

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

Référence : ...../MM/ 2023

المرجع : ...../م / 2023

## Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Réalisé par :

Bouguernine Rabia

## Thème

**Etude et simulation du redresseur MLI en absorption  
sinusoïdale de courant**

Soutenu le: ...../..../2023

Devant le Jury composé de :

Mr : Ladjouzi Samir.....	M.C.B.	Univ. Bouira	Président
Mellah Hacene .....	M.C.A	Univ. Bouira	Rapporteur
Aggoun Ghania.....	M.A.A	Univ. Bouira	Examineur

Année Universitaire: 2022-2023



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

انا الممضي اسفله،

السيدة(ة) نوشر نين زبيجة .....الصفة: طالب، اسكاذ، باحث ..... طالبة  
الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 401358900 .....والصادرة بتاريخ 2022.04.10  
المسجل(ة) بكلية: العلوم و العلوم التطبيقية ..... قسم: الهندسة  
الكهربائية.....

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

عنوانها: Étude et simulation du redresseur  
M.I en Absorption sinusoïdale de courant

تحت إشراف الأستاذ(ة): Sto

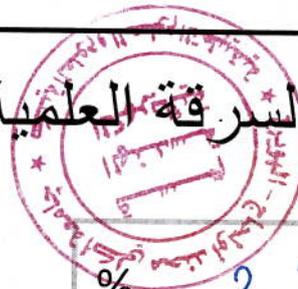
أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية  
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2022.06.18

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرفقة العلمية:

h. Melah  
Sto



% 27

النسبة: itin

الامضاء:

## ***Dédicaces***

*Ce travail est dédié à mes très chers parents au quels je dois ce que je suis que dieu vous protège*

*A mes chers frères, KHALED et KOUCIELA pour leur amour et leur incontestable appui*

*A mon marie YOUNES*

*A tous mes amis : MANEL ;SIHEM et WISSAM.....etc et la liste est bien longue*

*A tout ma famille. Je dédie ce travail à toutes les personnes chères à mon cœur. Quelles trouvent ici l'expression de tout ma gratitude et mon amour.*

*Rabia.*

---

## Remerciements

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

Je tiens à remercier, en premier lieu, Dr. Mellah Hacene, Directeur de ce mémoire pour son dévouement à la réalisation de ce travail ; en m'apporte des orientations, des conseils et des remarques judicieuses.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

Dr. Ladjouzi Samir .

Mr Aggoun Ghania.

Pour avoir accepté de lire et d'évaluer mon travail de recherche, ainsi que pour leur présence.

Un grand merci également à tous les enseignants qui ont assuré notre formation durant ces cinq années.

Et j'exprime mon gratitude à notre encadreur de recherche au niveau de Sonalgaz Mensouri Ahmed de me orienté durant mon stage pratique .

Enfin, j'associe à ces remerciements tous ceux qui ont contribué à réaliser ce travail.

*Rabia.*

## Résumé

ce mémoire fournit une compréhension approfondie du redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) en absorption sinusoïdale de courant. Les généralités sur les convertisseurs statiques et la qualité de l'énergie électrique sont étudiées, ainsi que les principes de fonctionnement et les caractéristiques du redresseur MLI. Les simulations réalisées permettent d'évaluer et de comparer les performances des redresseurs classiques et MLI dans des conditions d'absorption sinusoïdale de courant. Les résultats obtenus sont précieux pour la conception et l'optimisation des redresseurs dans diverses applications, en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et de garantir une meilleure qualité de l'énergie électrique.

**Mots clés :** Redresseur MLI ,absorption sinusoïdale de courant.

# Table des Matières

Remerciements .....	I
Résumé .....	II
Table des Matières .....	III
Liste des Figures.....	IV
Liste des Tableaux.....	V
Listes des Acronymes et Symboles .....	VI

<b>Introduction Générale</b> .....	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## Chapitre 1 : Généralités sur ...

### Chapitre 1:

#### Généralité sur les convertisseurs statiques et sur la qualité d'énergie électrique

<b>1. Introduction</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1. Généralité sur les convertisseurs statiques</b> .....	<b>4</b>
1.1.2. Définitions .....	4
1.1.3. Domaines et des exemples d'application des convertisseurs statique .....	5
1.1.4.1. Les interrupteurs parfaits .....	5
1.1.4.2. Les interrupteurs à semi-conducteurs .....	6
1.2.1.1. Creux et coupures de tension .....	10
1.2.1.2. Surtensions .....	11
1.2.1.3. Variations et fluctuations de tension .....	12
1.2.1.4. Déséquilibre .....	12
1.2.1.5 Harmoniques et inter-harmoniques .....	12
1.2.2 Caractérisation des Harmoniques .....	13
1.2.2.1 Taux Harmonique de Rang n [11] .....	13
1.2.2.2 Taux Global de Distorsion Harmonique [11] .....	14
1.2.2.3 Facteur de Puissance .....	14
1.2.2.4 Facteur de Crête .....	15
1.2.2.5 Sources des harmoniques .....	15

1.2.3 Solution pour le filtrage des harmoniques .....	15
1.2.3.1 Les solutions traditionnelles : filtres passifs .....	16
1.2.3.2 Les solutions modernes : filtres actifs .....	16
1.2.3.3 Redresseurs à absorption sinusoïdale .....	16
<b>I.2.4. Conclusion .....</b>	<b>18</b>

## **CHAPITRE 2 : Généralités sur le redresseur MLI**

<b>1.Introduction .....</b>	<b>20</b>
<b>2. Définition .....</b>	<b>20</b>
<b>3. Structures du redresseur MLI .....</b>	<b>20</b>
3.1. Structure en tension .....	21
3.1. Structure en courant .....	22
<b>4. La différence entre le Redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de courant et de tension .....</b>	<b>22</b>
<b>5. Principe de fonctionnement et Analyse d'un redresseur à MLI .....</b>	<b>22</b>
<b>6. Modélisation du redresseur MLI .....</b>	<b>23</b>
<b>7. Schéma fonctionnel du redresseur MLI.....</b>	<b>25</b>
<b>8. Techniques de commande d'un redresseur MLI .....</b>	<b>26</b>
<b>9. Applications du redresseur MLI .....</b>	<b>26</b>
<b>10. Les principaux avantages des redresseurs à MLI .....</b>	<b>30</b>

## **Chapitre3:**

### **Simulation de redresseur MLI en absorption sinusoïdale de courant.**

<b>1. Introduction .....</b>	<b>31</b>
<b>2. Modélisation d'un redresseur monophasé double alternance .....</b>	<b>31</b>
<b>3. Modélisation du redresseur triphasé.....</b>	<b>33</b>
<b>4. Les résultats de la simulation .....</b>	<b>37</b>
4.1. Redresseur monophasé classique .....	37
4.1.1.Charge résistive .....	38
4.1.2.Charge inductive .....	39
4.2. Redresseur triphasé classique .....	40
4.2.1.Charge résistive .....	41

<b>4.2.2.Charge inductive</b>	<b>42</b>
4.3. Redresseur monophasé MLI en absorption sinusoïdale de courant .....	43
<b>4.3.1.Charge résistive</b>	<b>44</b>
<b>4.3.2.Charge inductive</b>	<b>45</b>
4.4. Redresseur triphasé MLI en absorption sinusoïdale de courant .....	46
<b>5. Résultats de simulation de THD pour les redresseurs monophasé et triphasé (classique et MLI en absorption sinusoïdale de courant)</b>	
<b>6. Conclusion .....</b>	<b>49</b>
<b>Conclusion Générale</b>	<b>50</b>
<b>Références</b>	<b>51</b>
<b>Annexe</b>	

## Liste des Figures

Fig.1.1.	Les différents types de conversion possible et le nom usuel des convertisseurs suivant leur fonction.	3
Fig.1.2.a.	Caractéristique d'un interrupteur ouvert	6
Fig.1.2.b.	Caractéristique d'un interrupteur fermé.	6
Fig.1.3.	Structure, Symbole, Caractéristiques réelle et idéale d'une diode à jonction PN	7
Fig.1.4.	Structure, Symbole, Caractéristiques réelle et idéale d'un thyristo	7
Fig.1.5.	Différentes représentations des thyristors sur le marché	8
Fig.1.6.	Structure d'un transistor MOSFET à canal N et à enrichissement, Symbole, Caractéristique	8
Fig.1.7.	Structure d'un transistor IGBT, Symbole et Caractéristiques	9
Fig.1.8.	Symboles, Caractéristiques réelle et idéale d'un Thyristor GTO	9
Fig.1.9.	Creux et coupures de tension	11
Fig.1.10.	Spectre de fréquences d'un courant non-sinusoïdal	14
Fig.1.11.	a) filtre passe bande, b) passe haut 1er ordre, c) passe haut 2eme ordre	16
Fig.1.12.	Redresseur triphasé a injection de courant	17
Fig.1.13.	Redresseur monophasé à absorption sinusoïdale par correction du facteur de puissance	18
Fig.1.14.	Schéma d'un redresseur à MLI	18
Fig.2.1.	Schéma de principe du redresseur MLI	21
Fig.2.2.	Topologie de base d'un redresseur MLI de tension	21
Fig.2.3.	Topologie de base d'un redresseur MLI de courant	22
Fig.2.4.	Schéma unifilaire d'un pont de redresseur connecté au réseau	24
Fig.2.5.	Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI	24
Fig.2.6.	Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans les coordonnées triphasées	26
Fig.2.7.	Liaison entre un système à 50Hz et un système à 60Hz	27
Fig.2.8.	Redresseur à MLI dans les variateurs de vitesse 23	28
Fig.2.9.	Eolienne à vitesse variable basée sur une GAS	28
Fig.2.10.	Eolienne à vitesse variable à base de la GS	29
Fig.2.11.	Eolienne à vitesse variable à base de la GADA	29
Fig.3.1.	Circuit de puissance d'un redresseur monophasé	32
Fig.3.2.	Schéma de principe d'un redresseur triphasé	34
Fig.3.3.	Schéma de principe d'un réseau d'alimentation triphasé	34
Fig.3.4.	Schéma du convertisseur AC/DC triphasé	35
Fig.3.5.	Schéma de principe du bloc charge	36

Fig.3.6.	schéma de bloc de la simulation d'un redresseur monophasé classique	37
Fig.3.7.	Courant de source et son spectre d'harmoniques	38
Fig.3.8.	Allure de courant et de tension sortie	38
Fig.3.9.	Courant de source et son spectre d'harmoniques	39
Fig.3.10.	Allure de courant et de tension sortie	39
Fig.3.11.	Schéma de bloc de la simulation d'un redresseur triphasé classique	40
Fig.3.12.	Courant de source et son spectre d'harmoniques	41
Fig.3.13.	Allure de courant et de tension sortie	41
Fig.3.14.	Courant de source et son spectre d'harmoniques	42
Fig.3.15.	Allure de courant et de tension sortie	42
Fig.3.16.	Schéma de bloc de la simulation d'un redresseur monophasé MLI en absorption sinusoïdale se courant	43
Fig.3.17.	Courant de source et son spectre d'harmoniques	44
Fig.3.18.	Allure de courant et de tension sortie	44
Fig.3.19.	Courant de source et son spectre d'harmoniques	45
Fig.3.20.	Allure de courant et de tension sortie	45
Fig.3.21.	Schéma de bloc de la simulation d'un redresseur triphasé MLI en absorption sinusoïdale se courant	46
Fig.3.22.	Courant de source et son spectre d'harmoniques	47
Fig.3.23.	Allure de courant et de tension sortie	47
Fig.3.24.	Courant de source et son spectre d'harmonique	48
Fig.3.25.	Allure de courant et de tension sortie	48

## Liste des Tableaux

Tableau3.1 : THD(%) pour différents types de redresseurs et charges .....49

# Listes des Acronymes et Symboles

- **Acronymes**

MLI	Modulation de largeur d'impulsion
GTO	Gate-Turn-Off Thyristors
IGBTs	Insulated Gate Bipolar Transistors
MOSFETs	Metal-Oxyde-Semiconducteur
BJs	Bipolar Junction Transistors
MCTs	MOS-Controlled Thyristors
DPC	Direct Power Control
VOC	Voltage Oriented Control
VFOC	Virtual Flux Oriented Control
VF-DPC	Virtual flux based direct power control
THD	Temps distortion harmonique

## **Introduction Générale**

La plupart des convertisseurs statiques, tels que les variateurs de vitesse industriels, sont généralement alimentés à partir du réseau électrique via un pont de diodes. Ce schéma présente l'avantage d'être simple et peu coûteux. Cependant, en ce qui concerne la qualité de l'énergie électrique, il engendre une perturbation harmonique qui se propage dans le réseau. De nos jours, la qualité de l'onde électrique est une préoccupation majeure pour les fournisseurs d'énergie électrique. C'est pourquoi la famille des redresseurs à commande MLI (modulation de la largeur d'impulsion) est de plus en plus utilisée comme une solution alternative dans les applications industrielles et les connexions au réseau électrique. Les utilisateurs de cette technologie apprécient ses avantages [1].

Le développement de technologies efficaces de conversion d'énergie est essentiel pour répondre aux besoins croissants en électricité et pour promouvoir l'utilisation de sources d'énergie renouvelables. Parmi les différentes techniques de conversion d'énergie, le redresseur MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) en absorption sinusoïdale de courant se démarque par sa capacité à fournir une tension continue à partir d'une source alternative tout en réduisant les distorsions harmoniques.

Dans ce mémoire nous sommes intéressés à l'étude approfondie et à la simulation du redresseur MLI en absorption sinusoïdale de courant. L'objectif principal de cette recherche est d'analyser les performances de ce redresseur et d'explorer les possibilités d'optimisation des paramètres afin d'améliorer son efficacité énergétique et sa qualité de sortie.

Le redresseur MLI est un dispositif électronique utilisé pour convertir l'énergie électrique alternative en courant continu. Il est largement utilisé dans diverses applications, telles que les systèmes d'alimentation électrique, les systèmes de conversion d'énergie renouvelable et les systèmes de transmission et de distribution d'énergie.

L'absorption sinusoïdale de courant est une technique de commande spécifique appliquée aux redresseurs MLI pour obtenir une forme d'onde de courant d'entrée sinusoïdale, similaire à celle d'un courant alternatif idéal. Cette technique offre une solution efficace pour réduire à la fois les harmoniques et les distorsions présentes dans le courant d'entrée, améliorant ainsi la qualité de l'alimentation électrique et réduisant les perturbations électromagnétiques.

Le travail de ce mémoire, contient trois chapitres

Dans le premier chapitre, nous avons abordé de manière générale les convertisseurs statiques et étudié la qualité de l'énergie électrique. Nous avons examiné les perturbations électriques, les problématiques liées aux harmoniques et les conséquences néfastes de ces dernières.

Dans le deuxième chapitre commence par une généralité sur les redresseurs à MLI, ce que nous avons abordé les différents types de redresseur à MLI (redresseur à MLI de courant ou de tension),

la structure et le principe de fonctionnement, les techniques de commande de la MLI, ensuite Les applications modernes du redresseur à MLI

Le dernier chapitre propose une synthèse et une analyse approfondie des résultats obtenus à partir des simulations réalisées.

Enfin, nous concluons avec une section générale qui offre une vue d'ensemble en résumant les principaux résultats et les conclusions que nous avons tirées tout au long de notre étude.

## Chapitre 1:

# Généralité sur les convertisseurs statiques et sur la qualité d'énergie électrique

### 1. Introduction :

La fonction des convertisseurs statiques est d'adapter la source d'énergie aux exigences de la charge. Pour cela, ils sont amenés à modifier les caractéristiques des grandeurs transmises (tension, fréquence...) voire même à changer la forme de l'énergie (continu, alternatif...), et ce suivant le type de machine à commander et la nature de la source de puissance.

Classifications des convertisseurs

On définit quatre classes de convertisseurs transformant directement l'énergie électrique:

- Redresseurs,
- Hacheurs,
- Onduleurs,
- Cyclo- convertisseurs ou gradateurs

Il existe plusieurs familles de convertisseurs statiques comme signalé sur (la figure 1.1).

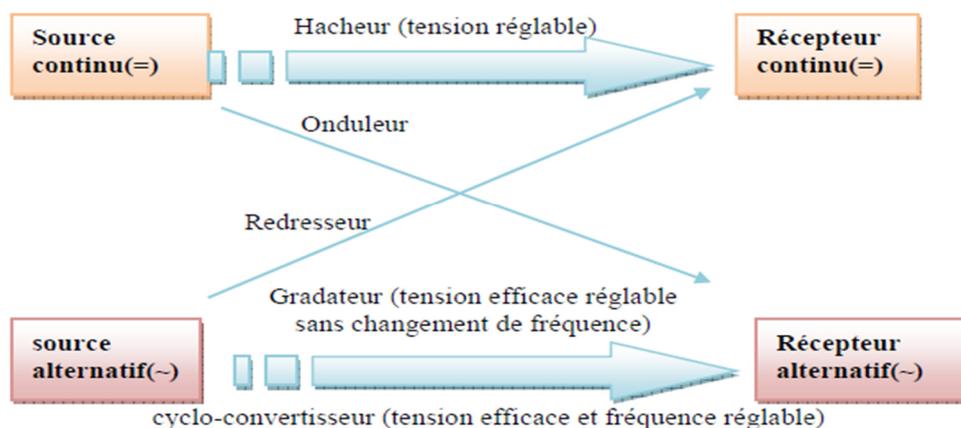


Figure 1.1 : Les différents types de conversion possible et le nom usuel des convertisseurs suivant leur fonction.

La qualité de l'énergie électrique est un aspect crucial pour tous les intervenants du secteur énergétique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs ou consommateurs d'électricité.

La qualité de l'énergie est un concept vaste qui englobe plusieurs aspects tels que l'approvisionnement en électricité, la stabilité de la tension, et l'amélioration de la qualité du

courant. Récemment, la qualité énergétique des réseaux de distribution est devenue une préoccupation croissante. Cela revêt une grande importance non seulement pour les opérateurs de réseaux, mais également pour les fournisseurs d'énergie électrique [2]

L'énergie électrique est fournie sous forme de tensions formant un système sinusoïdal triphasé, dont les paramètres caractéristiques sont [3]

- La fréquence.
- L'amplitude des trois tensions.
- La forme d'onde. qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- Le déséquilibre. La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules.

## **1.1. Généralité sur les convertisseurs statiques :**

### **1.1.2. Définitions :**

#### **1.1.2.1. Un convertisseur statique :**

Un convertisseur statique est un système qui permet d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur spécifique. C'est un dispositif qui transforme l'énergie électrique disponible en une forme appropriée pour alimenter une charge donnée.

#### **1.1.2.2. L'énergie électrique :**

L'énergie électrique peut être fournie soit sous forme alternative, c'est-à-dire à travers un réseau de distribution électrique ou un alternateur, soit sous forme continue, comme une batterie d'accumulateurs, une génératrice à courant continu ou une alimentation par caténaire.

#### **1.1.2.3. Les redresseurs :**

Ce sont des convertisseurs alternatif-continu qui permettent de convertir une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle, s'ils sont commandés la valeur moyenne de la tension obtenue est alors réglable.

#### **1.1.2.4. Les hacheurs :**

Les hacheurs sont des convertisseurs continu-continu qui permettent de délivrer une tension continue réglable à partir d'une tension continue de valeur fixe. Ils jouent le rôle d'un transformateur à courant continu en adaptant la tension d'entrée à la tension souhaitée pour alimenter la charge.

#### **1.1.2.5. Les onduleurs :**

Les onduleurs sont des convertisseurs continu-alternatif. Ils permettent de convertir une tension continue en une tension alternative. Ils sont utilisés pour fournir une alimentation électrique alternative à partir d'une source continue, ce qui les rend essentiels dans de nombreuses applications.

#### **1.1.2.6. Les gradateurs :**

Ce sont des convertisseurs alternatif-alternatif (ou convertisseur de fréquence), c'est-à-dire qu'il permet la conversion d'une tension alternative d'une fréquence donnée en tension alternative d'une autre fréquence.

### **1.1.3. Domaines et des exemples d'application des convertisseurs statique :**

Les convertisseurs statiques sont utilisés dans une très large gamme d'applications telle que :

#### **•Applications domestiques :**

(Alimentation des appareils électriques, électroménagers)

#### **•Locaux commerciaux et tertiaires :**

(Chauffage, Ventilation, Climatisation, Caisses enregistreuses, Eclairage, Onduleur de secours, Ordinateurs et équipement de bureaux, Ascenseurs).

#### **•Société :**

(Eclairage public, Publicité lumineuse, Emetteurs de radiodiffusion et télévision, Journaux électriques)

#### **•Application industrielles :**

(Alimentation de pompes, chariots électrique, compresseur)

#### **•Télécommunications :**

(Émetteur de radiodiffusion, onduleur de secours et alimentation de secours (AC et DC))

#### **•Autres applications :**

Les convertisseurs statiques sont également utilisés dans d'autres domaines tels que :

Aéronautique, transport terrestre et maritime, sociétés de production et de distribution d'électricité, espaces culturels et de loisirs (monuments, scènes, théâtres, discothèques, etc.), équipements de laboratoire et médecine.

Il existe également des applications allant de quelques watts (alimentations à découpage) à des milliers de mégawatts (connexions CC haute tension).

### **1.1.4. Les interrupteurs de l'électronique de puissance :**

#### **1.1.4.1. Les interrupteurs parfaits :**

Un interrupteur parfait possède deux états : "Ouvert (OFF)" et "Fermé (ON)", comme noter la figure 1.2.a et 1.2.b.

**1.1.4.1.1. Interrupteur ouvert** (position OFF :  $i = 0$ ) :

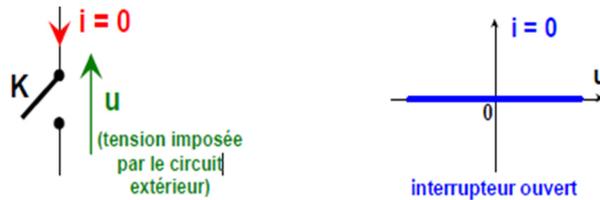


Figure 1.2.a : Caractéristique d'un interrupteur ouvert.

**1.1.4.1.2. Interrupteur fermé** (position ON :  $u = 0$ ) :

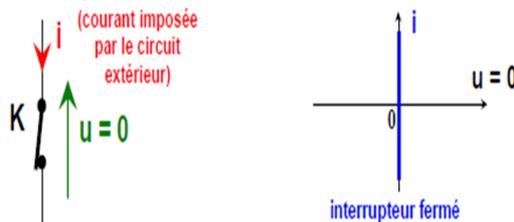


Figure 1.2.b : Caractéristique d'un interrupteur fermé.

**1.1.4.2. Les interrupteurs à semi-conducteurs :**

Dans ce chapitre, nous allons présenter de manière claire les caractéristiques externes essentielles des composants, en les regroupant en trois catégories distinctes :

**1. Les diodes :**

Sont représentées dans la figure ci-dessous, montrant les différents types de diodes, leur symbole et leur caractéristique statique  $i_D = f(V_D)$ . Lorsque la diode est polarisée en direct, elle commence à conduire à partir d'une tension de seuil directe relativement faible, d'environ 1V. Lorsque la diode est polarisée en inverse, seul un courant de fuite négligeable, de l'ordre de quelques mA, circule jusqu'à ce que la tension d'avalanche soit atteinte. Il est important de noter que, dans un fonctionnement normal, la tension inverse ne doit pas atteindre la tension d'avalanche.

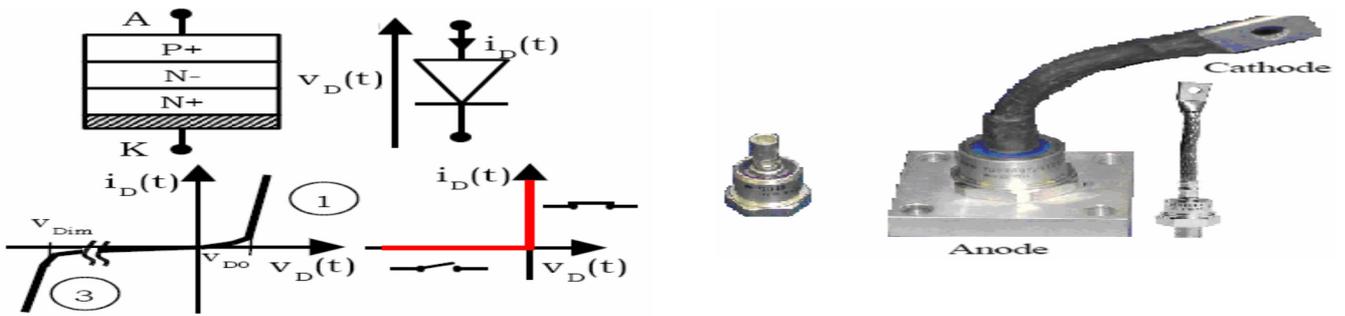


Figure 1.3 : Structure, Symbole, Caractéristiques réelle et idéale d'une diode à jonction PN.

## 2. Thyristors :

La description du thyristor et de sa caractéristique statique  $i_A=fv(t)$  est présentée dans la figure 4. Le courant principal circule de l'anode (A) vers la cathode (K). En polarisation directe, le thyristor a deux états en fonction de s'il est commandé ou non. Dans l'état off, il peut supporter une tension directe positive sans conduire, tel que représenté dans la figure 1.4.

Lorsque le thyristor est polarisé en direct et qu'une impulsion de courant positive est appliquée sur la gâchette (G), il peut être placé dans l'état on. La caractéristique  $i_A=fv(t)$  résultante est décrite dans la figure 1.4 pour cet état.

Une fois que le thyristor commence à conduire, le courant de gâchette peut être annulé. À ce moment-là, la gâchette ne peut plus mettre le thyristor dans l'état off, et il se comporte alors comme une diode. Il ne se bloque que lorsque le courant  $i_A$  s'annule.

En polarisation inverse, lorsque la tension est inférieure à la tension d'avalanche inverse, seul un courant de fuite négligeable circule dans le thyristor.

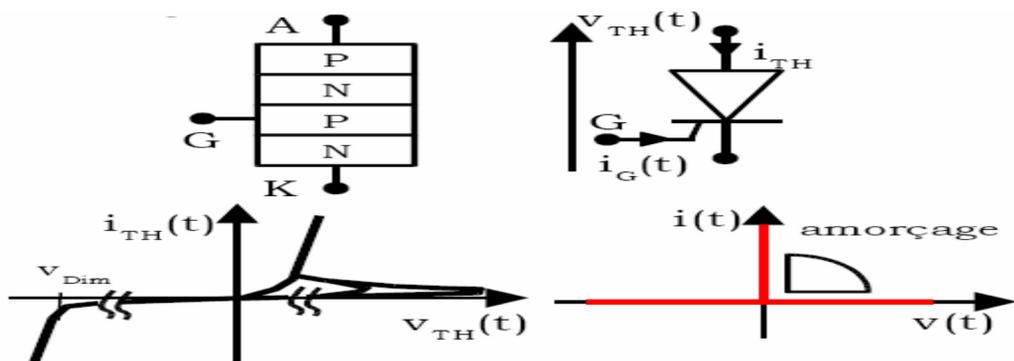


Figure 1.4 : Structure, Symbole, Caractéristiques réelle et idéale d'un thyristor.

La figure 1.5 présente différents types de conceptions de thyristors, tels qu'indiqués dans les documentations des fabricants de composants.



Figure 1.5 : Différentes représentations des thyristors sur le marché

### 3. Transistor MOSFET :

Le transistor MOSFET est un dispositif d'interrupteur unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Il offre l'avantage d'une commande relativement simple qui nécessite peu de puissance.

En électronique de puissance, il est largement utilisé comme élément de commutation, ce qui lui confère deux états distincts.

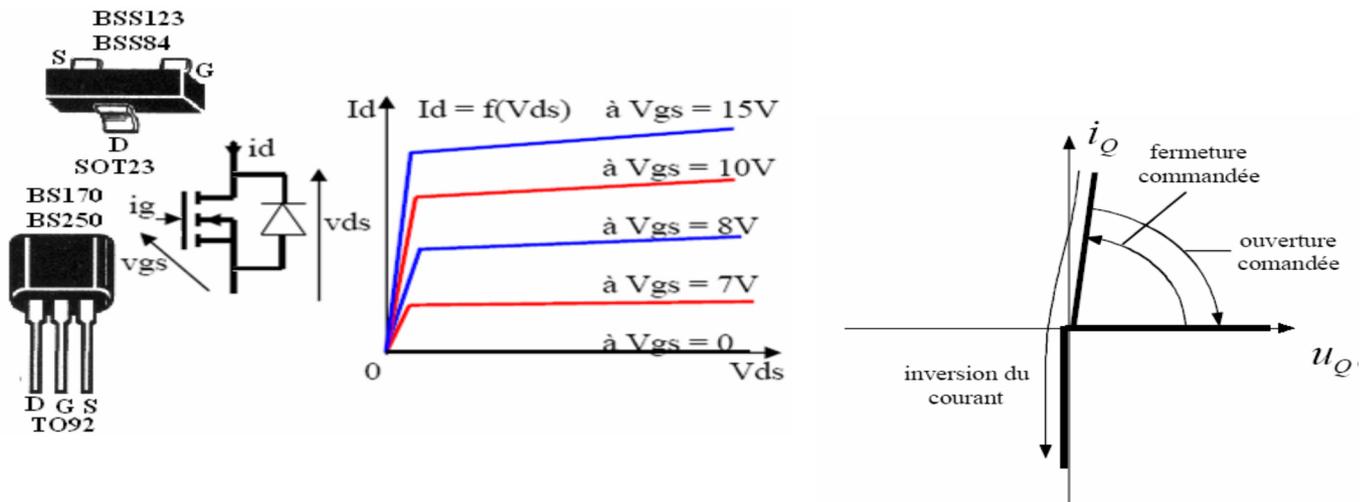


Figure 1.6 : Structure d'un transistor MOSFET à canal N et à enrichissement, Symbole, Caractéristique.

### 4. Transistors IGBT :

Les IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) sont largement utilisés dans les systèmes de conversion depuis les années 1990. Ils sont principalement utilisés dans les applications de moyenne et forte puissance.

Les IGBT sont des composants commandés en tension, et leur processus d'amorçage est similaire à celui des transistors MOSFET. Ces composants sont de plus en plus couramment employés dans les systèmes modernes de traitement de l'énergie électrique, tels que les onduleurs, les redresseurs MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), les convertisseurs multi-niveaux, et bien d'autres.

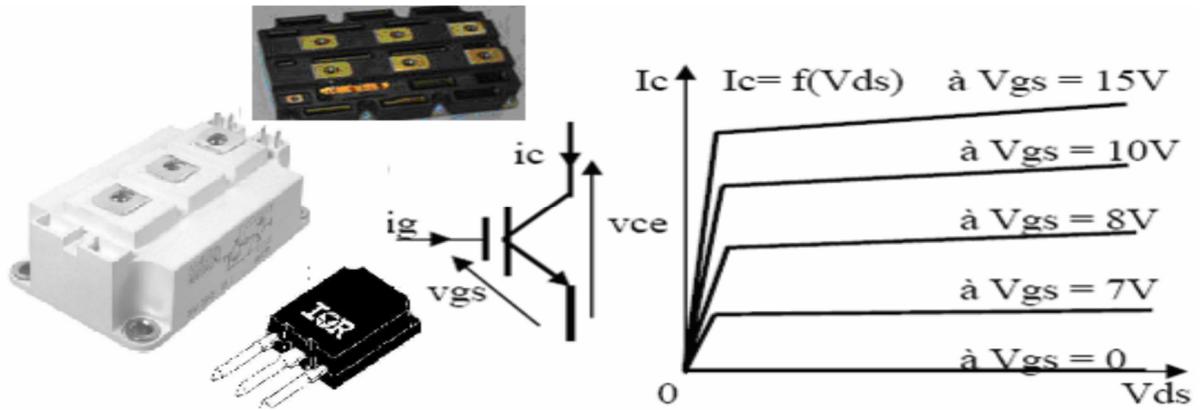


Figure 1.7 : Structure d'un transistor IGBT, Symbole et Caractéristiques.

### 5. Thyristors GTO :

Comparativement au thyristor classique, le thyristor GTO (Gate Turn-Off) offre la particularité d'être commandable à l'ouverture grâce à un courant négatif,  $i_G$ . Contrairement aux transistors précédents, ce composant est entièrement commandable et est constitué de trois segments.

Du point de vue de sa commande, la gâchette du thyristor GTO est constamment traversée par le courant  $i_G$  pendant la phase de conduction, ce qui rend sa commande plus complexe par rapport aux composants à grille isolée.

Un autre inconvénient du thyristor GTO est la présence de pertes importantes lors de l'ouverture, ce qui peut entraîner une inefficacité énergétique.

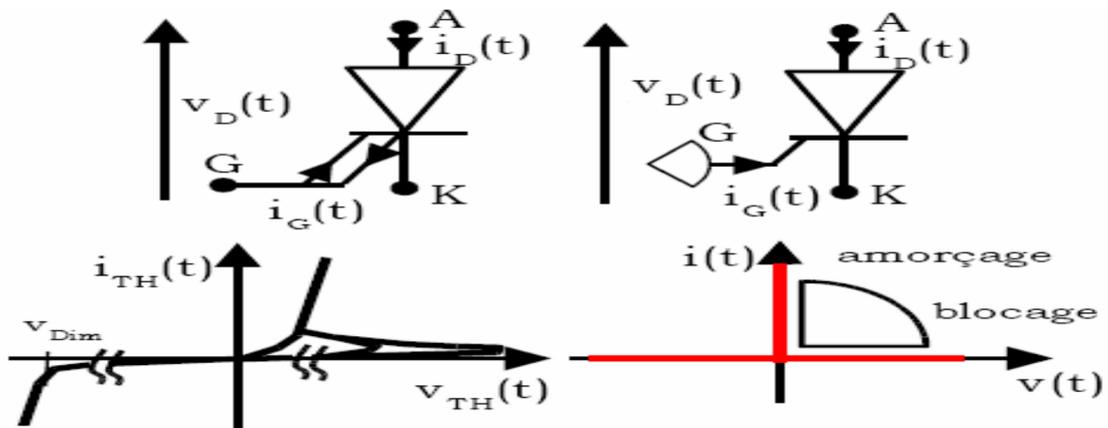


Figure 1.8 : Symboles, Caractéristiques réelle et idéale d'un Thyristor GTO.

#### I.1.5. Critères de sélection des interrupteurs électroniques [4]:

Dans la conception de convertisseurs de haute puissance, on utilise généralement des composants bipolaires tels que le thyristor GTO ou l'évolution du thyristor appelée ETO. En revanche, pour les applications à haute fréquence, des composants unipolaires tels que les transistors MSFET sont nécessaires. Pour les fréquences intermédiaires, on utilise des composants mixtes tels que l'IGBT ou l'IEGT.

**L'importance des convertisseurs statiques dans la qualité de l'énergie électrique :**

La qualité de l'énergie électrique est cruciale pour garantir le bon fonctionnement des systèmes électriques et la protection des équipements connectés. Les convertisseurs statiques, tels que les redresseurs, les hacheurs, les onduleurs et les gradateurs, jouent un rôle essentiel dans cette relation. Ils permettent de transformer l'énergie électrique d'une forme à une autre, adaptant ainsi la source d'énergie aux besoins spécifiques des charges connectées. Cependant, ces convertisseurs peuvent également introduire des perturbations électriques indésirables, telles que des harmoniques, des creux de tension ou des surtensions. Pour atténuer ces perturbations, diverses solutions de filtrage, comme les filtres passifs ou actifs, peuvent être utilisées. Ces dispositifs jouent un rôle crucial dans la réduction des harmoniques indésirables et l'amélioration globale de la qualité de l'énergie électrique, garantissant ainsi un fonctionnement fiable et efficace des systèmes électriques.

## **1.2. QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE :**

### **1.2.1. Les perturbations électriques [2] :**

L'énergie électrique est généralement fournie sous forme de tension, caractérisée par sa fréquence, son amplitude et sa forme d'onde, qui devrait être sinusoïdale. Cependant, la qualité de la tension peut être altérée par des perturbations imprévisibles accidentelles ou par des perturbations permanentes ou temporaires de durée déterminée. Ces perturbations peuvent être classées comme suit :

#### **1.2.1.1. Creux et coupures de tension [5] :**

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise :

- Entre 90% et 1% selon les normes CEI 61000-2-1 et CENELEC EN 50160.
- Entre 90% et 10% selon IEEE 1159.

Elle est suivie d'un rétablissement de tension après un court laps de temps compris entre et une minute  $1/2 f$ .

Une coupure de tension est une forme spécifique de creux de tension caractérisée par une baisse de tension d'une ampleur supérieure à :

- 99% selon CEI-CENELEC.
- 90% selon IEEE.

La coupure de tension se caractérise par une durée relativement courte, ne dépassant pas 3 minutes pour les coupures courtes, tandis que les coupures longues durent plus de 3 minutes.

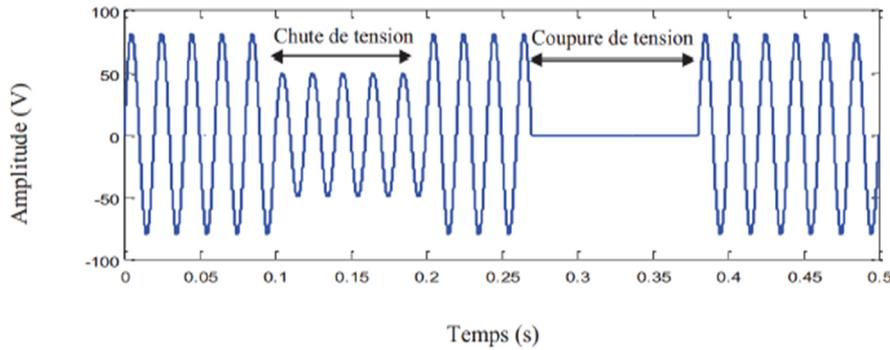


Figure 1.9 : Creux et coupures de tension [2].

**Origines :**

Les creux de tension et les coupures de courte durée sont généralement causés par les facteurs suivants [5]:

- Des défauts sur le réseau de transport (HT) ou de distribution (BT, MT).
- Des problèmes au niveau de l'installation électrique elle-même.
- La commutation de charges de puissance importantes.

Quant aux coupures de longue durée, elles peuvent être attribuées aux raisons suivantes :

- L'isolement définitif d'un défaut permanent.
- L'ouverture volontaire ou accidentelle d'un appareil.

Et, pour les coupures transitoires ( $Dt \leq \frac{1}{2f}$ ), à

- La mise sous tension d'un condensateur.
- L'isolement d'un défaut par un dispositif de coupure rapide.
- Les encoches de commutation des convertisseurs polyphasés.

**1.2.1.2. Surtensions :**

Une surtension se réfère à une impulsion ou une onde qui s'ajoute à la tension nominale du réseau électrique [6]. Elle peut se produire entre phases ou entre phase et terre.

Les surtensions peuvent être classées comme suit [7]:

- Temporaires (à fréquence industrielle).
- De manœuvre.
- D'origine atmosphérique.

**Origines :**

Les surtensions temporaires sont causées par [7]:

- Un défaut d'isolement entre une phase et la terre.
- La ferro-résonance (phénomène résultant d'un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable).
- La rupture du conducteur neutre.

- Un défaut de régulateur d'un alternateur ou d'un régulateur de charge de transformateur.
- La surcompensation de l'énergie réactive.

Les surtensions de manœuvre sont causées par [7]:

- Une surtension de commutation lors d'une charge normale.
- Une surtension provoquée par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs.
- Une surtension provoquée par la manœuvre de circuits capacitifs.

Les surtensions atmosphériques sont causées par [7]:

- Un coup de foudre direct sur la ligne ou le réseau électrique.
- Une surtension induite par l'effet d'un coup de foudre.

### **1.2.1.3. Variations et fluctuations de tension [7] :**

La variation de tension fait référence à une fluctuation de l'amplitude de tension, généralement inférieure à 10% de la valeur nominale, qu'elle soit exprimée en valeur efficace ou crête.

Les fluctuations de tension désignent une série de variations de tension, qu'elles soient cycliques ou aléatoires, qui affectent l'enveloppe de la tension. Ces fluctuations sont caractérisées par leur fréquence de variation et leur amplitude.

#### **Origines :**

- Les fluctuations de tension sont dues à des charges à variation lente connectées au réseau.
- Les fluctuations sont dues aux changements rapides des charges industrielles.

### **1.2.1.4. Déséquilibre [7] :**

Le déséquilibre dans un système triphasé se produit lorsque les amplitudes des phases ne sont pas égales ou lorsque le déphasage entre les phases n'est pas de  $120^\circ$ .

#### **Origines :**

Les déséquilibres dans un système triphasé sont causés par les charges déséquilibrées qui y sont connectées.

### **1.2.1.5. Harmoniques et inter-harmoniques :**

Les harmoniques sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur périodique qui peuvent être décomposées en une série de Fourier [8]. Dans le domaine du génie électrique, on fait référence aux courants et aux tensions harmoniques. Les harmoniques ont une fréquence multiple de la fréquence fondamentale, qui est généralement de 50 ou 60 hertz dans les réseaux électriques.

#### **Origines :**

Les charges non linéaires connectées au réseau de distribution engendrent des courants harmoniques et des tensions harmoniques [9]. Une charge est qualifiée de non linéaire lorsque le courant qu'elle consomme présente une forme différente de celle de la tension qui lui est fournie.

Ces courants harmoniques, qui ont des fréquences multiples de la fréquence fondamentale, ainsi que les tensions harmoniques, peuvent avoir des répercussions sur le fonctionnement du système électrique [10]. On peut citer [10] :

- Les convertisseurs statiques.
- Les équipements industriels tels que les machines à souder et les fours à arc.
- Les différents types de variateurs de vitesse.
- Les appareils de bureautique tels que les ordinateurs et les imprimantes.
- Les appareils électroménagers tels que les télévisions et les fours à micro-ondes.
- Les installations d'éclairage utilisant des lampes à décharge.

### **1.2.2. Caractérisation des Harmoniques :**

Différentes grandeurs sont définies pour quantifier les perturbations harmoniques.

Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

#### **1.2.2.1. Taux Harmonique de Rang n [11] :**

Le taux harmonique (tension ou courant) est défini par le rapport entre l'amplitude de la composante harmonique d'ordre n et l'amplitude de la composante du terme fondamental.

$$S_n = \frac{C_n}{C_1} \quad (1.1)$$

Où :

C<sub>n</sub>: représente la composante harmonique de rang n.

C<sub>1</sub>: représente la composante fondamentale.

En général, la valeur de chaque harmonique est exprimée par son taux individuel (en pourcentage du fondamental) comme le montre (la figure 1.10).

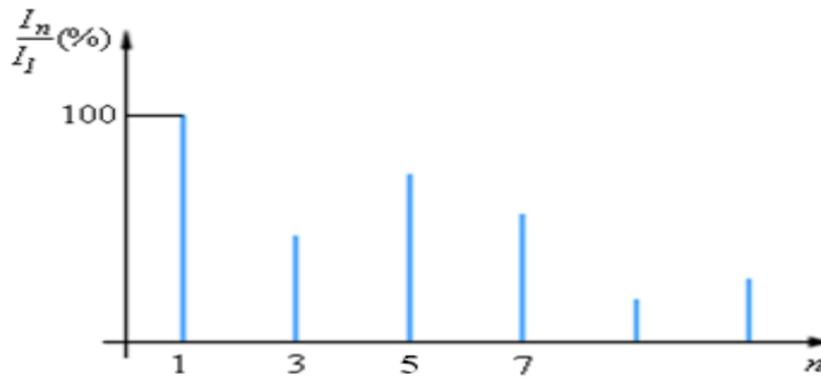


Figure 1.10 : Spectre de fréquences d'un courant non-sinusoïdal.

### 1.2.2.2. Taux Global de Distorsion Harmonique [11] :

Le taux global de distorsion harmonique (THD) est une mesure qui compare la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du signal fondamental dans un système électrique. Lorsque le THD est égal à zéro, cela signifie qu'il n'y a pas de présence d'harmoniques dans le réseau. Le THD est calculé en utilisant la relation suivante, exprimée en pourcentage :

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{X_n}{X_1}\right)^2} \quad (1.2)$$

Avec X : pour un courant ou une tension donné(e).

### 1.2.2.3. Facteur de Puissance :

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements [12].

Il est donc possible de caractériser les harmoniques par leur participation dans la puissance apparente. Nous utilisons alors la notion de puissance déformante D, d'où la puissance apparente dans le cas d'un réseau triphasé équilibré sera exprimée sous la formule suivante :

$$S = 3 \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = 3 \cdot V_n \cdot I_n \quad (1.3)$$

La puissance active P, la puissance réactive Q et la puissance déformante D sont données par les relations suivantes :

$$P = 3 \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \quad (1.4)$$

$$Q = 3 \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n \quad (1.5)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.6)$$

Le facteur de puissance FP est exprimé par l'expression suivante :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{3VnIn \cos \varphi_n}{3VnIn} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.7)$$

#### **1.2.2.4. Facteur de Crête :**

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur de crête du courant ou de la tension et la valeur efficace.

$$F_c = \frac{X_{max}}{X_{eff}} \quad (1.8)$$

Pour un signal sinusoïdal, ce facteur est donc égal à  $\sqrt{2}$ .

Pour un signal non-sinusoïdal, il peut être soit inférieur, soit supérieur à  $\sqrt{2}$ .

Ce coefficient revêt une importance particulière lorsqu'il s'agit de mettre en évidence les valeurs de crête exceptionnelles par rapport à la valeur efficace. Un facteur de crête élevé indique la présence de surintensités ponctuelles importantes. Ces surintensités, une fois détectées par les dispositifs de protection, peuvent entraîner des déclenchements inopportuns [13].

#### **1.2.2.5. Sources des harmoniques :**

La cause principale de l'existence d'harmoniques de tension est l'injection de courants non sinusoïdaux provenant de charges non linéaires ou déséquilibrées connectées au réseau.

Une charge alimentée par une tension sinusoïdale et consommant un courant sinusoïdal est dite linéaire. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées consistent en une résistance, une capacité et une inductance. Une charge est dite non linéaire si la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. De tels récepteurs fonctionnent avec des tensions sinusoïdales et consomment des courants non sinusoïdaux. On se limite alors aux charges triphasées non linéaires qui consomment des courants périodiques de même période que la tension [14].

#### **1.2.3. Solution pour le filtrage des harmoniques :**

Pour garantir la haute qualité de l'énergie électrique, des mesures doivent être prises pour réduire les harmoniques. Cela peut se faire à deux niveaux.

- ✓ Côté source en filtrant la tension secteur ou en améliorant le réseau de transport et de distribution.

✓ Côté client, rendre le courant secteur aussi sinusoïdal que possible.

Il existe plusieurs solutions possibles pour réduire la propagation des harmoniques. Ils se divisent en deux catégories, traditionnelles et modernes [15].

### **1.2.3.1 Les solutions traditionnelles : filtres passifs**

Les filtres utilisent des composants passifs tels que des condensateurs, des inductances et des résistances pour cibler des harmoniques spécifiques et les filtrer.

Son faible coût en fait un choix couramment utilisé.. (La Figure 1.11) montre différents types de filtres passifs pour compenser les courants harmoniques [16].

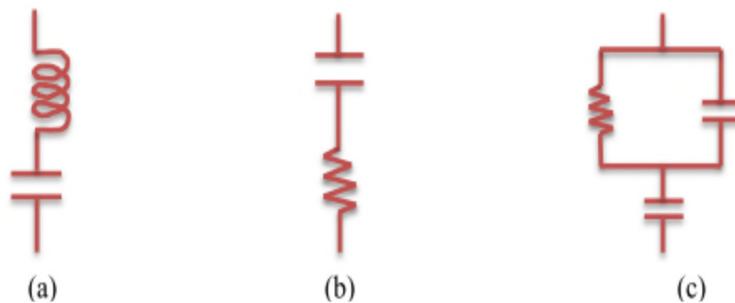


Figure 1.11 : a) filtre passe bande, b) passe haut 1er ordre, c) passe haut 2eme ordre.

### **1.2.3.2. Les solutions modernes : filtres actifs**

L'émergence de nouveaux composants à commutation forcée tels que les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT a permis de surmonter les limitations des filtres passifs, qui étaient peu adaptables aux variations de charge et du réseau ainsi que sujets aux phénomènes de résonance. Ces avancées ont donné naissance à de nouvelles méthodes et structures visant à améliorer le filtrage des harmoniques, assurant ainsi de meilleures performances pour les équipements et les installations.. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations ciblées [17].

### **1.2.3.3. Redresseurs à absorption sinusoïdale :**

Il s'agit de convertisseurs modulés en largeur d'impulsion utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT et les thyristors GTO. Ce dispositif est appelé circuit modulant car il donne une forme oscillante au courant aux hautes fréquences autour de la consigne souhaitée. La fréquence de modulation est déterminée par la fréquence de commutation du commutateur, qui est spécifiée par le circuit de commande associé.

La présence d'éléments filtrants est largement utilisée dans les applications à faible, moyenne et haute puissance non seulement pour réduire les interférences harmoniques, mais également pour contrôler la puissance active et réactive [17].

Plusieurs approches peuvent être utilisées dans ce contexte :

✓ **Redresseurs à injection de courant :**

Un circuit de modulation est inséré à la sortie d'un redresseur à diode triphasé (Figure 1.12) et injecte le courant dans le réseau d'alimentation via le circuit de distribution. Ces courants permettent de compenser les courants harmoniques.

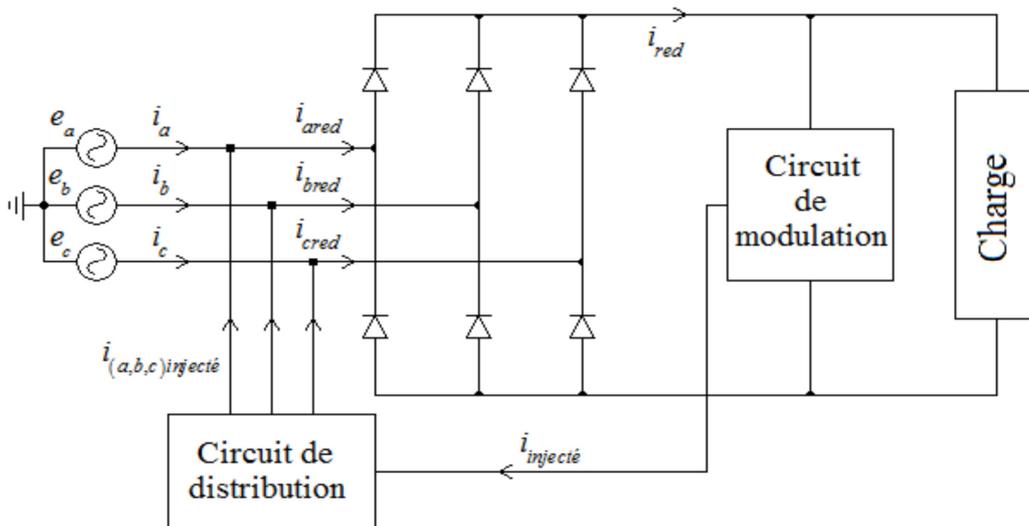


Figure 1.12 : Redresseur triphasé a injection de couran [18].

✓ **Redresseur utilisant un hacheur BOOST :**

Cette structure utilise un hacheur élévateur de type BOOST en cascade avec un redresseur à diode monophasé connu sous l'acronyme PFC (Power Factor Correction).

La Figure 1.13 montre la structure de base d'un convertisseur AC/DC avec une fonction de correction du facteur de puissance. Il s'agit d'un pont redresseur à diodes connecté au réseau avec un étage de correction placé entre la sortie du pont et la charge. Basé sur une structure de hacheur élévateur, cet étage de correction du facteur de puissance comprend une inductance, un interrupteur de puissance à double commande et une diode de puissance. Le principe du capteur sinusoïdal est de forcer le courant traversant l'inductance à suivre une référence sinusoïdale redressée, contrôlant ainsi l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur.

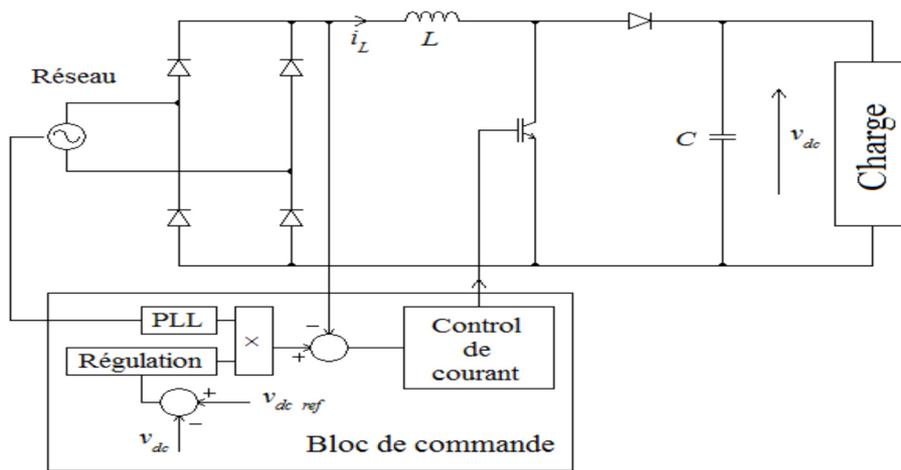


Figure 1.13 : Redresseur monophasé à absorption sinusoïdale par correction du facteur de puissance [18].

✓ **Redresseurs à MLI :**

Il s'agit d'un convertisseur modulé en largeur d'impulsion réversible en raison de la structure du commutateur. Par conséquent, une transition de force se produit de la source à la charge et vice versa.

À l'aide de commandes spéciales, ce redresseur réduit efficacement les harmoniques et atteint un courant secteur quasi-sinusoïdal.

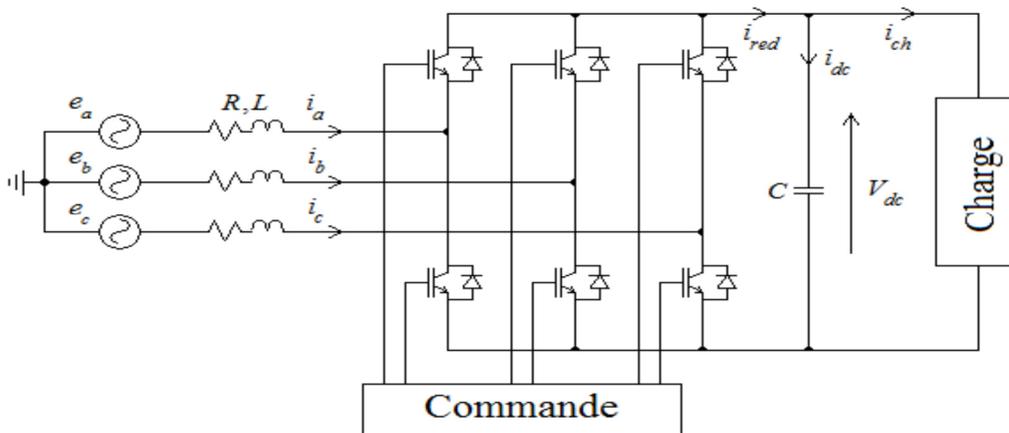


Figure 1.14 : Schéma d'un redresseur à MLI.

**I.2.4. Conclusion :**

En conclusion, ce chapitre a abordé les généralités sur les convertisseurs statiques et la qualité de l'énergie électrique. Les convertisseurs statiques sont des dispositifs utilisés pour adapter la source d'énergie aux exigences de la charge. Ils modifient les caractéristiques des grandeurs transmises, telles que la tension et la fréquence, ainsi que la forme de l'énergie (continu, alternatif).

Les convertisseurs statiques peuvent être classés en quatre catégories principales : les redresseurs, les hacheurs, les onduleurs et les cyclo-convertisseurs ou gradateurs. Chacun de ces convertisseurs a un rôle spécifique dans la transformation de l'énergie électrique.

La qualité de l'énergie électrique est un aspect crucial pour tous les acteurs du secteur énergétique. Elle englobe des aspects tels que l'approvisionnement en électricité, l'alimentation en onde de tension, la qualité du courant, et vise à améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes électriques. La qualité de l'énergie est mesurée en termes de paramètres tels que la fréquence, l'amplitude des tensions, la forme d'onde et le déséquilibre.

Le chapitre a également introduit les définitions de base des convertisseurs statiques, de l'énergie électrique et des différentes catégories de convertisseurs. Il a souligné les domaines d'application des convertisseurs statiques, qui sont vastes et couvrent des secteurs tels que les applications domestiques, commerciales, industrielles, de télécommunications, aéronautiques et médicales.

Enfin, le chapitre a présenté les interrupteurs utilisés en électronique de puissance, tels que les diodes, les thyristors, les transistors MOSFET, les transistors IGBT et les thyristors GTO. Chacun de ces interrupteurs a des caractéristiques spécifiques et est utilisé dans différentes applications en fonction des besoins de commutation et de contrôle du courant électrique.

En somme, ce chapitre a jeté les bases nécessaires pour comprendre les convertisseurs statiques et la qualité de l'énergie électrique, ainsi que les principaux interrupteurs utilisés dans l'électronique de puissance.

## **Chapitre 2 : Généralités sur le redresseur MLI**

### **1.Introduction :**

Le chapitre traité concerne les redresseurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Ces dispositifs utilisent des semi-conducteurs commandés tels que les thyristors, les triacs, les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance pour contrôler l'ouverture et la fermeture des interrupteurs. La modulation de largeur d'impulsion permet un contrôle précis du convertisseur en commutant les interrupteurs à une fréquence élevée. Les redresseurs MLI sont utilisés pour extraire des courants sinusoïdaux du réseau alternatif tout en maintenant un facteur de puissance unitaire.

Dans ce chapitre, nous examinerons d'abord les différentes structures des redresseurs MLI, à savoir les structures en tension et en courant. Ensuite, nous expliquerons le principe de fonctionnement et l'analyse d'un redresseur MLI, en mettant l'accent sur la modulation de la largeur d'impulsion. Nous discuterons également de la modélisation simplifiée du redresseur MLI et présenterons le schéma fonctionnel du redresseur dans les coordonnées triphasées. Enfin, nous aborderons les techniques de commande couramment utilisées pour les redresseurs MLI et les applications dans divers domaines tels que les convertisseurs de fréquence et les variateurs de vitesse.

### **2. Définition :**

Les redresseurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI) sont réalisés en utilisant des semi-conducteurs commandés tels que les thyristors, les triacs, les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance. Ces composants d'électronique de puissance permettent de contrôler l'ouverture et la fermeture des interrupteurs. La capacité de commander l'ouverture offre un contrôle total du convertisseur, car les interrupteurs peuvent être commutés à la fois en fermeture et en ouverture à une fréquence élevée, selon les besoins.

### **3. Structures du redresseur MLI [19] :**

En substituant les thyristors par des interrupteurs entièrement commandables, on effectue une modification de la structure interne du redresseur MLI. Selon la puissance requise, différents types d'interrupteurs sont utilisés : Des transistors MOSFET sont adaptés aux moyennes et petites puissances, les transistors IGBT conviennent aux moyennes et grandes puissances, tandis que les thyristors GTO sont utilisés pour les fortes puissances. Ces interrupteurs sont disposés en anti-parallèle avec des diodes pour assurer le bon fonctionnement du redresseur.

La technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) est utilisée pour la commande du redresseur. Le schéma de principe d'un redresseur MLI est illustré dans la figure 2.1.

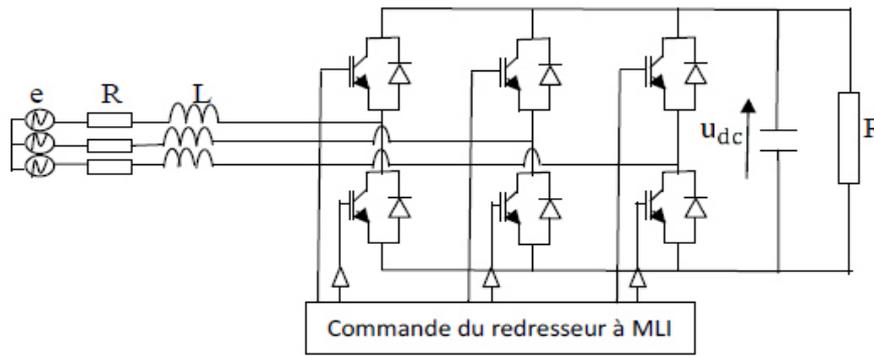


Figure 2.1 : Schéma de principe du redresseur MLI.

Les redresseurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI) sont des onduleurs qui exploitent leur réversibilité en courant dans leur deuxième mode de fonctionnement. Grâce à la commande MLI, ces convertisseurs peuvent extraire des courants sinusoïdaux du réseau alternatif tout en assurant un facteur de puissance unitaire. Il existe deux structures principales de redresseurs à MLI :

- ✓ redresseurs à MLI en tension.
- ✓ redresseurs à MLI en courant.

### 3.1. Structure en tension :

Le redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de tension, basé sur une structure d'onduleur de courant, est illustré dans la figure 2.2. Ce redresseur est utilisé pour alimenter un récepteur de courant continu à partir d'une source de tension sinusoïdale. Les interrupteurs utilisés dans le système sont bidirectionnels en tension et unidirectionnels en courant. Chaque interrupteur est composé soit d'un IGBT soit d'un GTO, en série avec une diode qui assure le blocage de la tension négative. Un filtre capacitif est également présent du côté alternatif du système [20].

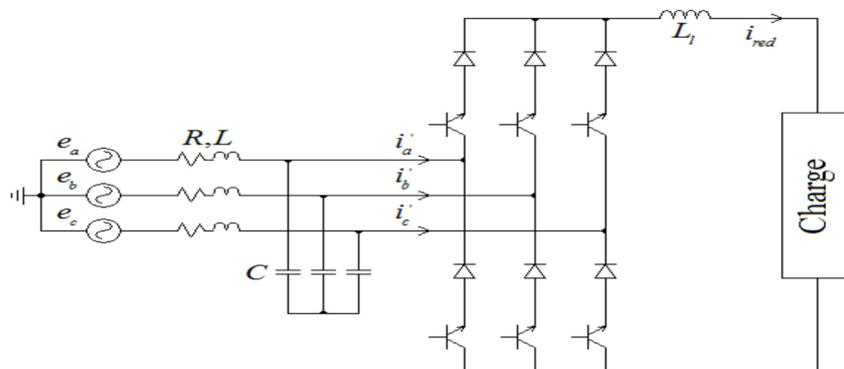


Figure 2.2 : Topologie de base d'un redresseur MLI de tension.

### 3.1. Structure en courant :

La topologie du redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de courant est représentée dans la figure 2.3. Ce redresseur est conçu pour effectuer la conversion d'énergie entre une source de courants sinusoïdaux et un récepteur de tension continue. Les interrupteurs sont bidirectionnels en courant mais unidirectionnels en tension, pour assurer ces conditions on associe en parallèle un IGBT ou un GTO avec une diode en anti parallèle [21]. Cette structure est très répandue notamment pour les possibilités de réglages qu'elle offre.

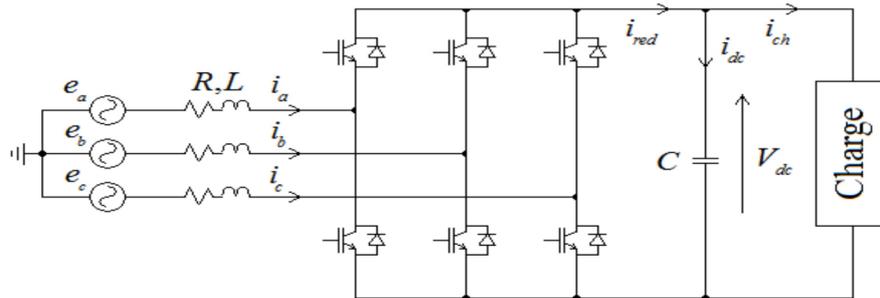


Figure 2.3 : Topologie de base d'un redresseur MLI de courant.

### 4. La différence entre le Redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de courant et de tension :

✓ Redresseur à MLI de courant :

- Convertit l'énergie entre une source de tension et un puits CC.
- Les interrupteurs est unidirectionnel pour le courant, mais bidirectionnel pour la tension.
- Les interrupteurs est composé d'une diode et d'un thyristor.

✓ Redresseur à MLI de tension :

- Il alimente une charge continue (active ou passive) à partir d'une source d'alimentation alternative.
- Permet d'attendre un facteur de puissance.
- Les interrupteurs sont bidirectionnels en courant et unidirectionnel en tension.
- Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT et une diode en antiparallèle.

### 5. Principe de fonctionnement et Analyse d'un redresseur à MLI :

Le fonctionnement d'un redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) repose sur l'utilisation de techniques de modulation pour réguler la quantité d'énergie transmise à une charge. Voici un aperçu du principe de fonctionnement et de l'analyse d'un redresseur MLI :

✓ Principe de fonctionnement :

- Source de tension sinusoïdale : Le redresseur MLI est alimenté par une source de tension sinusoïdale, telle qu'un réseau électrique ou un générateur.
- Comparaison du signal : Le signal de tension sinusoïdal est comparé à une onde porteuse, qui est généralement une forme d'onde triangulaire ou trapézoïdale.
- Génération du signal de commande : Un comparateur génère un signal de commande en fonction de la comparaison entre le signal sinusoïdal et l'onde porteuse. Ce signal de commande détermine le moment d'allumage et d'extinction des interrupteurs de l'onduleur.
- Interrupteurs de puissance : Des interrupteurs de puissance, tels que des transistors MOSFET ou des IGBT, sont utilisés pour contrôler la commutation de l'énergie entre la source d'entrée et la charge de sortie.
- Modulation de la largeur d'impulsion : La largeur des impulsions générées par les interrupteurs est modulée en fonction du signal de commande. Cela permet de réguler la quantité d'énergie transmise à la charge.

✓ Analyse du redresseur MLI :

L'analyse d'un redresseur MLI comprend les étapes suivantes :

- Modulation : L'analyse commence par la modulation du signal de commande, qui détermine le rapport cyclique des impulsions générées par les interrupteurs.
- Spectre de fréquence : L'analyse du redresseur MLI implique l'analyse du spectre de fréquence de la tension de sortie. Cela permet de déterminer les composantes harmoniques présentes dans le signal, qui sont des multiples de la fréquence fondamentale.
- Filtrage : Si nécessaire, un filtrage est appliqué pour éliminer les composantes harmoniques indésirables et obtenir une tension de sortie plus stable et proche d'un courant continu.
- Contrôle : Le signal de commande est ajusté pour réguler la tension de sortie et maintenir un rapport cyclique approprié afin de répondre aux exigences de la charge.

### **6. Modélisation du redresseur MLI :**

On peut simplifier la modélisation en utilisant les hypothèses suivantes :

- Interrupteurs parfaits : les interrupteurs se commutent instantanément, avec une résistance nulle à l'état passant et une résistance infinie à l'état bloqué..
- Sources parfaites : la tension continue fournie par les sources reste constante et ne varie pas en fonction de la puissance échangée.

La figure ci-dessous présente le schéma unifilaire d'un redresseur en pont connecté au réseau. La tension de la source est représentée par  $\bar{e}$ , tandis que R et L désignent les paramètres de la ligne. La tension d'entrée du redresseur est symbolisée par  $\bar{v}$ .

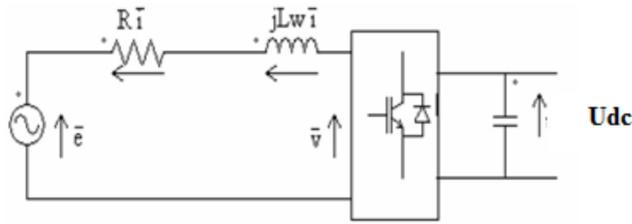


Figure 2.4 : Le schéma unifilaire d'un pont de redresseur connecté au réseau.

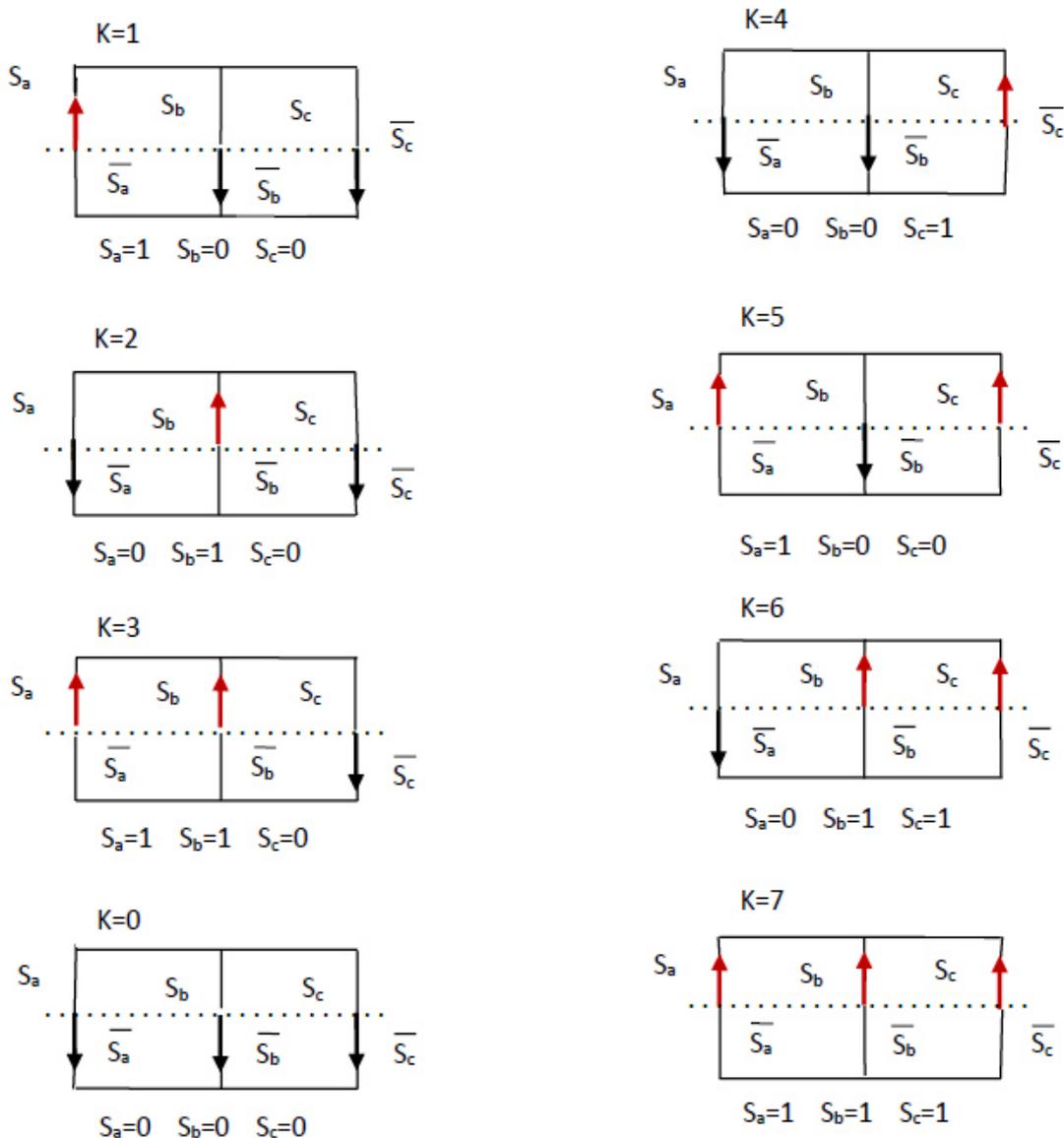


Figure 2.5 : Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

D'après les huit états possibles des interrupteurs présentés sur la figure ci-dessus on peut écrire les tensions d'entrée en fonction des tensions de sorties du redresseur  $U_{dc}$  comme suit:

$$v_n = u_{dc} \left( s_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n \right) \tag{2.1}$$

Où  $S_n = 0$  où  $S_n = 1$ , sont les états des interrupteurs et  $n = a, b, c$ .

D'après le schéma présenté sur la figure (II.3), on a :

$$e^- = Ri^- + L \frac{di^-}{dt} + v^- \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Et le courant du bus continu est donné par :

$$i_c = c \frac{du_{dc}}{dt} \quad (2.4)$$

Ou

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (2.5)$$

Et

$$i_{dc} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (2.6)$$

Donc

$$c \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (2.7)$$

Les équations suivantes illustrent la relation entre les tensions du côté alternatif et du côté continu du redresseur :

$$\begin{aligned} e_a &= L \frac{di_a}{dt} + Ri_a - v_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a - u_{dc} \left( s_a - \frac{1}{3}(s_a + s_b + s_c) \right) \\ e_b &= L \frac{di_b}{dt} + Ri_b - v_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b - u_{dc} \left( s_b - \frac{1}{3}(s_a + s_b + s_c) \right) \\ e_c &= L \frac{di_c}{dt} + Ri_c - v_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c - u_{dc} \left( s_c - \frac{1}{3}(s_a + s_b + s_c) \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Ou  $e_a, e_b, e_c$  sont les tensions du réseau.

On peut résumer ces équations en une seule équation qui est :

$$e_n = L \frac{di_n}{dt} + Ri_n - u_{dc} \left( s_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n \right) \quad (2.9)$$

## 7. Schéma fonctionnel du redresseur MLI :

Le schéma fonctionnel du Redresseur MLI triphasé peut être représenté comme suit, en se basant sur les équations (2.7) et (2.9):

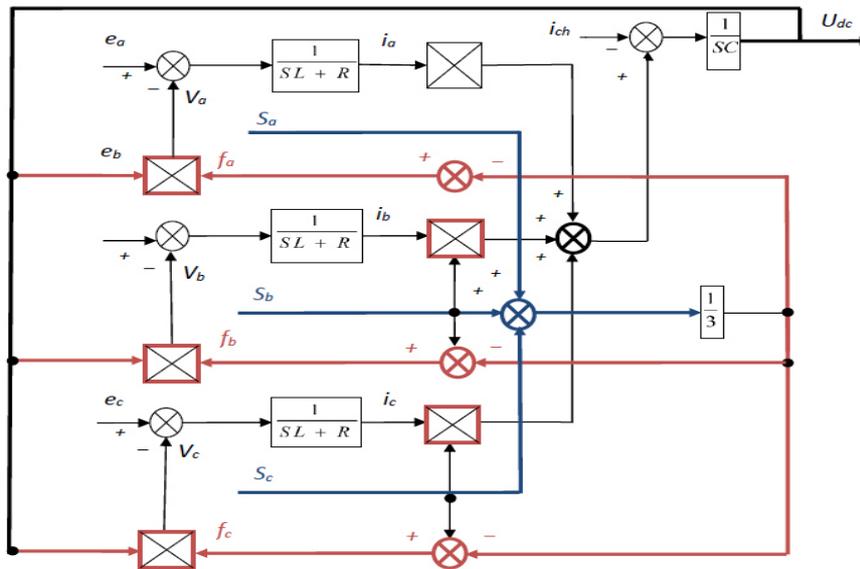


Figure 2.6 : Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans les coordonnées triphasées.

### 8. Techniques de commande d'un redresseur MLI :

Les récents progrès dans la recherche sur les redresseurs MLI ont conduit au développement de plusieurs techniques de contrôle [22]. Ces techniques ont toutes pour objectif commun d'atteindre un facteur de puissance unitaire et un faible taux de distorsion harmonique du courant (courants de source sinusoïdaux) [23,24] .

Dans la littérature, plusieurs stratégies de contrôle pour les redresseurs MLI ont été proposées. On peut les regrouper en deux familles distinctes :

- Méthodes contrôlant directement les puissances échangées entre les deux côtés du convertisseur : Cela inclut les techniques de DPC (Direct Power Control) et de VF-DPC (Virtual flux based direct power control).
- Méthodes utilisant des boucles internes de courant pour un contrôle indirect de ces puissances : Cela comprend les approches de VOC (Voltage Oriented Control) et de VFOC (Virtual Flux Oriented Control).

Ces différentes méthodes offrent des approches variées pour contrôler efficacement les redresseurs MLI et atteindre les objectifs de facteur de puissance élevé et de faible distorsion harmonique du courant.

### 9. Applications du redresseur MLI :

Les redresseurs MLI offrent plusieurs avantages par rapport aux redresseurs à diodes ou à thyristors traditionnels, notamment grâce à leur capacité à fonctionner dans les quatre quadrants.

Leur réversibilité permet le transfert d'énergie dans les deux sens et l'alimentation de divers types de charges.

Un bon contrôle des redresseurs MLI permet non seulement d'obtenir un facteur de puissance unitaire, mais aussi de maintenir un taux de distorsion harmonique de courant très faible.

Grâce à leurs avantages, on les trouve dans différents systèmes. On cite :

### 9.1. Un outil de conversion 50-60Hz :

Cet outil de conversion 50-60 Hz permet de réaliser la transition entre un système fonctionnant à une fréquence de 50 Hz et un système fonctionnant à une fréquence de 60 Hz, et vice versa. La Figure 2.7 illustre un exemple d'application de ce dispositif. En comparaison avec les systèmes traditionnels utilisant des thyristors, ce type de montage présente des avantages significatifs tels que sa simplicité, sa propreté et sa grande flexibilité.

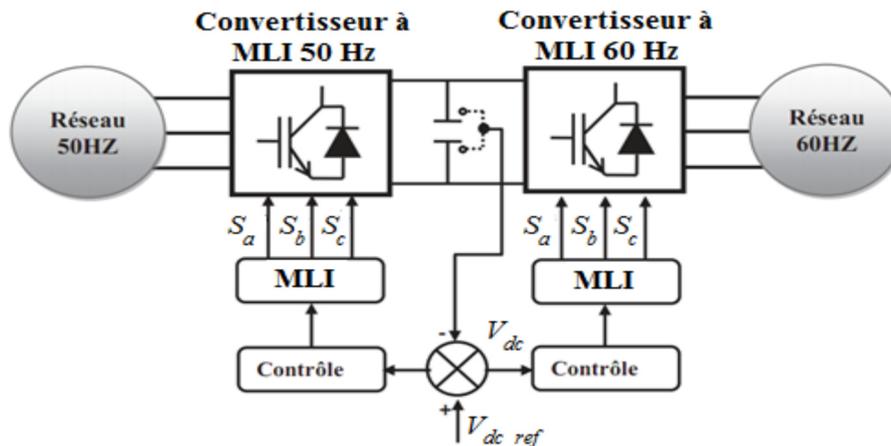


Figure 2.7 : Liaison entre un système à 50Hz et un système à 60Hz.

### 9.2. Le redresseur MLI dans les variateurs de vitesse :

Les systèmes de variateurs de vitesse contemporains se composent d'un redresseur MLI et d'un onduleur MLI en cascade. Ce type de configuration de redresseur permet de prélever des courants quasi-sinusoïdaux du réseau électrique et de récupérer l'énergie de freinage, ce qui contribue à améliorer l'efficacité globale du système.

Le schéma d'un variateur de vitesse est illustré dans la Figure 2.8.

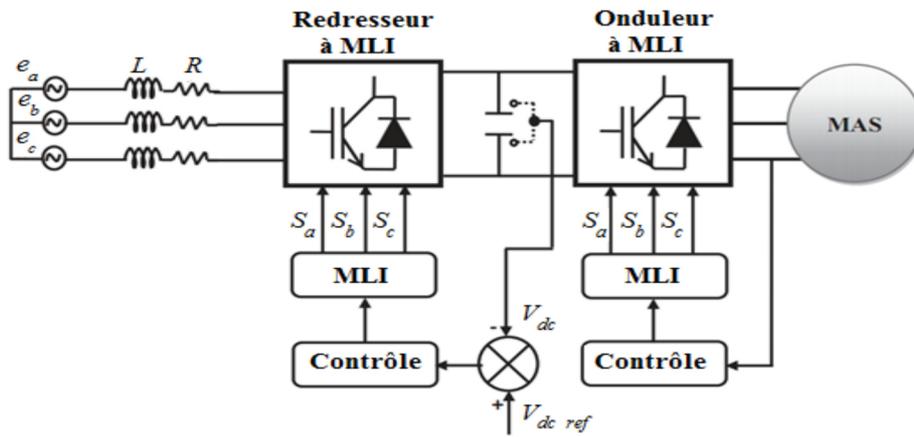


Figure 2.8 : Redresseur à MLI dans les variateurs de vitesse.

### 9.3. Eoliennes à vitesse variable commandées par le stator :

Dans le cas de générateurs asynchrones à cage d'écureuil (Fig. 2.9) ou de générateurs synchrones à faible pôle (Fig.2.10.a), la turbine peut être reliée au générateur via un multiplicateur. Pour les générateurs synchrones à pôles élevés, le raccordement peut être réalisé directement (Fig. 2.10.b).

La poursuite du développement de convertisseurs et de contrôleurs statiques permettra le fonctionnement d'éoliennes à vitesse variable. En effet, un dispositif électronique de puissance est inséré entre le générateur et le réseau, composé d'un redresseur MLI, d'un onduleur MLI et d'un bus DC.

Ces convertisseurs sont connectés via trois selfs de lissage pour réduire les harmoniques de courant.

Un redresseur MLI régule la puissance produite en ajustant la vitesse du générateur. Il est crucial d'ajuster cette vitesse de manière adéquate pour assurer la sécurité lors de vents forts. L'onduleur MLI, contrôlé par un dispositif de contrôle, génère une sortie de courant à une fréquence fixe correspondant à la fréquence du réseau électrique, permettant ainsi de réguler le facteur de puissance (puissance réactive).

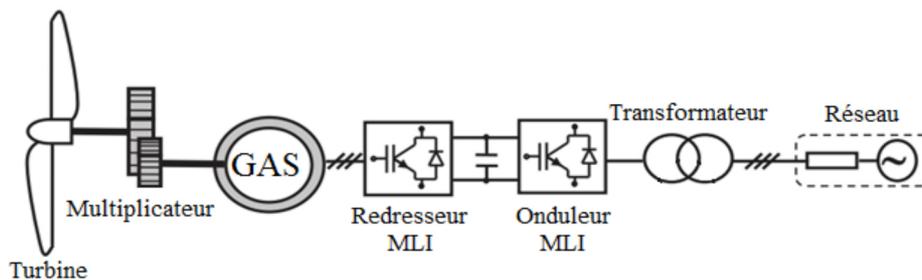


Figure 2.9 : Eolienne à vitesse variable basée sur une GAS.

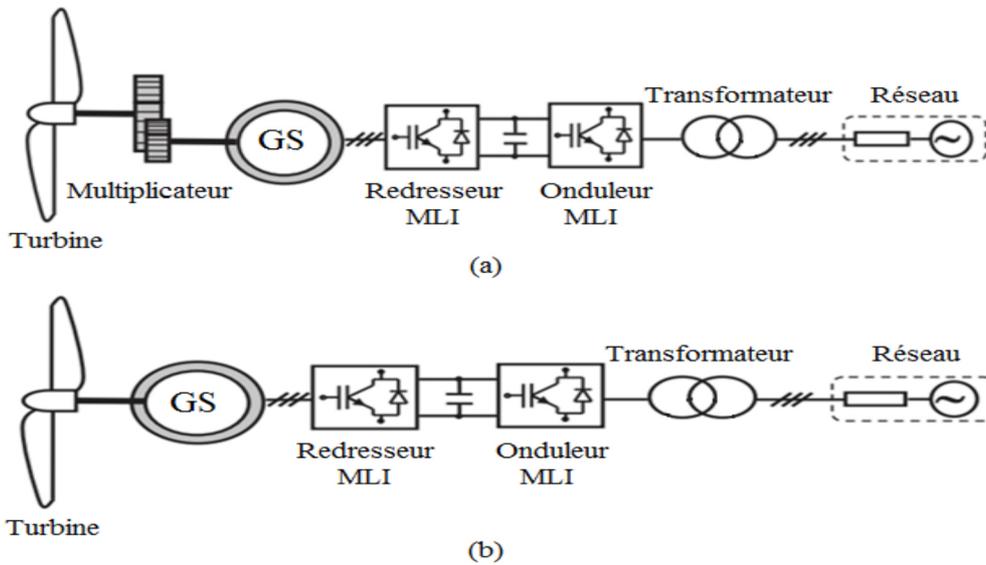


Figure 2.10 : Eolienne à vitesse variable à base de la GS.

(a) La GS couplée à la turbine via un multiplicateur.

(b) La GS directement couplée à la turbine.

#### 9.4. Eolienne à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation :

Dans le cas de la génératrice asynchrone à double alimentation, la turbine est directement connectée au réseau par l'intermédiaire d'un multiplicateur passant par le stator, mais également par l'intermédiaire d'un circuit intermédiaire redresseur MLI passant par le rotor vers l'ensemble onduleur MLI vers le réseau.

Son utilité est le fonctionnement dans une large gamme de vitesses de vent, permettant des gains de performances maximaux.

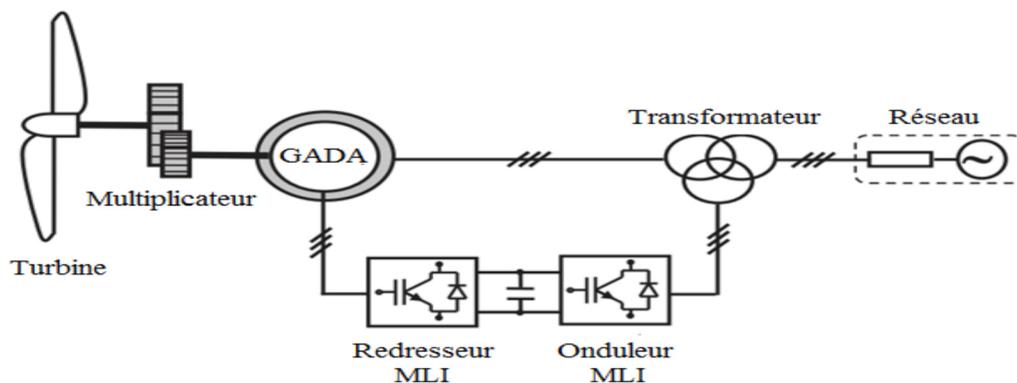


Figure 2.11 : Eolienne à vitesse variable à base de la GADA.

## **10. Les principaux avantages des redresseurs à MLI :**

Le redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) est de plus en plus utilisé dans les applications industrielles en raison de ses avantages significatifs :

- Le flux de puissance est bidirectionnel, permettant des transferts d'énergie dans les deux sens.
- Le redresseur MLI génère une faible distorsion harmonique du courant du réseau, limitant ainsi les perturbations électromagnétiques.
- Il permet d'obtenir un facteur de puissance presque unitaire, contribuant ainsi à l'amélioration de l'efficacité énergétique.
- Le contrôle de la tension du bus continu est possible grâce au redresseur MLI, assurant ainsi une stabilité de fonctionnement.
- L'utilisation du redresseur MLI permet de réduire les dimensions du condensateur du bus continu, offrant des avantages en termes de coûts et d'encombrement.

## **11. Conclusion :**

Dans Ce chapitre a présenté les principales caractéristiques et structures des redresseurs MLI, notamment les structures en tension et en courant. Nous avons expliqué le principe de fonctionnement et l'analyse d'un redresseur MLI, mettant en évidence l'importance de la modulation de la largeur d'impulsion dans le contrôle de l'énergie transmise à la charge.

De plus, nous avons abordé la modélisation simplifiée du redresseur MLI, en considérant des interrupteurs parfaits et des sources constantes. Nous avons également présenté le schéma fonctionnel du redresseur dans les coordonnées triphasées, montrant les relations entre les tensions du côté alternatif et du côté continu.

Enfin, nous avons discuté des techniques de commande utilisées pour les redresseurs MLI, telles que le contrôle direct de la puissance et le contrôle indirect à travers des boucles de courant. Nous avons également souligné les applications importantes des redresseurs MLI, notamment dans les convertisseurs de fréquence et les variateurs de vitesse.

En conclusion, les redresseurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI) jouent un rôle crucial dans les systèmes de conversion d'énergie, offrant un contrôle précis et efficace de l'énergie transmise à la charge. Leur utilisation dans divers domaines témoigne de leur polyvalence et de leurs avantages par rapport aux redresseurs traditionnels.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les résultats de simulation du redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) ainsi que leurs interprétations.

## **Chapitre3:**

### **Simulation de redresseur MLI en absorption sinusoïdale de courant.**

#### **1. Introduction :**

La simulation des redresseurs monophasés et triphasés est une technique couramment utilisée pour analyser et comprendre le comportement de ces systèmes de conversion de puissance. Elle permet de prédire les caractéristiques de sortie, telles que la tension et le courant, ainsi que les performances globales, comme l'ondulation, le rendement et la distorsion harmonique.

Dans le cas d'un redresseur monophasé, la simulation vise à modéliser le comportement du redresseur en convertissant une tension alternative monophasée en tension continue. Cela peut être réalisé en utilisant des logiciels de simulation de circuits électriques tels que Matlab, où le redresseur est représenté par des composants électroniques tels que des diodes et des condensateurs. En utilisant des équations mathématiques et des modèles de composants, la simulation permet de prédire les caractéristiques de sortie et de déterminer les valeurs optimales des composants pour atteindre les performances souhaitées.

En ce qui concerne les redresseurs triphasés, la simulation devient plus complexe en raison de la présence de trois phases. Les logiciels de simulation électrique avancés permettent de modéliser les redresseurs triphasés à l'aide de composants spécifiques, tels que des ponts de diodes triphasés et des circuits de filtrage. Ces simulations peuvent aider à comprendre les interactions entre les différences phases et à évaluer les performances globales du système.

Quant au redresseur monophasé et triphasé MLI en absorption sinusoïdale de courant, il s'agit d'une technique de modulation de largeur d'impulsion utilisée pour réguler la tension de sortie du redresseur. La simulation de ce type de redresseur implique la modélisation des signaux de commande et des dispositifs de commutation pour obtenir une absorption sinusoïdale de courant, ce qui permet de réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité de la tension de sortie. Des logiciels spécialisés de simulation de systèmes de conversion de puissance permettent de modéliser et d'analyser ces redresseurs MLI, en prenant en compte les contraintes de commutation, les formes d'onde des signaux de commande et les performances globales.

#### **2. Modélisation d'un redresseur monophasé double alternance :**

Le schéma de principe présenté dans la figure 3.1 indique les notations utilisées. Le redresseur est composé de quatre interrupteurs bidirectionnels  $K_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) qui sont commandés

en courant et en tension. Chaque interrupteur est associé à des diodes antiparallèles qui garantissent la continuité du courant.

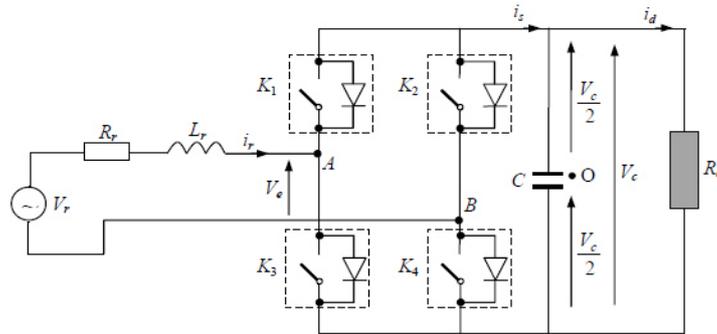


Figure 3.1 : Circuit de puissance d'un redresseur monophasé.

### 2.1. Modélisation du réseau d'alimentation :

Dans le contexte d'une source monophasée, la tension est représentée par la relation suivante :

$$V_r(t) = V_{rM} \sin \omega t \quad (3.1)$$

En ce qui concerne le courant de la source, on peut exprimer la relation en utilisant la loi des mailles

$$L_r \frac{di_r}{dt} + R_r i_r + V_e = V_r \quad (3.2)$$

Par conséquent, la variation de ce courant peut être exprimée par :

$$\frac{di_r}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} i_r + \frac{1}{L_r} (V_r - V_e) \quad (3.3)$$

### 2.2. Modélisation du convertisseur

L'expression de la tension d'entrée du convertisseur par rapport au point fictif "O" est la suivante

$$V_e = V_{AO} - V_{BO} \quad (3.4)$$

Avec

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{V_c}{2} S_a \\ V_{BO} = \frac{V_c}{2} S_b \end{cases} \quad (3.5)$$

Les séquences de commutation,  $S_a$  et  $S_b$ , sont définies par :

$$\begin{cases} S_a = 1 & \text{si } k_1 = k_4 = 1 \\ S_b = -1 & \text{si } k_1 = k_4 = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} S_a = 1 & \text{si } k_2 = k_3 = 1 \\ S_b = -1 & \text{si } k_2 = k_3 = 0 \end{cases}$$

Ainsi, on peut exprimer la tension d'entrée du convertisseur de la manière suivante :

$$V_e = \frac{V_c}{2} (S_a - S_b) \quad (3.7)$$

En utilisant une commande adéquate des interrupteurs, il est possible d'obtenir les séquences de commutation  $S_a$  et  $S_b$ , parmi lesquelles figurent les méthodes classiques de commande telles que la "pleine onde" et la "modulation de largeur d'impulsion".

### 2.3. Mise en équations de l'association redresseur monophasé – charge

Les équations qui expriment le courant d'entrée et la tension de sortie du convertisseur peuvent être formulées comme suit :

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{V_r - R_r i_r - V_e}{L_r} \quad (3.8)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{i_s - i_d}{c} \quad (3.9)$$

Le courant absorbé par la charge, noté  $i_d$ , dépend de la nature de celle-ci, ce qui se traduit par une équation spécifique.

- A vide :

$$i_d = 0 \quad (3.10)$$

- Charge résistive ( $R_d$ ) :

$$i_d = \frac{V_c}{R_d} \quad (3.11)$$

- Charge résistive-inductive ( $R_d, L_d$ ) :

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{V_c - R_d i_d}{L_d} \quad (3.12)$$

- Charge active ( $R_d, L_d, E$ )

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{c - R_d i_d - E}{L_d} \quad (3.13)$$

### 3. Modélisation du redresseur triphasé

Le schéma représenté dans la figure 3.2 illustre un convertisseur AC/DC triphasé. Celui-ci est constitué de quatre blocs distincts, à savoir la source, la commande, le convertisseur et la charge.

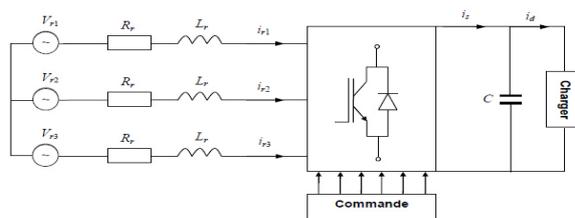


Figure 3.2 : Schéma de principe d'un redresseur triphasé.

### 3.1. Bloc source :

Le bloc source du convertisseur est composé d'une force électromotrice (FEM) triphasée purement sinusoïdale en série avec une résistance  $R_r$  et une inductance  $L_r$  sur chaque phase, comme illustré dans la figure 3.3.

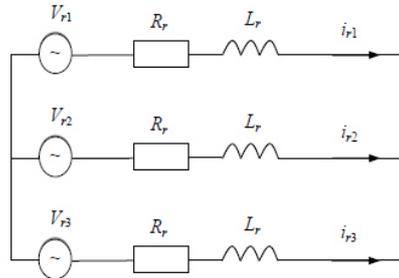


Figure 3.3 : Schéma de principe d'un réseau d'alimentation triphasé.

En supposant un réseau équilibré et des impédances identiques pour les trois phases, les tensions de la source peuvent être exprimées de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 V_{r1} &= V_{Max} \sin(\omega t) \\
 V_{r2} &= V_{Max} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 V_{r3} &= V_{Max} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Les tensions simples (par rapport au neutre de la source) aux bornes de chaque phase sont notées  $r_iV$ .

Le système d'équations qui décrit le courant dans chaque phase du réseau peut s'exprimer comme suit :

$$\begin{aligned}
 \frac{d_{i_{r1}}}{dt} &= \frac{V_{r1} - R_r i_{dr1} - V_{e1}}{L_r} \\
 \frac{d_{i_{r2}}}{dt} &= \frac{V_{r2} - R_r i_{dr2} - V_{e2}}{L_r} \\
 \frac{d_{i_{r3}}}{dt} &= \frac{V_{r3} - R_r i_{dr3} - V_{e3}}{L_r}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

D'où la forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_r}{L_r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_r}{L_r} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_r} \begin{bmatrix} V_{r1} - V_{e1} \\ V_{r2} - V_{e2} \\ V_{r3} - V_{e3} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

### 3.2. Bloc convertisseur :

La figure 3.4 représente un convertisseur triphasé composé de six commutateurs semi-commandés qui peuvent être ouverts ou fermés. Chaque commutateur est associé à une diode en antiparallèle afin de permettre la récupération de l'énergie provenant d'un courant de retour du circuit.

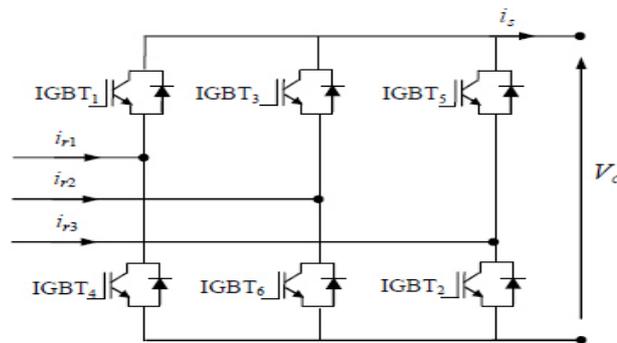


Figure 3.4 : Schéma du convertisseur AC/DC triphasé.

Les IGBT et les diodes qui composent le pont sont considérés comme idéaux, ce qui permet de négliger les phénomènes de commutation. En connaissant l'état de chaque interrupteur, il est possible de définir la matrice de connexion du convertisseur. À partir de cette matrice, on peut déduire l'expression des grandeurs d'entrée \$V\_{ei}\$ en fonction de la grandeur de sortie \$V\_c\$.

$$\begin{bmatrix} V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} = \frac{V_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

En utilisant \$V\_{ei}\$ pour désigner les tensions d'entrée du redresseur et \$(S\_a, S\_b, S\_c)\$ pour représenter les variables logiques de commutation, on peut également exprimer le courant continu de sortie (\$i\_s\$) en fonction des courants d'entrée de la manière suivante :

$$i_s = [S_a \quad S_b \quad S_c] \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

### 3.3. Bloc charge :

Ce bloc est composé d'une capacité C, placée en parallèle pour réduire les ondulations de la tension redressée. Il est également associé à une résistance  $R_d$ , qui modélise la charge continue. Ce schéma est représenté dans la figure 3.5 .

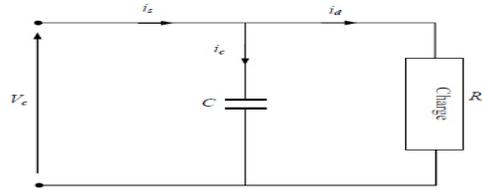


Figure 3.5 : Schéma de principe du bloc charge.

L'équation qui exprime la tension aux bornes de la charge est la suivante :

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{i_s - i_d}{c} \quad (3.15)$$

Le courant traversant la capacité est déterminé par :

$$i_c = i_s - i_d \quad (3.16)$$

Avec :

$i_d$  Le courant absorbé par la charge et  $i_s$  le courant de sortie du redresseur.

Avec :

$i_d$  Le courant absorbé par la charge et  $i_s$  le courant de sortie du redresseur.

Quand le courant  $i_s$  est positif, le pont fonctionne comme un redresseur.

Inversement, quand le courant  $i_s$  devient négatif, le pont fonctionne comme un onduleur. Pour l'interrupteur IGBT1, les angles de commutation sont déterminés en utilisant une commande pleine onde.

Les angles de commutation de l'IGBT2 et de l'IGBT3 sont déterminés avec un déphasage de  $\frac{2\pi}{3}$  et  $\frac{4\pi}{3}$  respectivement.

### 3.4. Mise en équations de l'association redresseur – charge :

Les équations exprimant les courants d'entrée peuvent être écrites sous la forme :

$$\begin{aligned} \frac{di_{r1}}{dt} &= \frac{V_{r1} - R_r i_{dr1} - U_{e1}}{L_r} \\ \frac{di_{r2}}{dt} &= \frac{V_{r2} - R_r i_{dr2} - U_{e2}}{L_r} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\frac{di_{r3}}{dt} = \frac{V_{r3} - R_r i_{dr3} - U_{e3}}{L_r}$$

La tension de sortie du convertisseur peut être exprimée par :

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{i_s - i_d}{c} \tag{3.18}$$

La tension de sortie du convertisseur, en fonction du courant absorbé par la charge triphasée ( $i_d$ ), dépend de la nature de la charge, comme discuté précédemment.

#### 4. Les résultats de la simulation :

La vérification de la commande vectorielle du redresseur MLI en absorption sinusoïdale de courant a été réalisée par des simulations numériques utilisant le logiciel Matlab/Simulink. Les paramètres détaillés du système sont inclus dans l'annexe.

##### 4.1. Redresseur monophasé classique :

Le modèle de simulation du redresseur monophasé avec la commande pleine onde a été développé dans Matlab/Simulink pour différentes charges, comme illustré dans la figure 3.6.

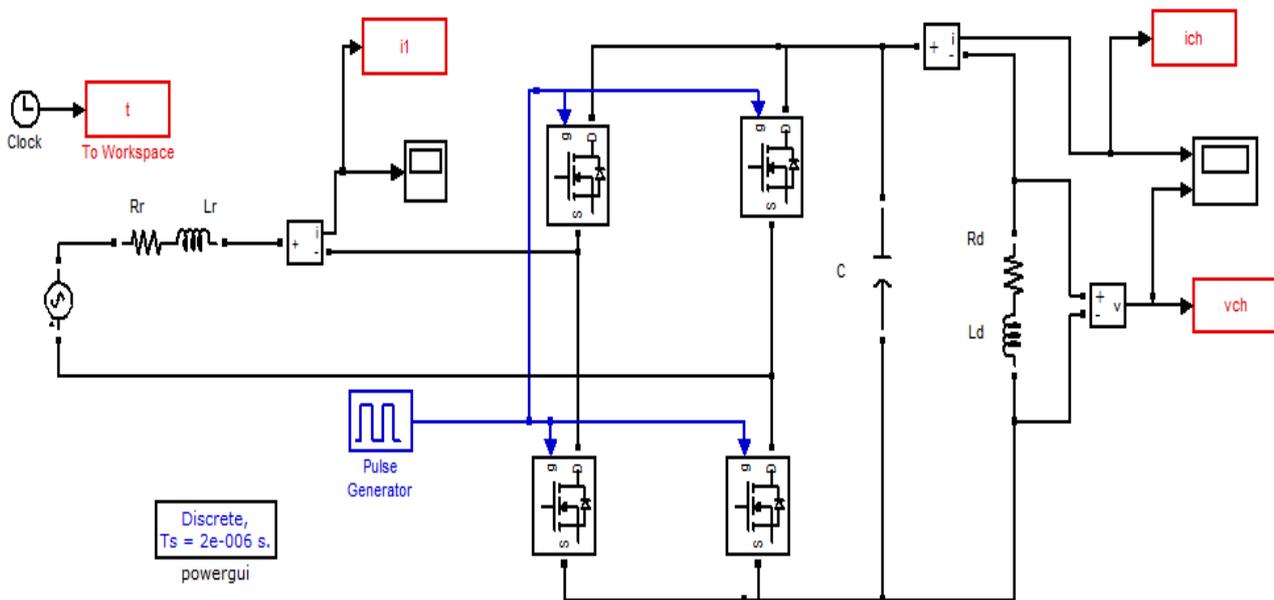


Figure 3.6 : schéma de bloc de la simulation d'un redresseur monophasé classique.

4.1.1. Charge résistive :

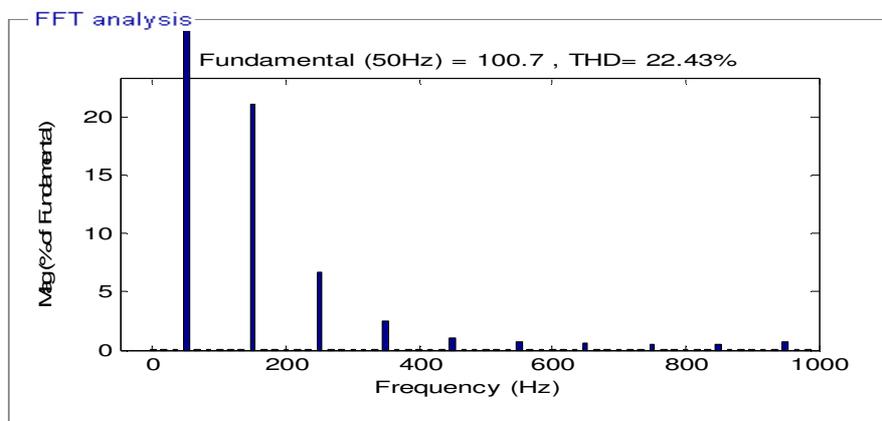
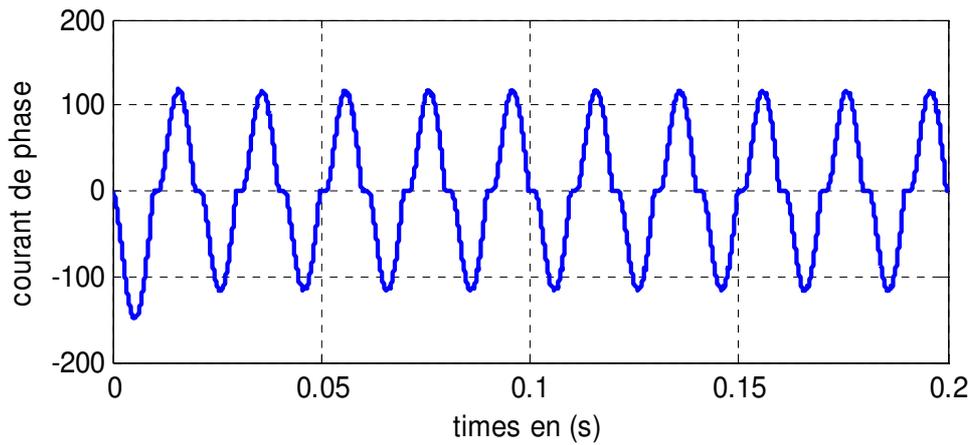


Figure 3.7 : Courant de source et son spectre d'harmoniques.

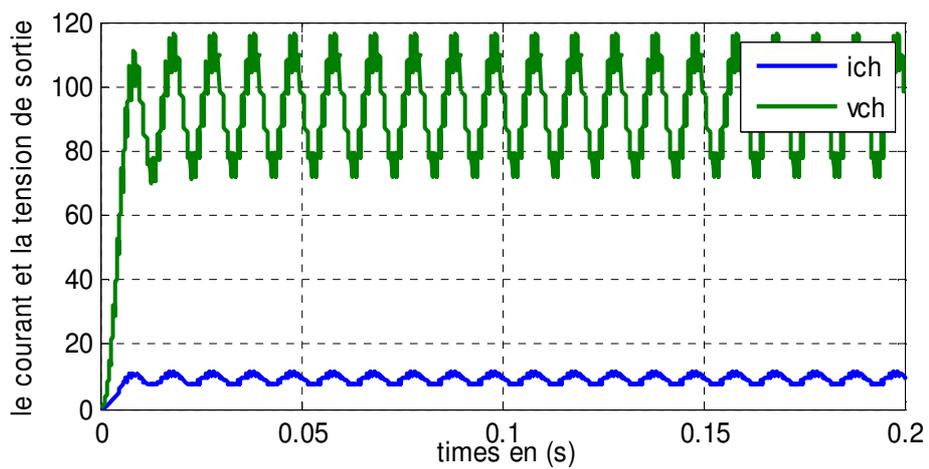


Figure 3.8 : Allure de courant et de tension sortie.

4.1.2. Charge inductive :

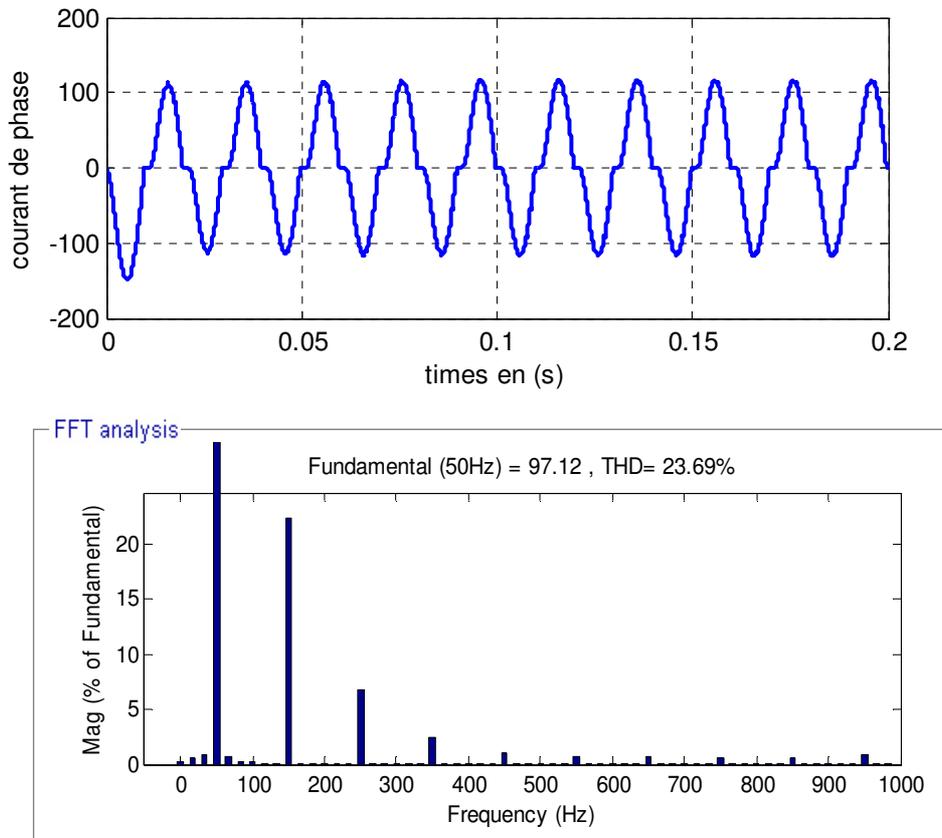


Figure 3.9 : Courant de source et son spectre d'harmoniques.

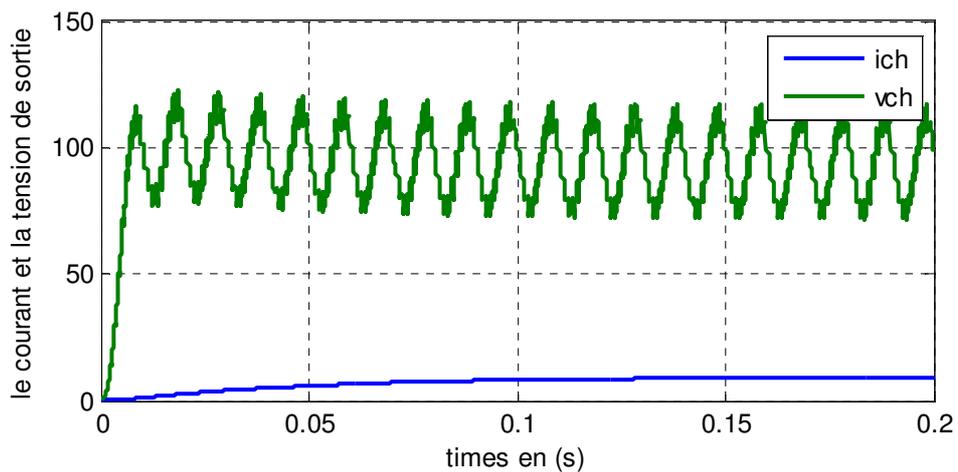


Figure 3.10 : Allure de courant et de tension sortie.

Commentaire :

Les résultats de simulation pour les redresseurs monophasé classiques, on peut faire les observations suivantes :

- ✓ charge résistive :

- la figure 3.7 On remarque que ;Le courant de la source n'est pas sinusoïdal, ce qui indique la présence d'harmoniques à des ordres supérieurs.
- la figure 3.8 On remarque que L'allure du courant de sortie présente des ondulations importantes.

✓ charge inductive :

- Dans la figure 3.7, il est observé que le courant de la source présente une forme non sinusoïdale, avec une distorsion harmonique notable.
- Dans la figure 3.8, on remarque que l'allure du courant de sortie présente des ondulations plus prononcées en raison de la présence d'une charge inductive.

4.2. Redresseur triphasé classique :

: Le modèle de simulation du redresseur triphasé avec la commande pleine onde a été développé dans Matlab/Simulink pour différentes charges, comme illustré dans la figure3.11.

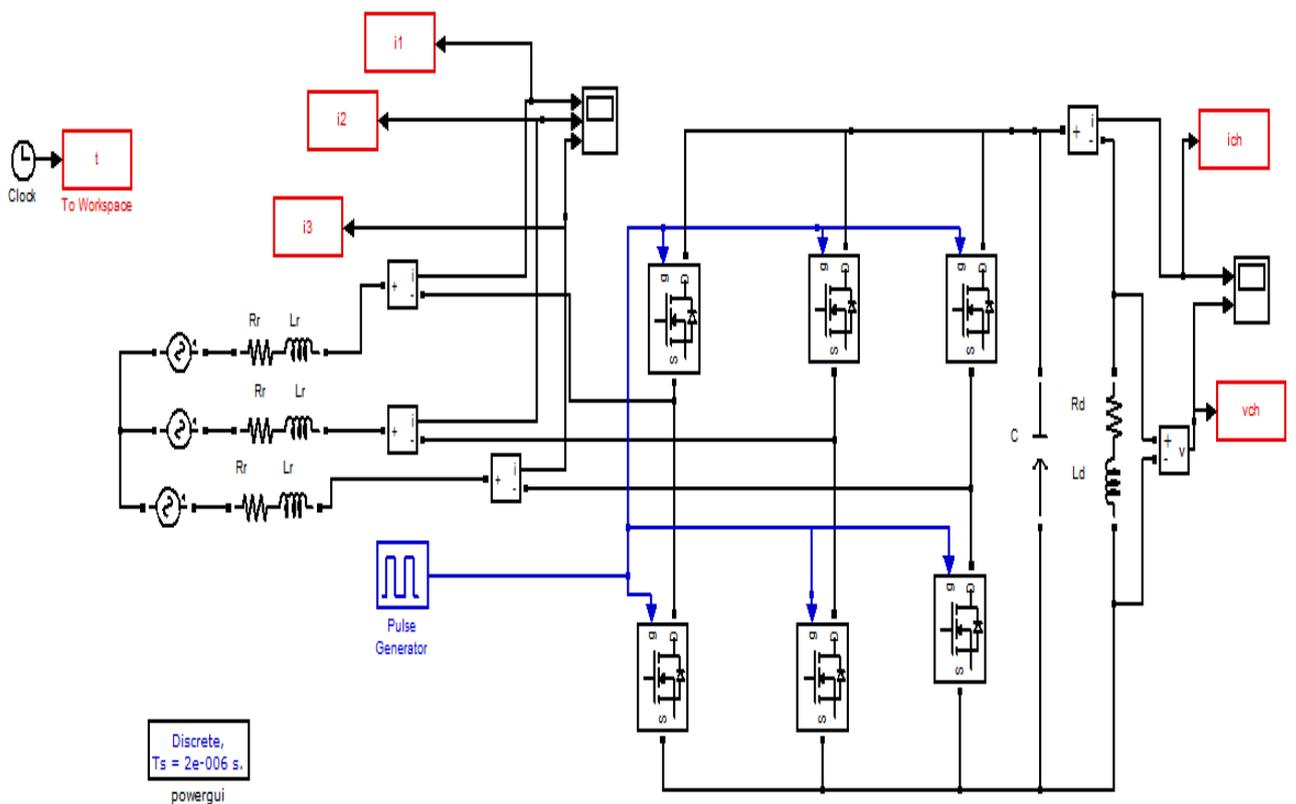


Figure 3.11 : Schéma de bloc de la simulation d'un redresseur triphasé classique.

4.2.1. Charge résistive :

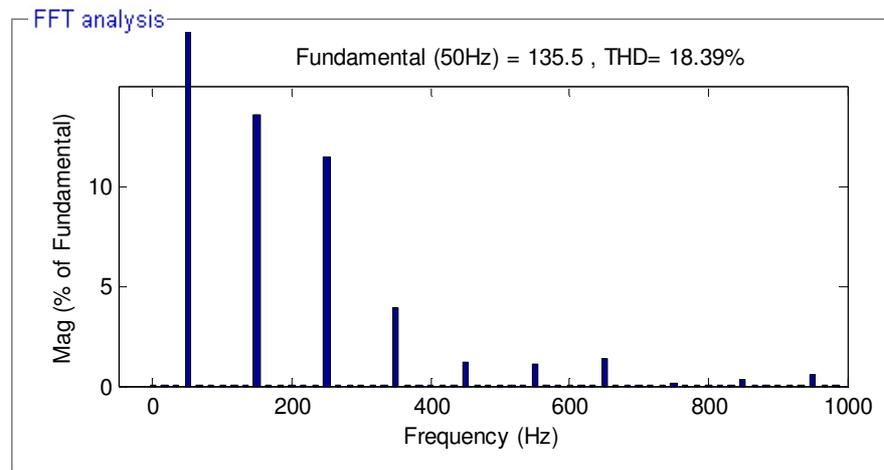
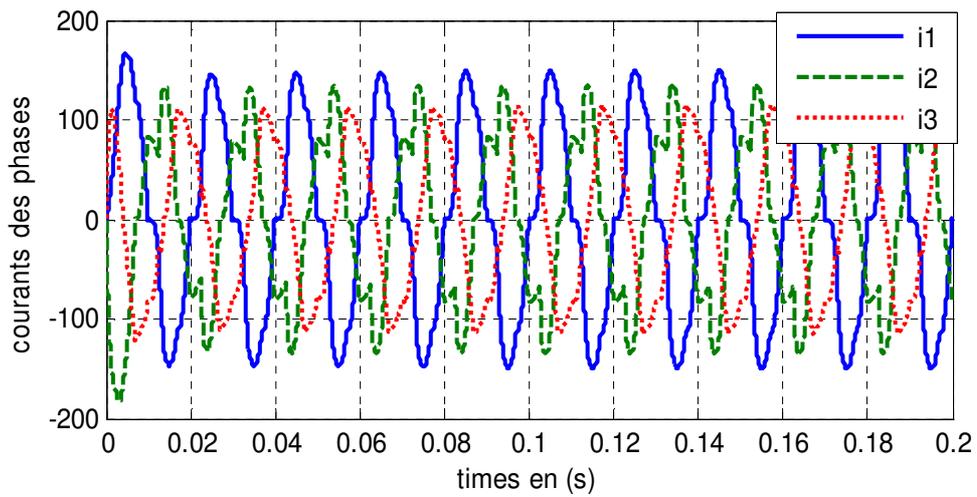


Figure 3.12 : Courant de source et son spectre d'harmoniques.

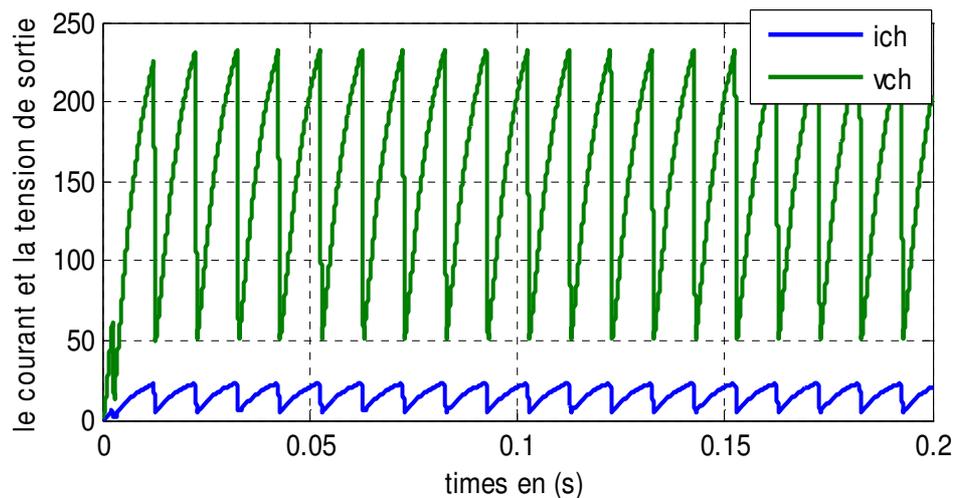


Figure 3.13 : Allure de courant et de tension sortie.

4.2.2. Charge inductive :

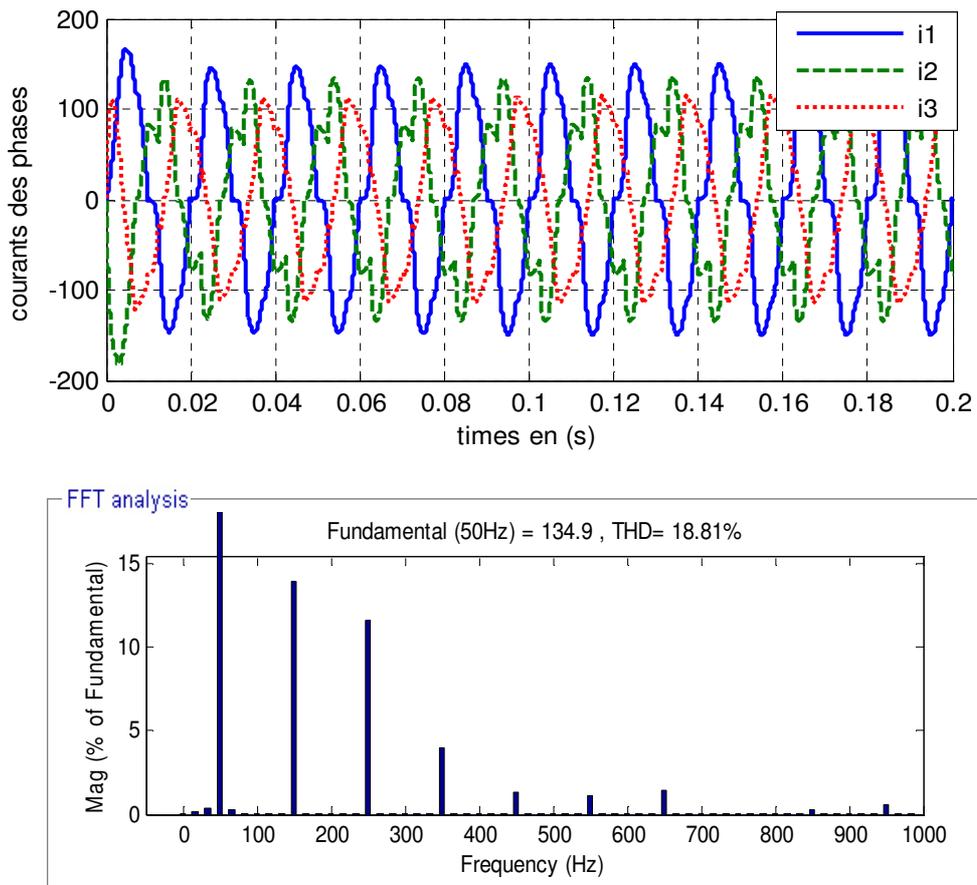


Figure 3.14 : Courant de source et son spectre d'harmoniques.

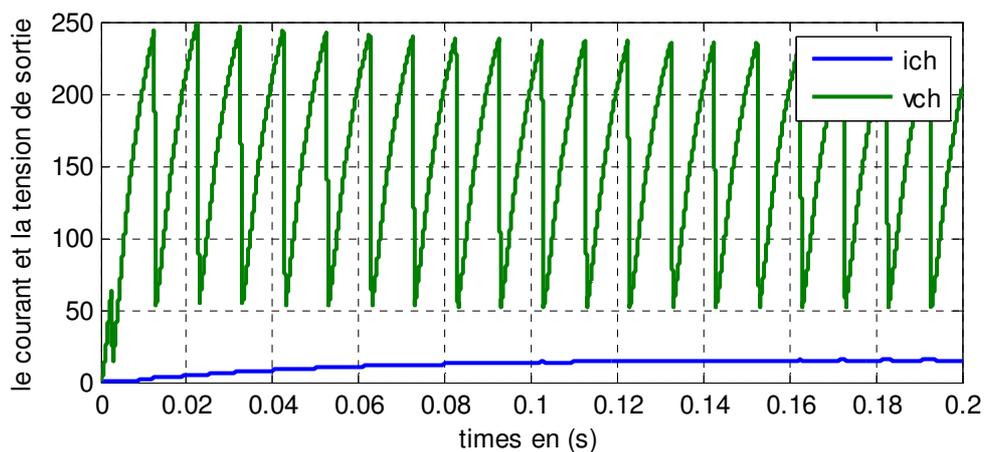


Figure 3.15 : Allure de courant et de tension de sortie.

Commentaire :

Les résultats de simulation pour les redresseurs triphasé classiques, on peut faire les observations suivantes :

- ✓ Charge résistive

• Figure 3.12 : Cette figure illustre le courant de source et son spectre d'harmoniques pour le redresseur triphasé classique avec une charge résistive. On peut observer une forme d'onde non sinusoïdale et la présence d'harmoniques dans le spectre.

• La figure 3.13 On remarque que L'allure du courant de sortie montre des variations importantes.

✓ charge inductive

• Figure 3.14 On remarque que Le courant d'entrée continue de présenter une distorsion harmonique notable, amplifiée par la charge inductive.

• Figure 3.15 On remarque que L'allure du courant de sortie présente des variations plus marquées, reflétant l'impact de la charge inductive

### 4.3. Redresseur monophasé MLI en absorption sinusoïdale de courant :

Le redresseur monophasé utilisant la modulation de largeur d'impulsion en absorption sinusoïdale de courant a été simulé dans Matlab/Simulink pour différentes charges, comme présenté dans la figure 3.16.

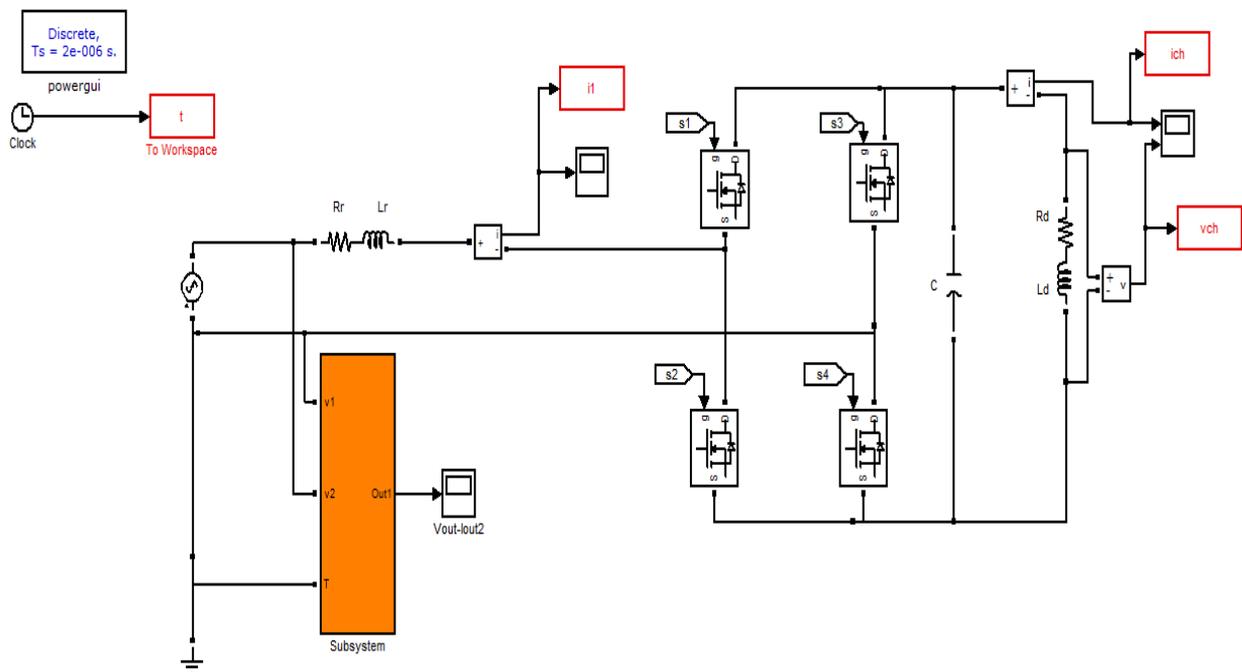


Figure 3.16 : Schéma de bloc de la simulation d'un redresseur monophasé MLI en absorption sinusoïdale de courant.

4.3.1. Charge résistive :

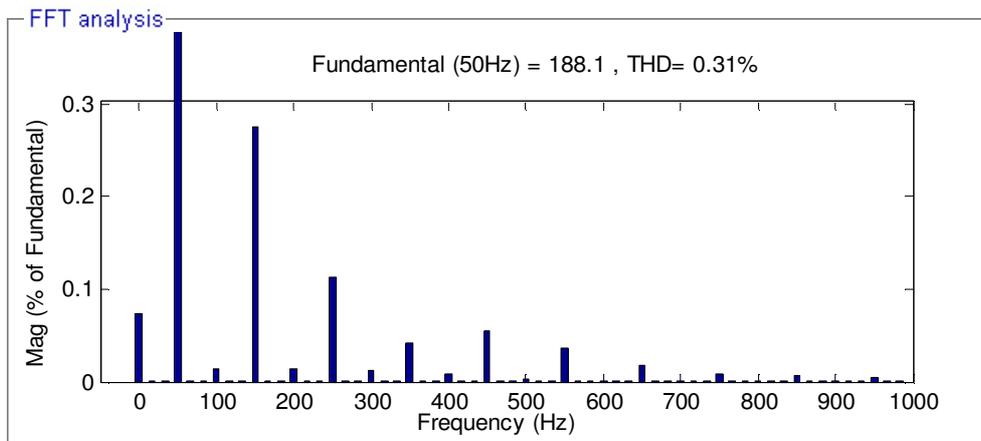
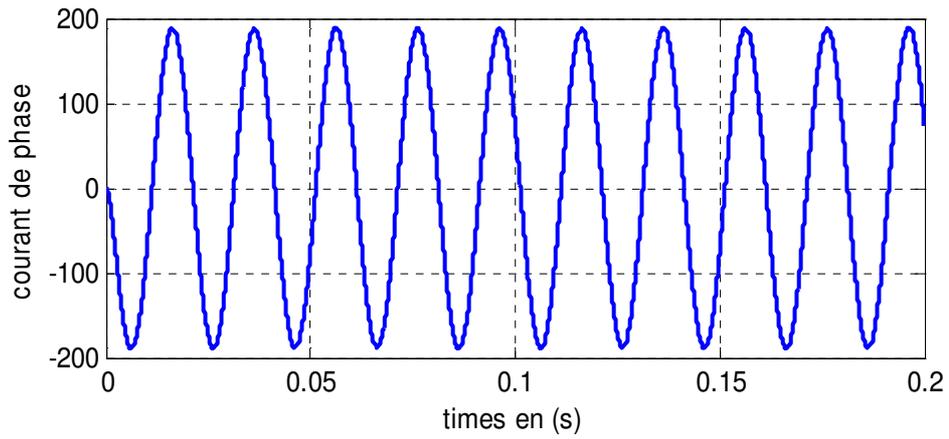


Figure 3.17 : Courant de source et son spectre d'harmoniques.

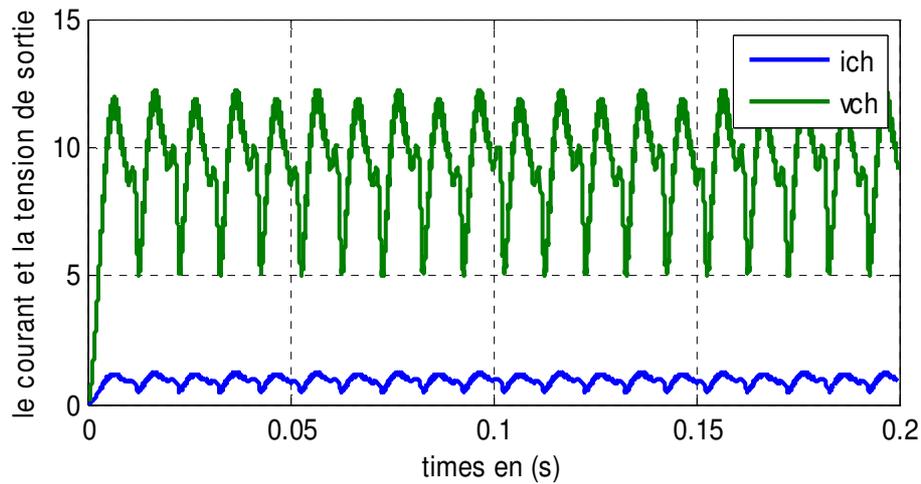


Figure 3.18 : Allure de courant et de tension de sorti.

4.3.2. Charge inductive :

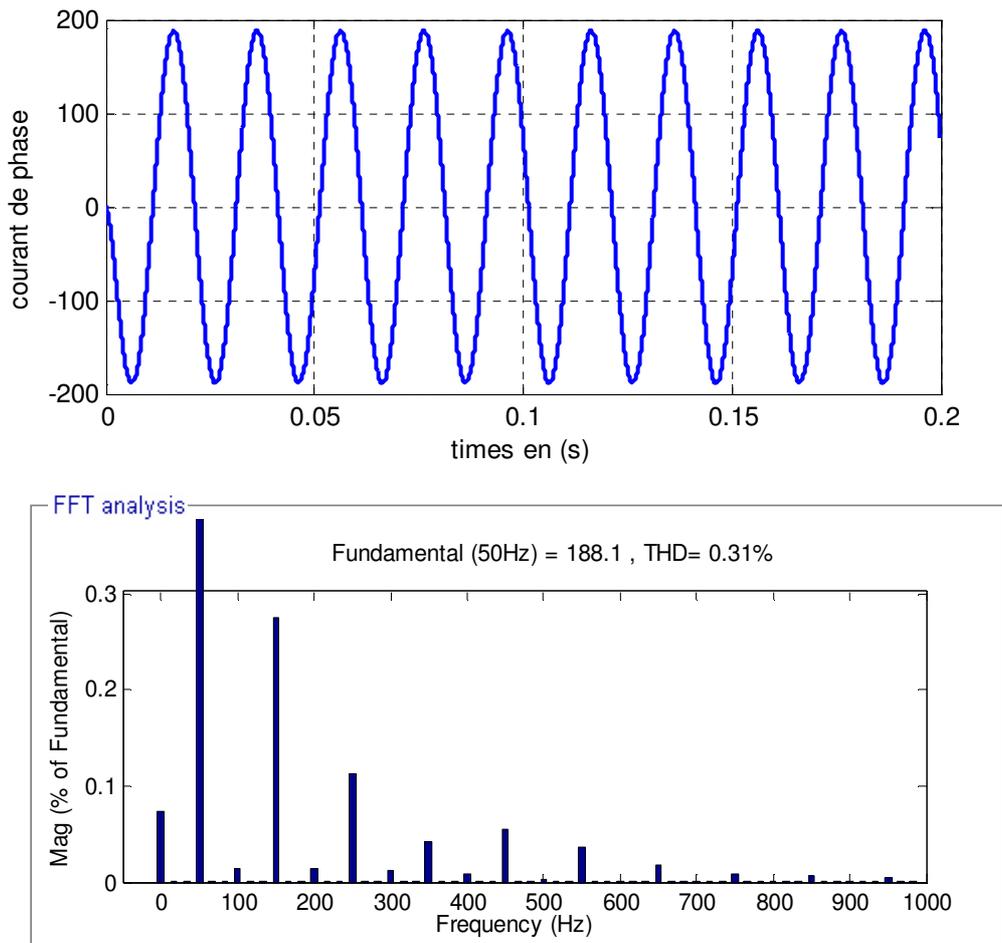


Figure 3.19 : Courant de source et son spectre d'harmoniques .

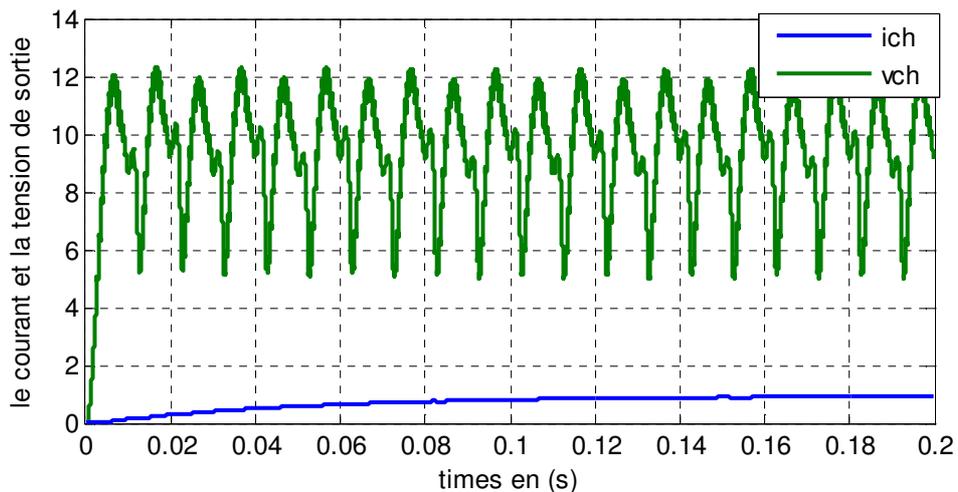


Figure 3.20 : Allure de courant et de tension de sortie.

En analysant les résultats de simulation, voici les observations que l'on peut faire :

- Dans les figures 3.17 et 3.19 montrent que le courant de source du redresseur monophasé MLI en absorption sinusoïdale présente une forme presque sinusoïdale, indiquant une distorsion

harmonique minimale. Cela confirme l'efficacité de la technique MLI pour réduire les distorsions harmoniques.

• Pour le redresseur monophasé MLI avec une charge résistive ou inductive, l'allure du courant de sortie présente également une forme sinusoïdale, reflétant la capacité du redresseur à produire un courant de sortie régulier et sans distorsion significative.

#### 4.4. Redresseur triphasé MLI en absorption sinusoïdale de courant :

Le redresseur triphasé en absorption sinusoïdale de courant utilisant la modulation de largeur d'impulsion en absorption sinusoïdale de courant a été simulé dans Matlab/Simulink pour différentes charges, comme présenté dans la figure 3.21.

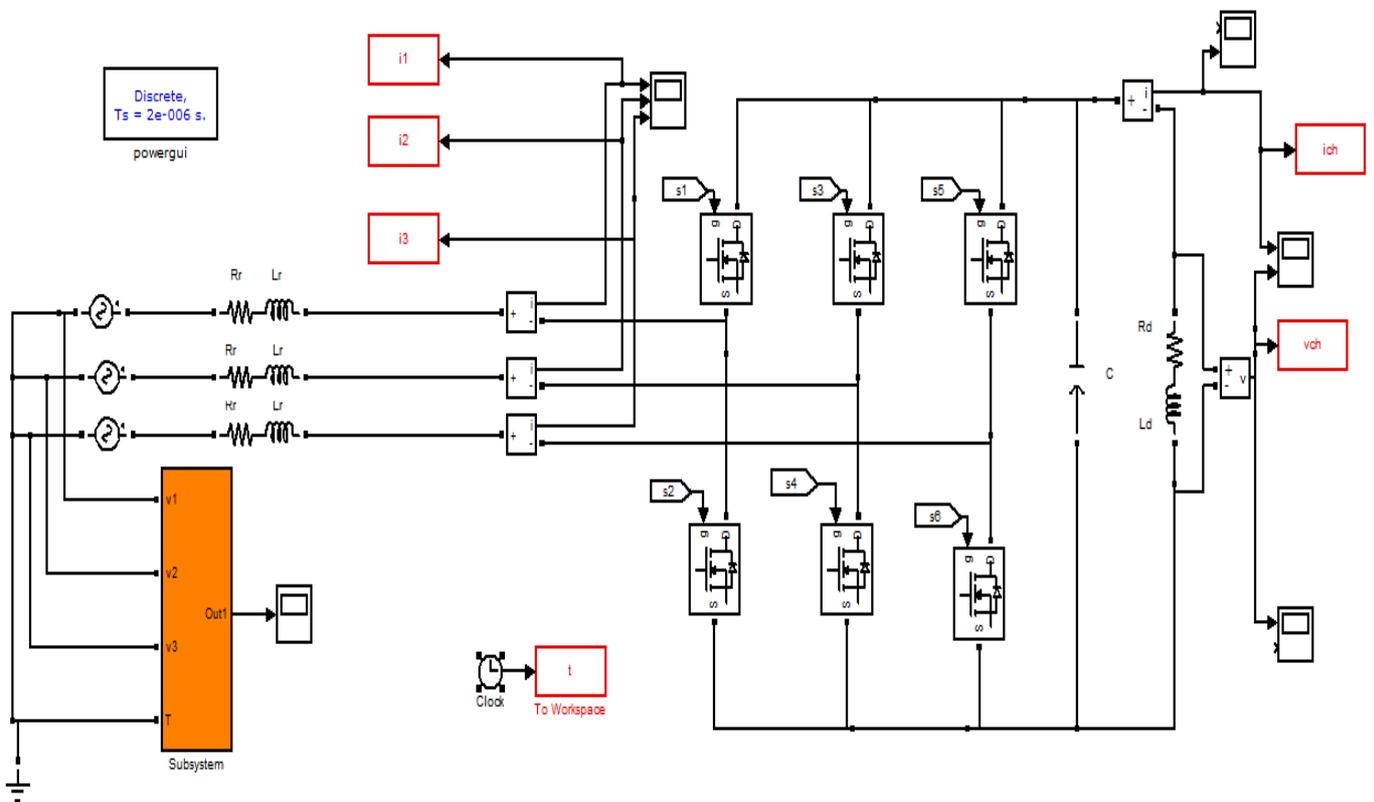


Figure 3.21 : Schéma de bloc de la simulation d'un redresseur triphasé MLI en absorption sinusoïdale de courant.

4.4.1. Charge résistive :

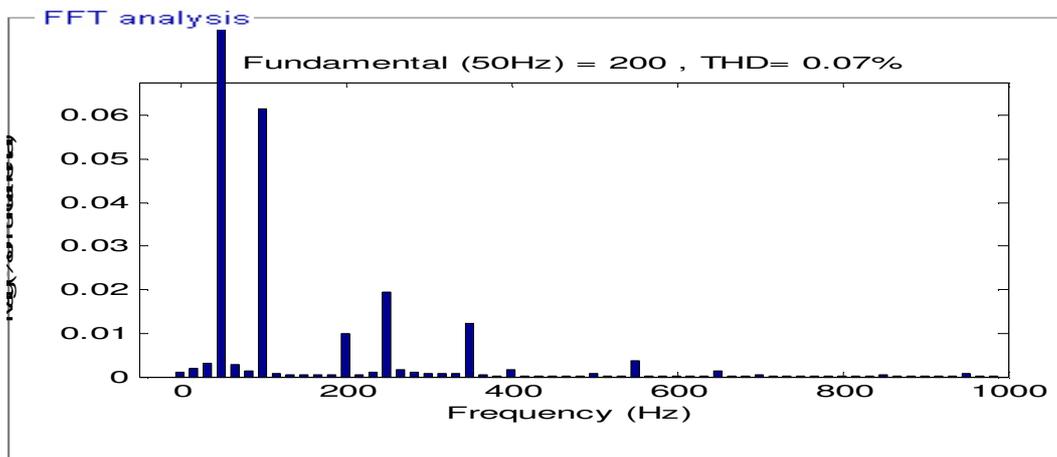
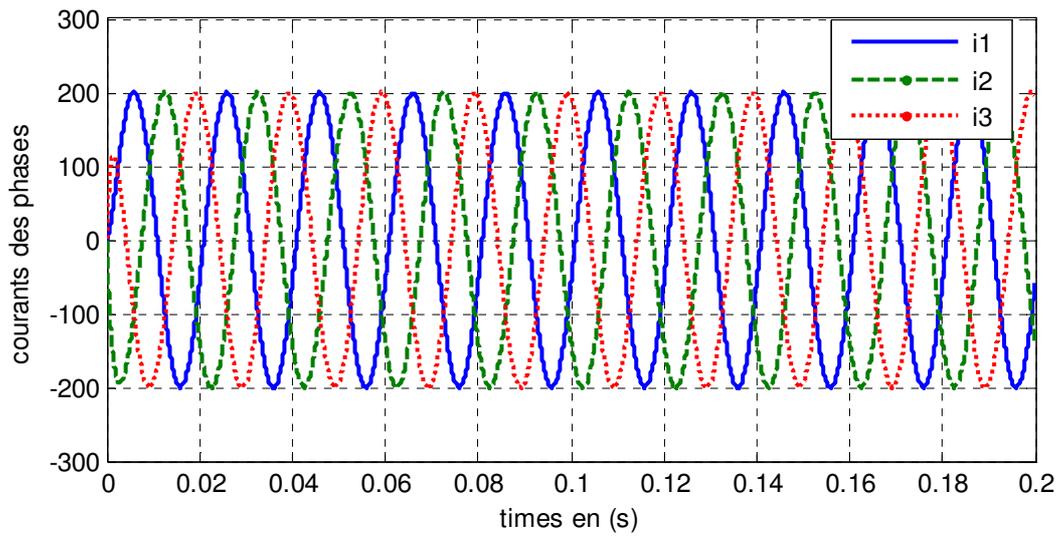


Figure 3.22 : Courant des phases et ses spectres d'harmoniques.

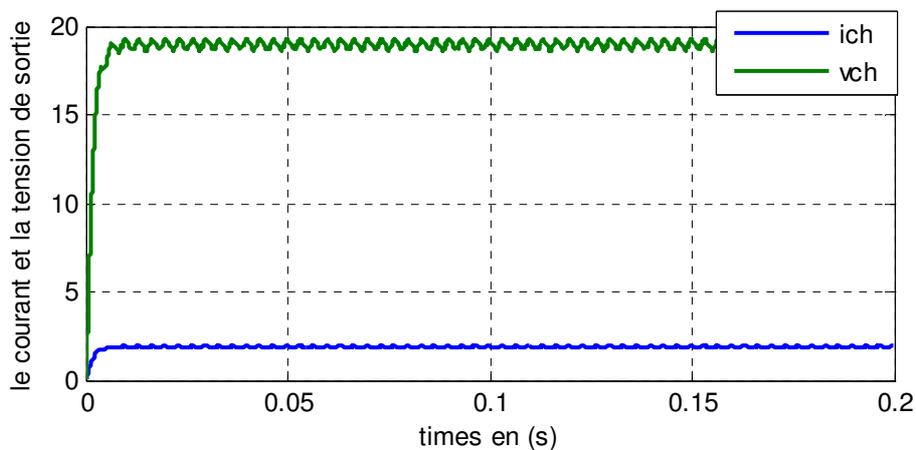


Figure 3.23 : Allure de courant et de tension de sortie.

4.4.2. Charge inductive :

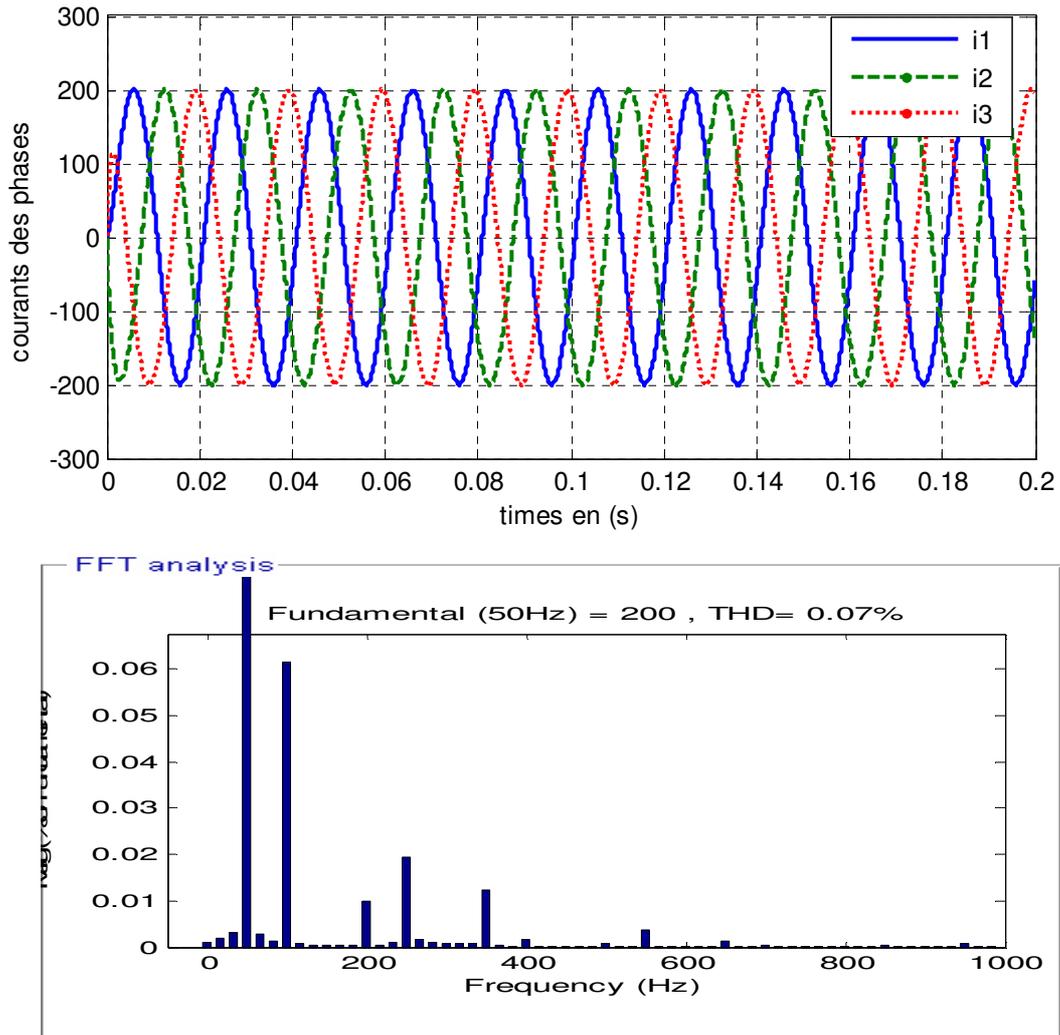


Figure 3.24 : Courant des phases et ses spectres d'harmoniques.

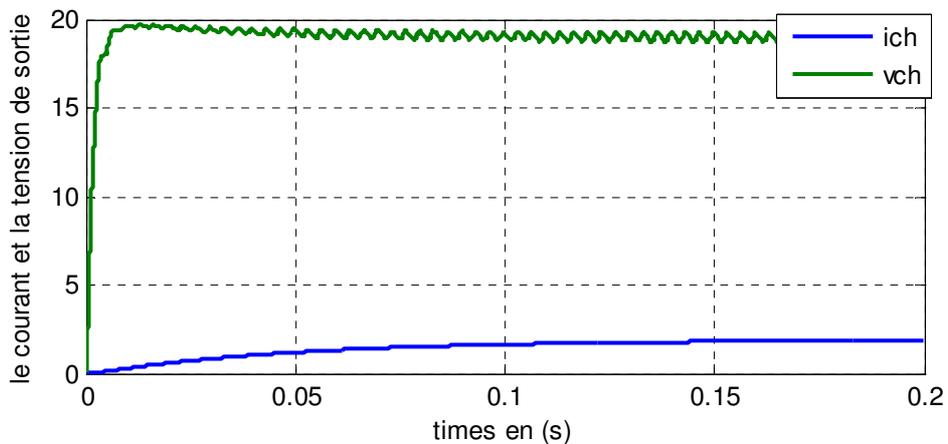


Figure 3.25 : Allure de courant et de tension de sortie.

Le modèle de simulation du redresseur triphasé MLI en absorption sinusoïdale de courant a été développé et les résultats sont présentés dans les figures 3.22 et 3.23 et 3.24 et 3.25.

- Les courants des trois phases du redresseur triphasé MLI en absorption sinusoïdale de courant sont sinusoïdaux (figure 3.22 et 3.24), indiquant une distorsion harmonique minimale.
- pour le redresseur triphasé MLI en absorption sinusoïdale de courant, l'allure du courant de sortie des trois phases reste sinusoïdale, confirmant la capacité du redresseur à fournir une sortie de courant stable et de bonne qualité.

**5. Résultats de simulation de THD pour les redresseurs monophasé et triphasé (classique et MLI en absorption sinusoïdale de courant) :**

Le tableau 3.1 représentant les résultats de simulation de la distorsion harmonique en fonction du temps pour les redresseurs monophasé et triphasé (classique et MLI en absorption sinusoïdale de courant) :

THD(%)	Redresseur classique		Redresseur MLI en absorption sinusoïdale de courant	
	Charge résistive	Charge inductive	Charge résistive	Charge inductive
Redresseur monophasé	22.43	23.69	0.31	0.31
Redresseur triphasé	18.39	18.81	0.07	0.07

Tableau 3.1: THD(%) pour différents types de redresseurs et charges.

**NB :**

Une remarque importante concernant les résultats de distorsion harmonique pour les redresseurs monophasé et triphasé :

- On observe une nette amélioration des résultats de distorsion harmonique lors de l'utilisation des redresseurs monophasé et triphasé à modulation de largeur d'impulsion (MLI) en absorption sinusoïdale de courant, par rapport aux redresseurs classiques.
- Dans le cas du redresseur monophasé MLI, le THD est réduit à seulement 0,31% pour les charges résistives et inductives, ce qui représente une diminution significative par rapport aux 22,43% et 23,69% respectivement pour les redresseurs monophasés classiques.
- De même, pour le redresseur triphasé MLI, le THD est considérablement réduit à 0,07% pour les charges résistives et inductives, comparé aux 18,39% et 18,81% respectivement pour les redresseurs triphasés classiques.

• Ces résultats témoignent des avantages des redresseurs MLI en termes de réduction de la distorsion harmonique, ce qui permet d'obtenir une meilleure qualité de courant et de réduire les interférences dans les systèmes électriques.

## **6. Conclusion :**

La simulation des redresseurs monophasé et triphasé classiques ainsi que des redresseurs monophasé et triphasé MLI en absorption sinusoïdale de courant a permis de tirer plusieurs conclusions.

Pour le redresseur monophasé classique, le courant de phase présente une forme non sinusoïdale avec une distorsion harmonique relativement élevée. Cela peut entraîner des perturbations sur le réseau électrique et affecter la qualité de l'énergie fournie.

En revanche, le redresseur monophasé MLI en absorption sinusoïdale de courant présente un courant de phase pratiquement sinusoïdal avec une distorsion harmonique minimale. Cela indique une amélioration significative de la qualité de l'énergie, réduisant les perturbations électromagnétiques et offrant un fonctionnement plus efficace des appareils électriques.

Concernant le redresseur triphasé classique, le courant de phase présente également une forme non sinusoïdale avec une distorsion harmonique plus élevée. Cela peut entraîner des déséquilibres dans le réseau triphasé et causer des problèmes de fonctionnement pour les charges connectées.

En revanche, le redresseur triphasé MLI en absorption sinusoïdale de courant présente des courants de phase sinusoïdaux avec une distorsion harmonique réduite. Cela contribue à un fonctionnement équilibré du réseau triphasé, améliorant la stabilité et la qualité de l'énergie électrique fournie aux charges.

En conclusion, les simulations ont démontré que les redresseurs monophasés et triphasés MLI en absorption sinusoïdale de courant offrent des avantages significatifs en termes de réduction de la distorsion harmonique et d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique par rapport aux redresseurs classiques.

Ces techniques permettent un fonctionnement plus efficace et stable du système électrique, réduisant les perturbations et offrant des performances optimales pour les appareils connectés.

## **Conclusion Générale**

Ce mémoire d'étude et de simulation a porté sur l'étude approfondie et la simulation du redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) utilisé dans l'absorption sinusoidale de courant. Nous avons examiné différents aspects liés aux convertisseurs statiques, à la qualité de l'énergie électrique, ainsi qu'aux généralités et aux simulations des redresseurs MLI.

Dans le première chapitre, nous avons présenté les généralités sur les convertisseurs statiques et la qualité de l'énergie électrique. Nous avons souligné l'importance de ces concepts dans les systèmes d'alimentation électrique, en mettant en évidence les perturbations courantes et les normes associées à la qualité de l'énergie. Cette compréhension est cruciale pour évaluer l'impact du redresseur MLI sur la qualité de l'énergie électrique.

Le deuxième chapitre a porté sur les généralités sur le redresseur MLI. Nous avons exploré le principe de fonctionnement du redresseur MLI et examiné les différentes méthodes de modulation de largeur d'impulsion utilisées. Comprendre ces principes est essentiel pour concevoir et contrôler efficacement le redresseur MLI.

Dans le dernière chapitre , nous avons réalisé des simulations à l'aide de MATLAB pour évaluer les performances des redresseurs monophasés et triphasés classiques, ainsi que des redresseurs monophasés et triphasés MLI en absorption sinusoidale de courant. Ces simulations nous ont permis de comparer les caractéristiques et les résultats obtenus par chaque type de redresseur. Nous avons analysé des paramètres tels que la distorsion harmonique, le facteur de puissance, l'efficacité et la réponse dynamique.

En conclusion, ce mémoire d'étude et de simulation a fourni une compréhension approfondie du redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) en absorption sinusoidale de courant. Nous avons étudié les généralités sur les convertisseurs statiques et la qualité de l'énergie électrique, ainsi que les principes de fonctionnement et les caractéristiques du redresseur MLI. Les simulations réalisées ont permis d'évaluer et de comparer les performances des redresseurs classiques et MLI dans des conditions d'absorption sinusoidale de courant. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des redresseurs dans diverses applications, en vue d'améliorer l'efficacité énergétique et de garantir une meilleure qualité de l'énergie électrique.

## Références bibliographiques

- [1] **A. BOULAHIA**, "Technique de commande avancées des convertisseurs statique appliquées à la qualité d'énergie électrique", Thèse de doctorat, Universités Des Freres Mentouri Constantine, 2018.
- [2] **A. KASMIOURI**, " Étude par simulation de la commande MLI d'un redresseur de courant ", mémoire de master en réseau électrique , Université de Mohamed Khider de Biskra, 2019 .
- [3] **D. ould Abdeslam** , "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension " , these de doctorat ,Université de Haute Alsace U.F.R. des Sciences et Techniques, 2005.
- [4] **N. Cherrati**, " Optimisation des portes de commutation d'un hacheur survolteur (BOOST) ", mémoire de master en électronique instrumentation , université Saad Dahlab de Blida, 2020 .
- [5] **K. YAHIA CHERIF, R. BEDJIH**, " Commande floue d'un redresseur MLI triphasé", mémoire de master en électrotechnique industriel , Université A.Mira-Bejaia,2020 .
- [6] **Schneider Electric ,Wiki Installation Electrique**, "Généralité sur les surtensions", [https://fr.electrical-installation.org/frwiki/La\\_protection\\_contre\\_les\\_surtensions](https://fr.electrical-installation.org/frwiki/La_protection_contre_les_surtensions), consulter le : 20/042023.
- [7] **P. Ferraci**, "La qualité de l'énergie électrique, Cahier technique", n° 199, Schneider Electric, Grenoble, France, octobre 2001, 32 pages, pdf, ,Disponible à l'adresse, <http://www.surprises.ch/HT/annexes/CT-199.pdf> .
- [8] **Sensagent**, "Courant harmonique", Dans le dictionnaire Sensagent Le Parisien, Disponible à l'adresse, <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Courants%20harmoniques/fr-fr/>, consulter le : 20/032023.
- [9] **ABB**, " «Harmoniques et convertisseurs de fréquence", Guide Technique, n° 6, Suisse, 2012, 35 pages, pdf, Disponible à l'adresse, [https://library.e.abb.com/public/382f7dce4fa69cf5c12579b1004ccf19/FR\\_Technical\\_guide\\_No\\_6\\_REVC.pdf](https://library.e.abb.com/public/382f7dce4fa69cf5c12579b1004ccf19/FR_Technical_guide_No_6_REVC.pdf).

- [10] **Schneider Electric**, "Détection et filtrage des harmoniques", Guide expert basse tension, n°4, France, juin 2009, 45 pages, pdf, Disponible à l'adresse, [https://download.schneiderelectric.com/files?p\\_enDocType=Technical+leaflet&p\\_File\\_Name=DBTP152GUI\\_FR+%28web%29.pdf&p\\_Doc\\_Ref=DBTP152GUI\\_FR](https://download.schneiderelectric.com/files?p_enDocType=Technical+leaflet&p_File_Name=DBTP152GUI_FR+%28web%29.pdf&p_Doc_Ref=DBTP152GUI_FR)
- [11] **N.Belhaouchet**, "Fonctionnement a frequence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancees application : amelioration de la qualite de l'energie", thèse doctorat en Sciences, université Ferhat abbas de Setif, 2011.
- [12] **M. A. E. Alali**, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques)", thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur, Strasbourg I, 12 Octobre 2002.
- [13] **Y.Touzani**, "commande aléatoire du convertisseur buck-boost a prélèvement sinusoïdal du courant ", thèse doctorat en électronique et système, université de Blaise Pascal, Juillet 2006.
- [14] **M. Lemaini** : " Contrôle de puissance d'un redresseur MLI ", Mémoire de master , Université de Mohamed Khider de Biskra, 2018.
- [15] **T. Gouraud**, " Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique ", Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de Nantes, 1997.
- [16] **A.Lahmar**, "Filtrage et qualité d'énergie", mémoire d'ingénieur, Université Badji Mokhetar Annaba, 2017.
- [17] **A. Boulehia**, "Etude des convertisseurs statiques destiné à la qualité de l'énergie électrique", Mémoire de Magistère, Université de Constantine, 2009.
- [18] **J. Fadat, Y. Dorali**, "Redresseur à absorption de courants sinusoïdaux : commande dans le repère triphasé", 3EI, no. 52, pp. 46-59, Mars 2008.
- [19] **M. S. Djebbar**, "Etude comparative des redresseurs cascades et multiniveaux à commande MLI", memoire de Magistère en Electrotechnique, Université de Mentouri Constantine, 2005.

[20] **A.fekik**, "Commande direct en puissance d'un redresseur MLI par DSP", thèse de doctorat, Université de Mouloud Mammeri tizi-ouzou, 2018.

[21] **P. Ladoux, M. Metz** ,"Utilisation de l'onduleur de tension MLI pour la correction du facteur de puissance", Les convertisseurs propres, 3EI, no. 28, pp. 5-15, Mars 2002.

[22] **A. Rahoui**, "Techniques avancées pour la commande et l'observation d'un redresseur MLI ", Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2017.

[23] **S. Ouchen**, "Contribution à la Commande Directe de Puissance Dédiée au Filtrage Actif, Associé à une Source Photovoltaïque", thèse de doctorat, université de Biskra, 2017.

[24] **S. Lechat Sanjuan**, "Voltage oriented control of three phase boost pwm converters design, simulation and implimentation of a 3 phase boost battery charger", Master of Science, Chalmers University of Technology, 2010.

# Annexe

## Paramètres du redresseur

Redresseur	Redresseur classique		Redresseur MLI en absorption sinusoidale de courant	
	Triphasé	Monophasé	Triphasé	Monophasé
Tension de réseau(Vr)	220V	220V	220V	220V
Résistance de ligne (Rr)	1Ω	1Ω	1Ω	1Ω
Inductance de ligne (Lr)	0.001H	0.0015H	0.001H	0.0015H
Condensateur de filtrage (C)	0.005F			
Charge Résistive(Rd)	10Ω			
Charge inductive( Rd, Ld)	10Ω, 0.5H			
Fréquence f	50HZ			