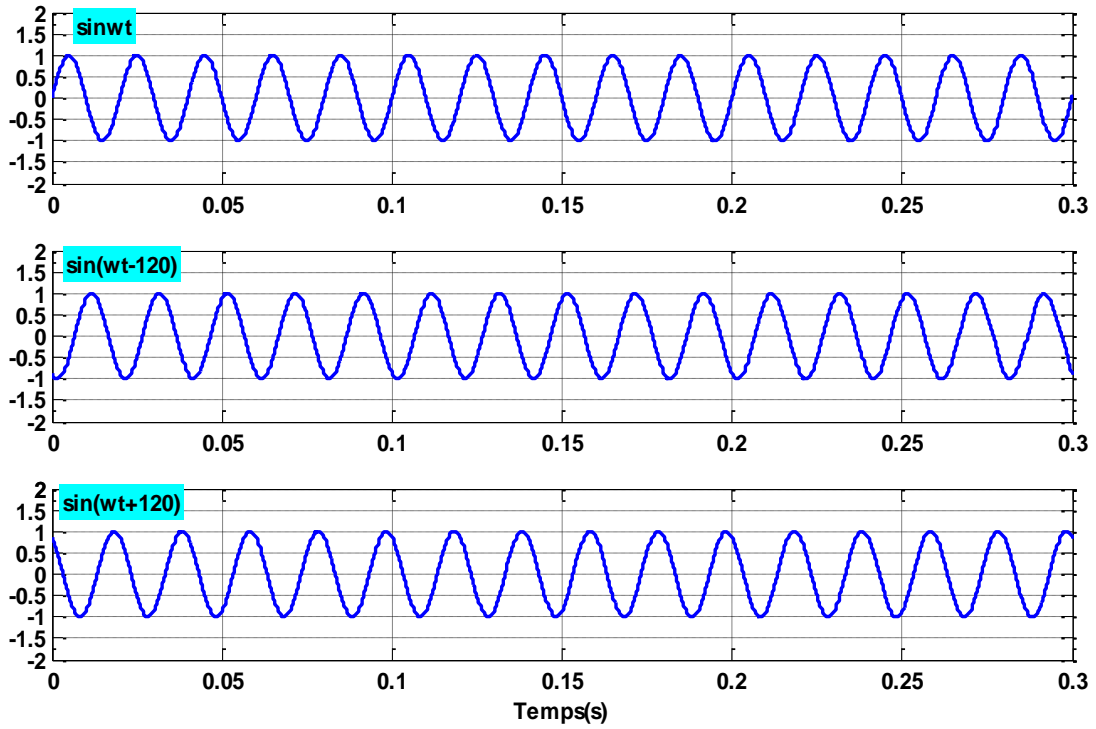


Figure III. 5: Signal de synchronisation

La figure (III-5) représente le signal de synchronisation en fonction du temps en sortie de bloc phase locked loop (PLL) .

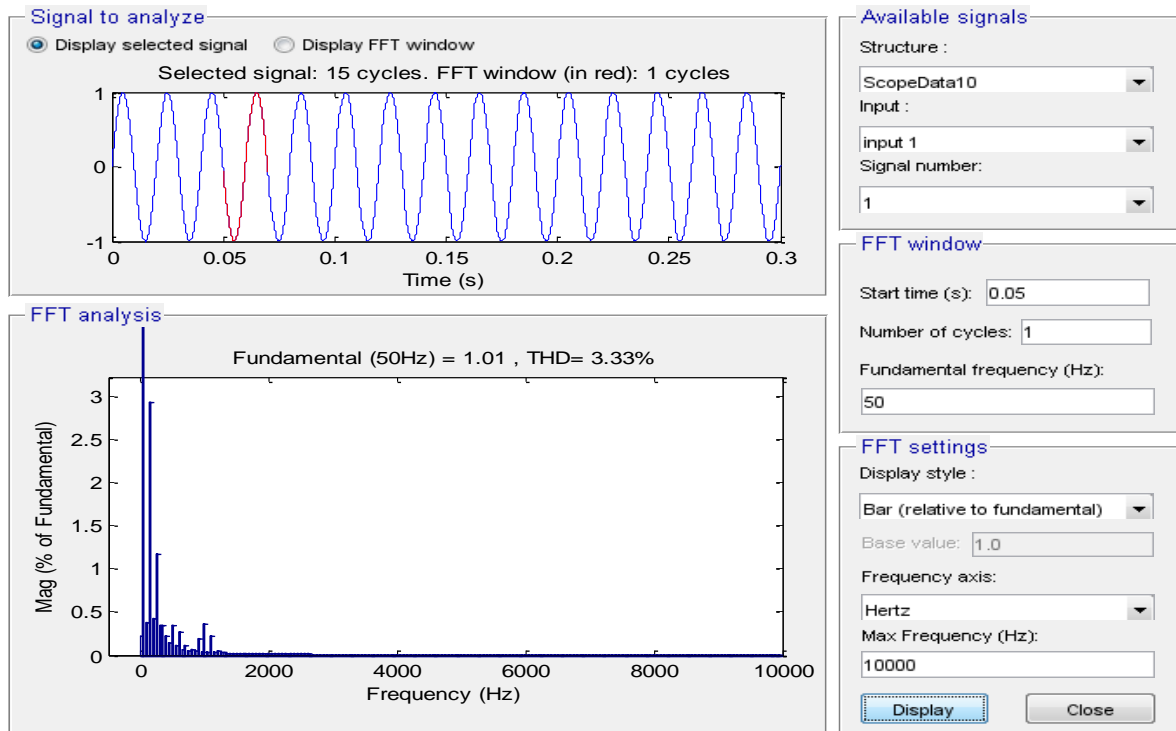
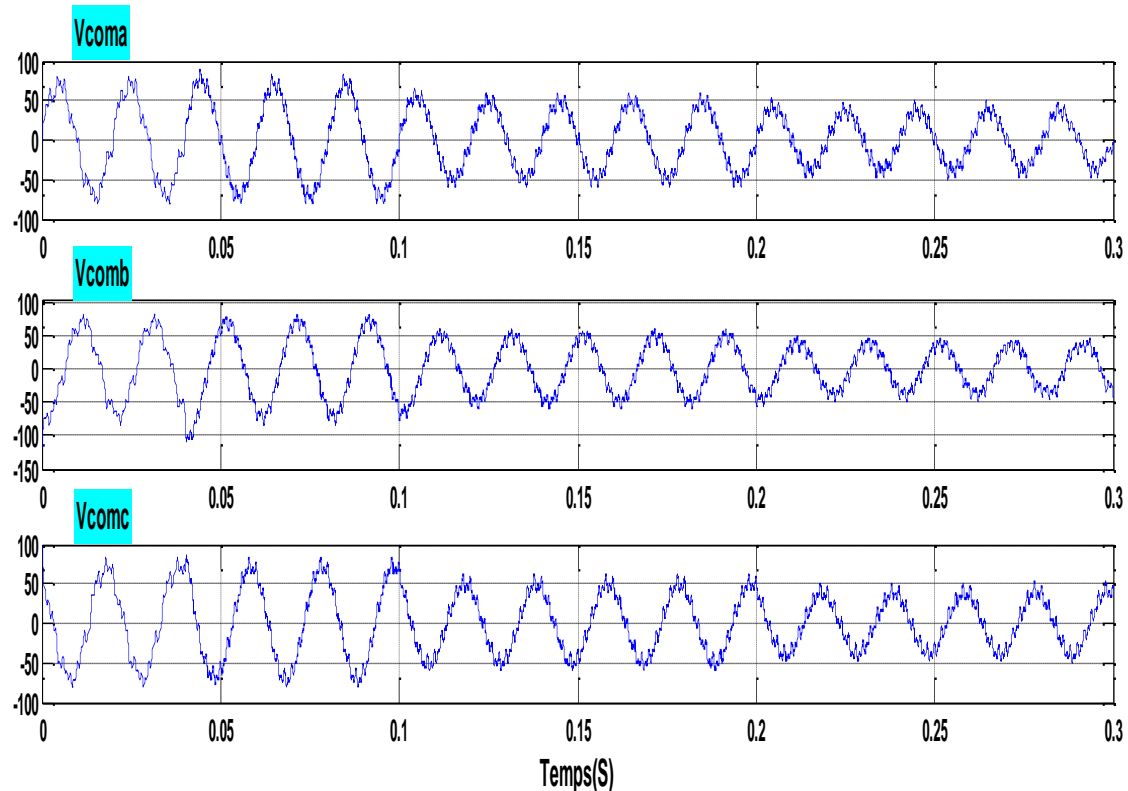


Figure III. 6: THD de Signal de synchronisation



**Figure III. 7:** Tension sur le point de connexion FAP

La figure (III-7) illustre l'évolution de la tension de filtrage dans le temps. On peut observer que les trois tensions ( $V_{coma}$ ,  $V_{comb}$  et  $V_{comc}$ ) présentent des harmoniques en raison de la source d'automates programmables triphasée et des trois charges connectées. Avant l'introduction des charges supplémentaires, l'amplitude reste constante à 80V. Après l'ajout de la deuxième charge de 0.1, l'amplitude diminue pour atteindre 55V. Ensuite, avec l'ajout de la troisième charge de 0.2, l'amplitude diminue davantage jusqu'à 40V.

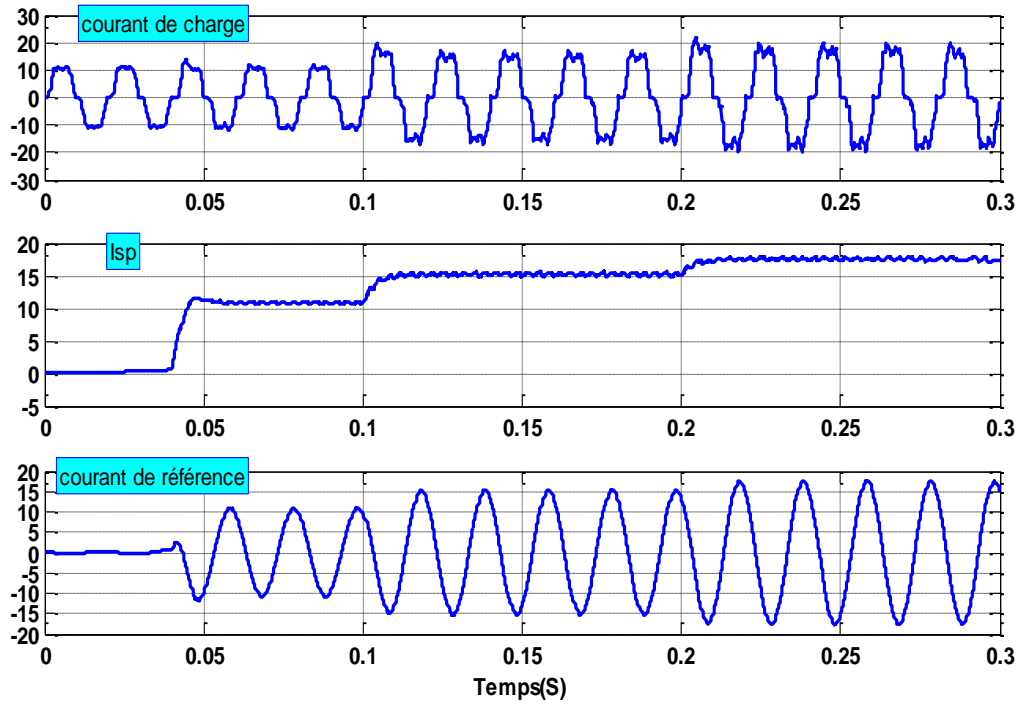


Figure III. 8: Courant de charge, Isp, Courant de référence

La Fig. (III-8) représente les formes d'onde du courant de charge de la phase A, Isp et du courant de référence de la phase A.

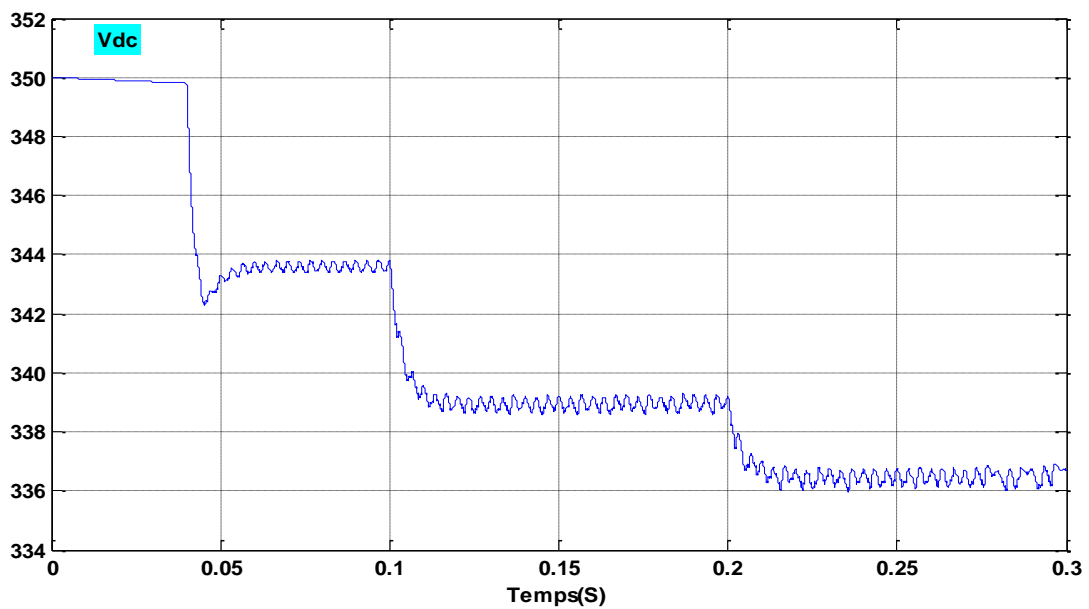


Figure III. 9: Tension Vdc

Nous avons fixé la valeur initiale de la tension continue (DC) à 350V. La Fig. (III-9) représente la variation de la tension continue (DC) en fonction du temps. On remarque qu'il y a une erreur stable entre la tension continue et la valeur donnée, qui peut être utilisée pour évaluer l'amplitude des courants de charge.

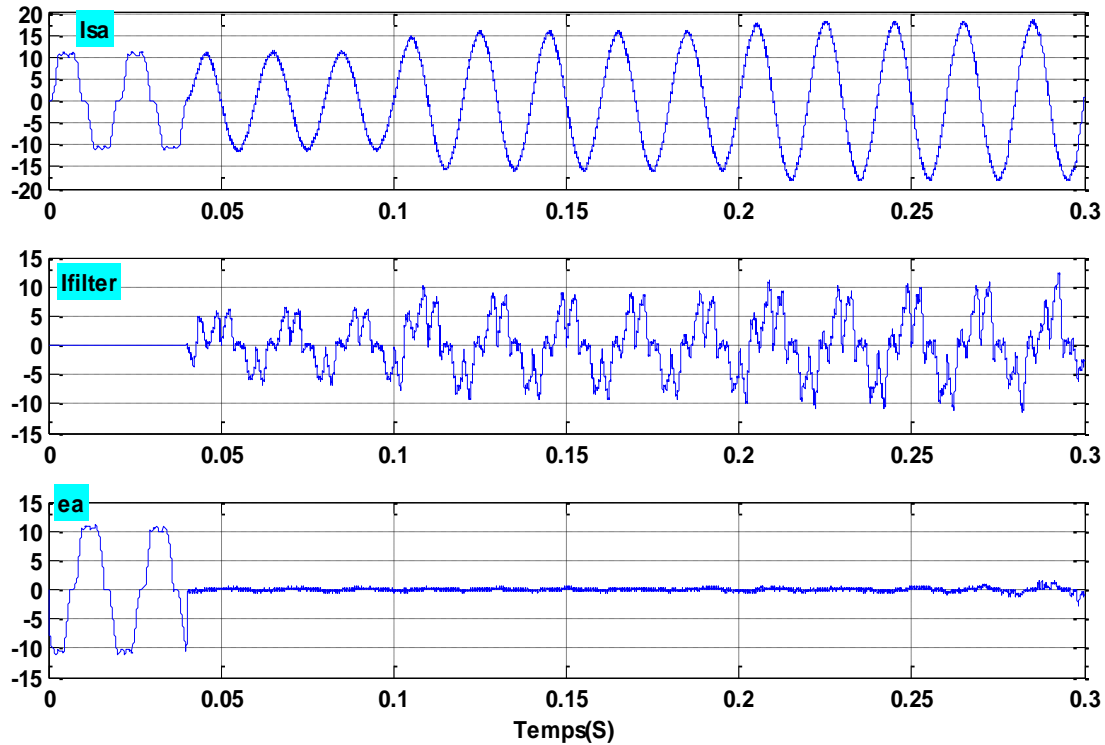


Figure III. 10: Courant de source, Courant de filtre, l'erreur  $e_a$

$$u_a = \frac{u_{dc}(2j_a - j_b - j_c)}{3}$$

$$u_b = \frac{u_{dc}(-j_a + 2j_b - j_c)}{3}$$

$$u_c = \frac{u_{dc}(-j_a - j_b - 2j_c)}{3}$$

La fonction de commutation  $j_i=1$  lorsque l'IGBT du pont supérieur de la phase  $i$  est fermé et que le pont inférieur est ouvert. À l'inverse,  $j_i=0$  lorsque l'IGBT du pont supérieur de la phase  $i$  est ouvert et que le pont inférieur est fermé.

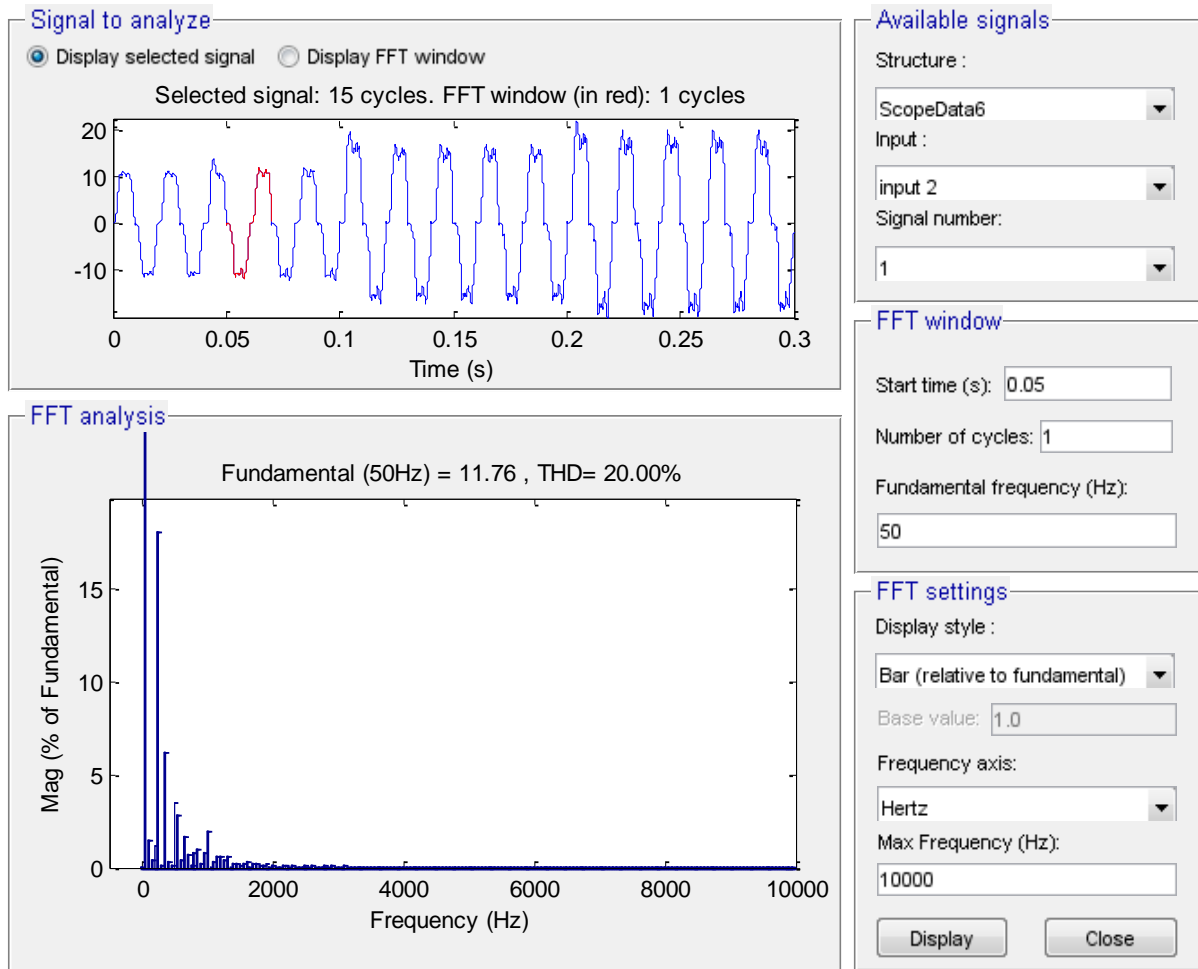


Figure III. 11: THD de la charge

La plage de fréquence pour l'évaluation du THD Fig. (III-III11) est augmentée à 10 000 afin d'inclure les composantes HF. Le THD du la charge est de 20,00 %

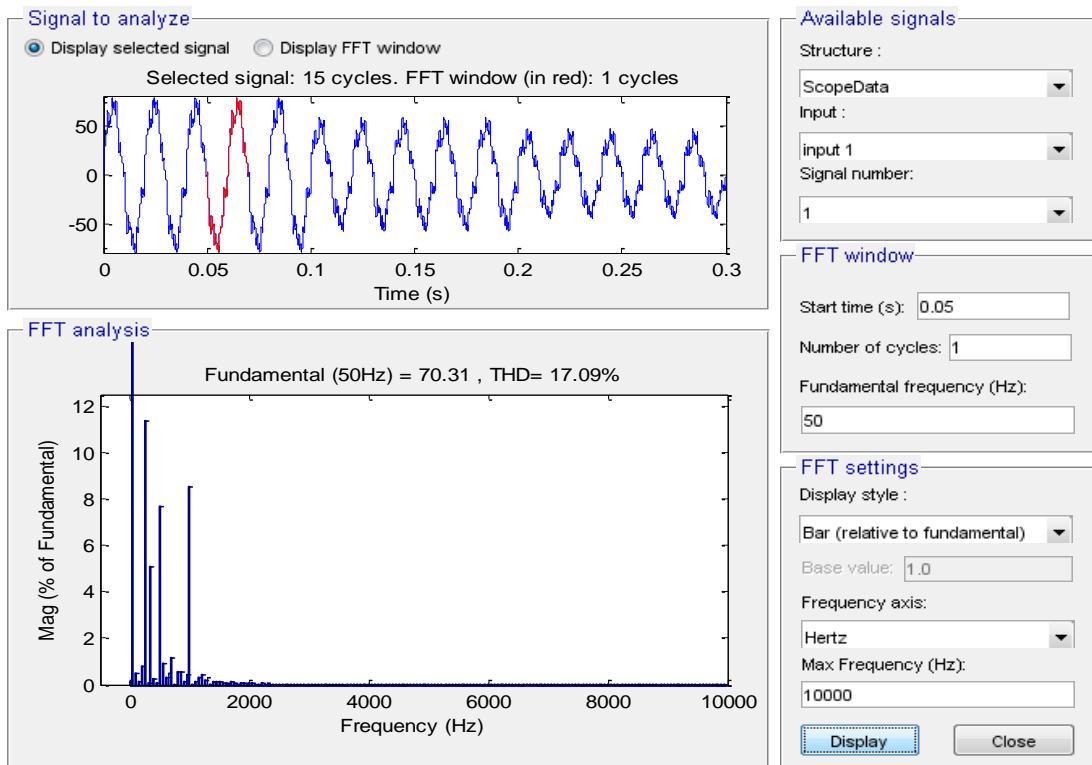


Figure III. 12: THD sur le point de connexion avant la compensation

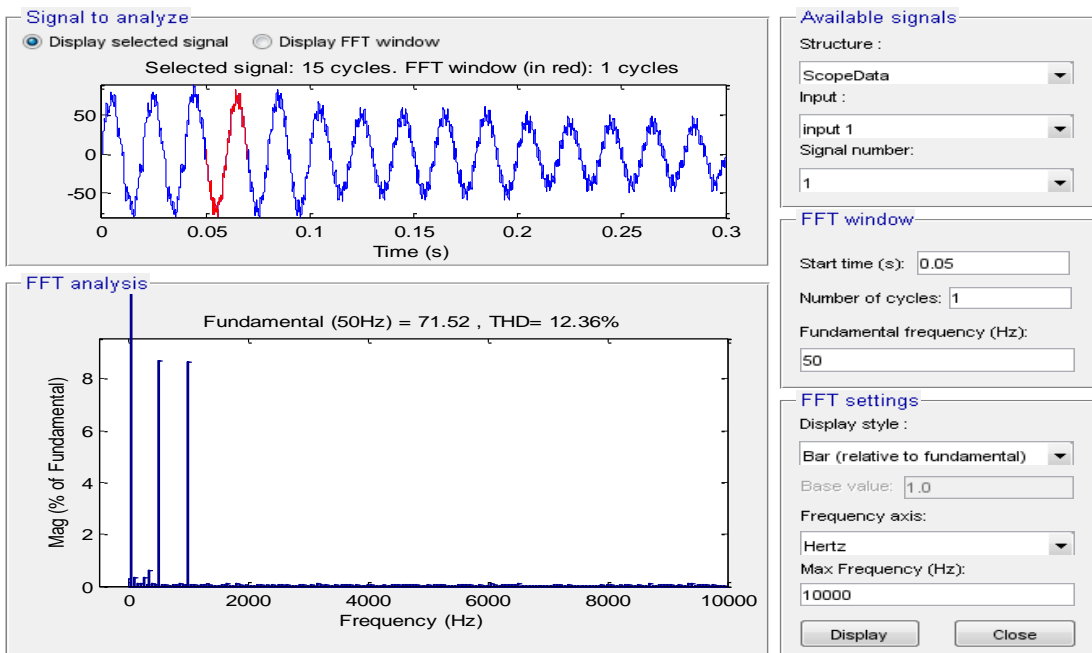


Figure III. 13: THD sur le point de connexion avec mode glissant

Les figures. (III-12, III-13) représentent les formes d'onde de la tension de filtre avant et après réglage par mode glissant. Le THD du point de connexion du filtre actif de parallèle (APF) est également réduit de 17.09% à 12.36%.



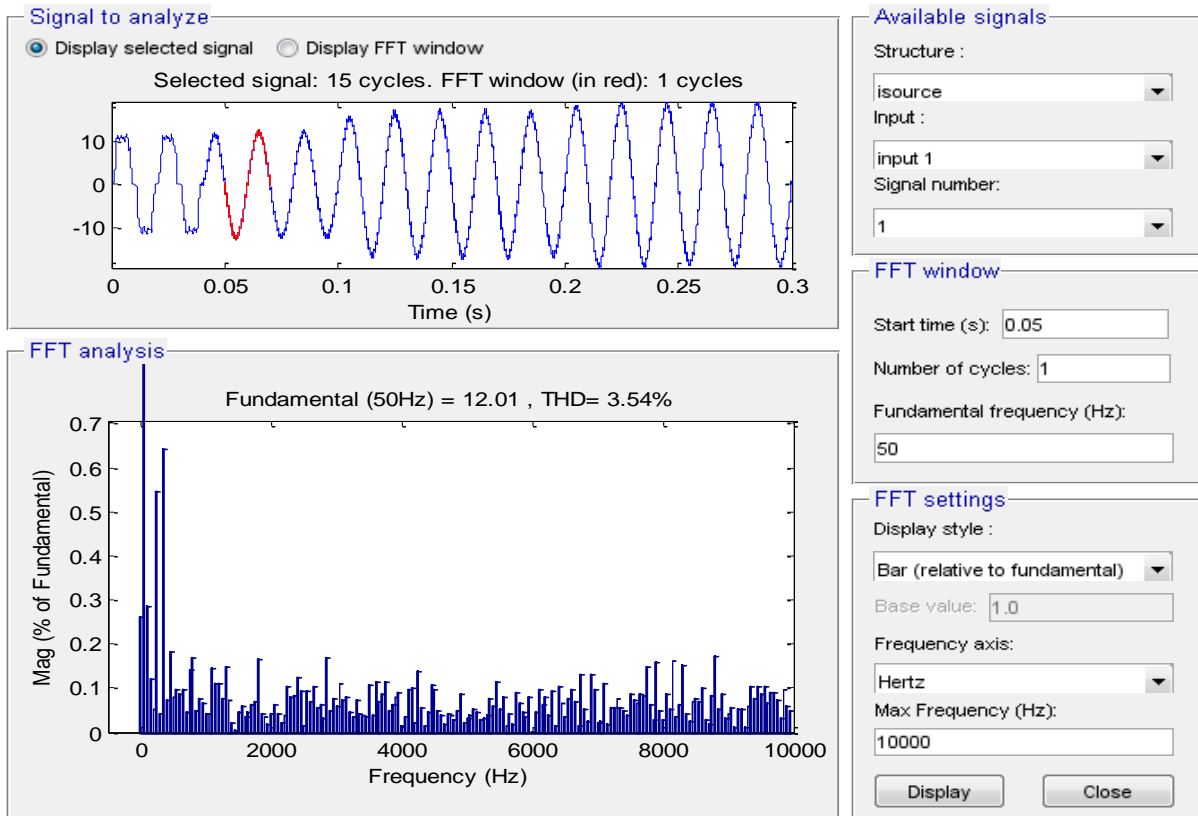


Figure III. 14: THD de courant de source avec hystérésis

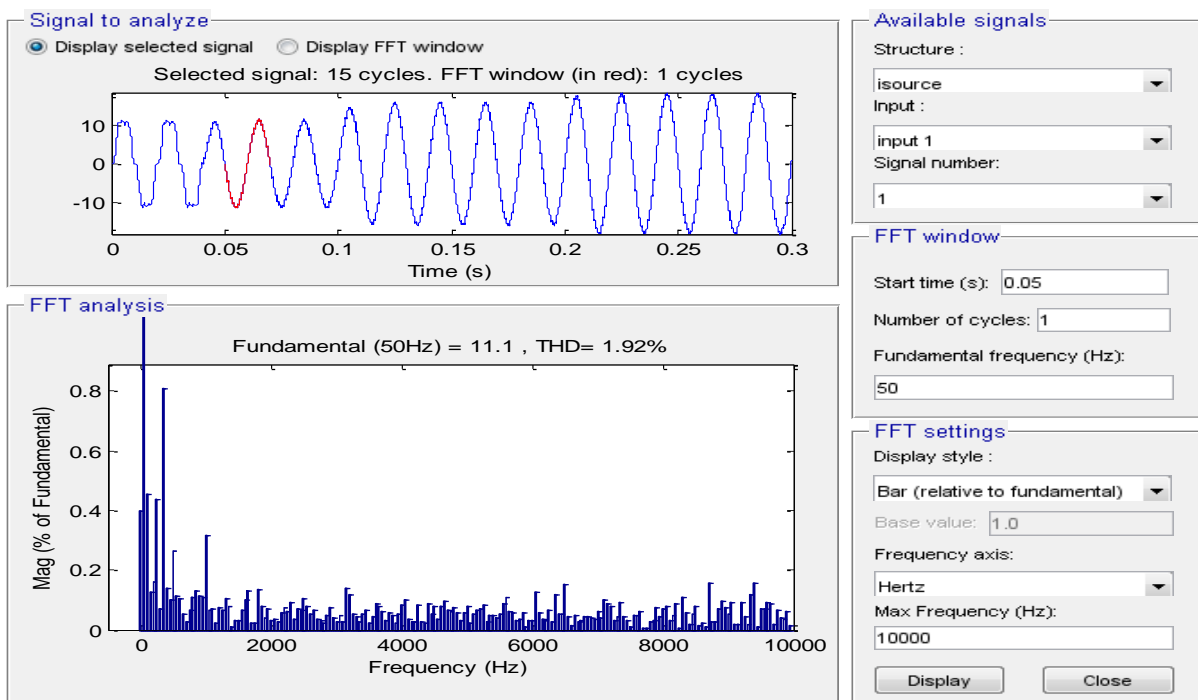


Figure III. 15: THD de courant de source avec mode glissant

Les résultats de l'analyse harmonique sont présentés dans la Fig. (III-12) et la Fig. (III-13) est une comparaison de l'effet de compensation harmonique entre la méthode de comparaison à hystérésis et la méthode de contrôle en mode glissant intégral.

Le THD du courant d'alimentation est égale à 3,54% en utilisant le contrôle indirect du courant avec la méthode de comparaison à hystérésis, le THD du courant d'alimentation est réduit à 1,92% en appliquant le contrôleur en mode glissant conçu. Le THD du point de connexion de l'APF est également réduit de 17.09% à 12.36%.

Donc le filtre actif de puissance contrôlé par courant indirect avec le contrôleur en mode glissant présente un meilleur effet de compensation harmonique.

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre la commande par mode glissant 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 présenté une excellente performance en termes de réduction harmonique, ainsi qu'une amélioration significative du taux de distorsion harmonique (THD). Le contrôleur de mode glissant a réussi à compenser la plupart des harmoniques présents dans le courant, ce qui confirme son efficacité en termes de compensation.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Ce mémoire vise à présenter une étude théorique sur l'application de la commande par mode glissant à un filtre contrôlé par courant indirect, avec une simulation.

Le premier chapitre examine l'état actuel des convertisseurs DC/AC, en mettant l'accent sur les onduleurs. On y présente leur fonctionnement de base, les différentes classifications d'onduleurs et leurs principales utilisations. Les avantages et les inconvénients de chaque type d'onduleur sont soulignés. Ensuite, l'attention se porte sur l'onduleur de courant, en abordant les origines des harmoniques et les différentes méthodes de filtrage pour atténuer ces harmoniques. Enfin, une étude approfondie du filtre actif parallèle est réalisée, car il est utilisé pour compenser les perturbations de courant telles que les harmoniques et les déséquilibres.

Le deuxième chapitre se base sur l'étude de la commande par mode glissant et fournit les détails nécessaires pour concevoir les algorithmes associés. On modélise les systèmes du convertisseur DC/AC et on synthétise la loi de commande. En appliquant cette technique au convertisseur DC/AC utilisé dans un filtre actif parallèle, des résultats prometteurs sont observés. La commande par mode glissant avec une composante intégrale permet de compenser efficacement les harmoniques du courant, améliorant ainsi les performances du système.

Enfin, les résultats de la simulation réalisée sont intéressants, ce qui confirme l'efficacité de cette méthodologie. La suppression des harmoniques et la réduction du taux de distorsion harmonique (THD) contribuent à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, en réduisant les perturbations et en assurant un fonctionnement plus stable du système. L'analyse comparative entre les deux méthodes de commande, à savoir l'hystérésis et le mode glissant, met en évidence la supériorité de la commande par mode glissant à la fois en termes de performances dynamiques de suivi et de robustesse du système régulé face aux perturbations, tout en maintenant un faible taux de distorsion harmonique.

# **Référence bibliographique**

- [1] <https://www.automation-sense.com/blog/electronique/les-convertisseurs-statiques-definition-et-exemples.html> , consulté le 27/06/2015
- [2] H. Saïbi, D. Kassouri, « Commande par mode glissant d'ordre fractionnaire d'un réseau électrique », Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2018
- [3] A. Boukaroura, « Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche bond graph », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Setif, 2009
- [4] S. Fraoun, C. Khadi, Y. Bourouh, « Mise en Œuvre d'algorithme mli vectorielle avec une carte dspace ds 1102 », Mémoire Master Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2008
- [5] E. Boudisa, N.E.H. Gabour, « Génération et implémentation sur FPGA des signaux PWM pour la commande des onduleurs multi-niveaux », Mémoire Master, Université Saad Dahleb, Blida ,2020
- [6] <https://www.everythingpe.com/community/what-is-a-current-source-inverter> , consulté le : 19/01/2023
- [7] Y. Amara, F. Bensiahmed, « commande par mode de glissement d'une source photovoltaïque connectée au réseau à travers un onduleur triphasé », Mémoire Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi ,2020
- [8] <https://fr.scribd.com/document/79778939/ChapitreVI-Les-Onduleurs>, consulté ; 2012
- [9] [https://www.researchgate.net/figure/4-shemas-de-londuleur-triphase-a-deux-niveaux\\_fig4\\_324312074](https://www.researchgate.net/figure/4-shemas-de-londuleur-triphase-a-deux-niveaux_fig4_324312074), consulté le : 06/2009
- [10] Z. Ayachi, K. Djotni, « Etude et simulation d'onduleur de tension triphasé », Mémoire Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2021
- [11] O. Harici, « Etude d'un filtre actif à commande Intelligente », Mémoire de Magister, Université des sciences et Technologie, Oran, 2012
- [12] A. Sahli, « Filtrage actif et contrôle de puissances application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau. », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Setif, 2012

[13] [https://www.researchgate.net/figure/Raccordement-dun-filtre-passif\\_fig1\\_344798228](https://www.researchgate.net/figure/Raccordement-dun-filtre-passif_fig1_344798228) ,

Consulté le : 06/2014

[14] L. Ben Daoud, S. Mehda, « Filtrage actif et filtrage passif des courants harmoniques », Mémoire Master, Université Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued, 2020

[15] M. Selka et A. Taleb, « Etude et Simulation d'un filtre actif de puissance hybride constitué d'un filtre actif de puissance série associé à un filtre de puissance passif », Mémoire Master, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2022

[16] Muhammad H. Rashid, « Power\_Electrnics\_Handbook », 3<sup>ème</sup> Edition, pp.1230, Université de Florida, 2011

[17] I. Ghadbane, « Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs », Mémoire Magister, Université Mohamed Kheider, Biskra, 2011

[18] M. Yettou, N. Debla, « Commande d'un Filtre actif parallèle à trois niveaux (NPC) par différentes stratégies de commande », Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf, M'Sila, 2018

[19] H. Shixi, F. Juntao, « Adaptive fuzzy backstepping control of three-phase active power filter », Control Engineering Practice, vol 45, pp 12-21, 2015

[20] H. Talhaoui, « Contrôle par mode glissant : Observation et estimation paramétrique d'une machine à induction avec défauts », Thèse doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2016

[21] M. Labdani, « Commande par mode glissant des convertisseurs de puissance », Mémoire Master, Université Larbi Ben M'Hidi, Oum El Bouaghi, 2016

[22] B. Kalache, N. Hami, « Commande d'un VSC d'un réseau résidentiel connecté aux réseaux », Mémoire Master, Université Yahia Fares, Medea, 2020

[23] A. Said, H. Si Mohamed, « Commande de la Machine Asynchrone par mode glissant », Mémoire Master, Université Belhadj Bouchaïb, Ain Temouchent, 2017

[24] A. Saiad, « Commande à structure variable d'un système d'entraînement asynchrone », Mémoire de Magister, Université Batna, 2001

- [25] A. Merameria, R. Hamma, « Commande des Convertisseurs DC-DC par Mode Glissant », Mémoire Master, Université Larbi Tébessi, Tébessa, 2021
- [26] M. Rabiâ Benayache, « Contribution à la commande robuste des systèmes non linéaires incertains : application à un système hydraulique » Thèse Doctorat, Université de Valenciennes, 2009
- [27] M. Serhane, Y. Merrouche, « Commande par mode glissant d'un système photovoltaïque connecté à un réseau monophasé via double étages » Mémoire Master, Université Mohamed Seddik Benyahia, Jijel, 2020
- [28] M. Nouadja, L. Chacha, « Commande par mode glissant appliquée à un système électro-énergétique », Mémoire Master, Université Kasdi Merbah, Ourgla, 2017
- [29] N. Djebbar, A. Benmouna, « Commande par mode glissant d'un redresseur à MLI triphasé », Mémoire Master, Université Abderahmane Mira, Bejaia, 2015
- [30] <https://www.semanticscholar.org/paper/La-commande-par-mode-glissant-%3A-application-%C3%A0-la-%C3%A0-KechichMazari/30c07187dd4152a5f7b06230c54daef/e5766d6f0/figure/1>, consulté le : 2008
- [31] H. Bühler, « Réglage par mode de glissement », 1ère édition, Presses Polytechniques Romandes Lausanne, pp4, 1986
- [32] F. Juntaeo, « Advanced Design and Control of Active Power Filters », Nova science publishers, New York, pp147, 2013