



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تليجي بالأغواط

UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : Electrotechnique



Mémoire De Master

Option : Electrotechnique Industrielle

Présenté par : BOURAS Mohammed Lamine

ABI Smail Toufik

Etude par simulation d'un onduleur de tension monophasé et triphasé à commande MLI

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Ameur Aissa

Rogti Fatiha

Bensaoucha Saddam

Professeur.

Professeur.

M.C.B.

Président

Encadreur

Examineur

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Avec tout le respect, je tiens à remercier tout le corps enseignant de l'Université AMAR TELIDJI LAGHOUAT qui m'a suivi tout au long de mes études.

Je tiens à remercier :

Mon encadreur Madame **Rogti Fatiha** professeur à l'université de Laghouat, pour son suivi continu ainsi que sa bonne orientation du travail. Mes remerciements vont également à Mr : **Mekhanet Mohamed** le chef d'option d'électrotechnique industrielle pour ces conseils précieux.

De plus, Nous remercions les membres du jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.

En fin je remercie tous ceux qui m'ont aidés de près ou de loin afin d'achever ce travail en particulier mes collègues du département électrotechnique.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :
A mes chers parents, pour leur soutien
inconditionnel, leurs encouragements, et bien sûr pour
m'avoir permis de réaliser mes études dans les
meilleures conditions.*

*A mes frères.
A toute ma famille.
A tous mes amis.*

*A tous les enseignants qui m'ont aidé de
proche ou de loin pour être un jour un Master.
A ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée
de mes études.*

BOURAS Mohammed Lamine

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chers parents, pour leur soutien
inconditionnel, leurs encouragements, et bien sûr pour
m'avoir permis de réaliser mes études dans les
meilleures conditions.*

A mes frères.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

*A tous les enseignants qui m'ont aidé de
proche ou de loin pour être un jour un Master.
A ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée
de mes études.*

ABI Smail Toufik

Résumé

Les onduleurs sont des convertisseurs destinés à alimenter des récepteurs à courant alternatif à partir d'une source continue. Ils sont généralement monophasés ou triphasés. Dans ce travail, nous avons réalisé un système pour simuler les onduleurs de tension monophasé et triphasé, basé sur différentes modes de commande. Nous avons choisi de travailler avec simulation de l'onduleur de tension monophasé et triphasé pour la commande MLI sinus triangle et MLI sinus dent de scie, et avec la machine asynchrone pour la commande MLI sinus triangle et MLI sinus dent de scie. La programmation de cette commande se fera par MATLAB R2013a (simulink).

Les mots clés : L'onduleur de tension monophasé et triphasé, MLI, la machine asynchrone, MLI sinus triangle et MLI sinus dent de scie, MATLAB R2013a (simulink).

Abstract

Inverters are converters intended to supply AC receivers from a DC source. They are usually single-phase or three-phase. In this work, we realized a system to simulate single-phase and three-phase voltage inverters, based on different control modes. We have chosen to work with simulation of the single-phase and three-phase voltage inverter for the sine triangle PWM and control, and with the asynchronous machine for the sine triangle PWM and sine sawtooth PWM control. MATLAB R2013a will do the programming of this command (Simulink).

Keywords: The single-phase and three-phase voltage inverter, PWM, The asynchronous machine, PWM sine delta and PWM sinus sawtooth control, MATLAB R2013a (Simulink).

الملخص

المحولات هي محولات تهدف الى تزويد مستقبلات التيار المتردد من مصدر التيار المستمر. عادة ما تكون أحادية الطور أو ثلاثية الطور. في هذا العمل أدركنا نظاما لمحاكاة محولات الجهد أحادية الطور وثلاثية الطور بناء على أوضاع تحكم مختلفة. لقد اخترنا العمل مع محاكاة عاكس الجهد أحادي الطور و ثلاثي الطور للتحكم في المثلث الجيبي PWM , و مع الجهاز غير المتزامن لمثلث الجيب PWM و التحكم في سن المنشار الجيبي PWM سيتم تنفيذ برمجة هذا الأمر بواسطة MATLAB R2013a (Simulink)

الكلمات المفتاحية: عاكس الجهد أحادي الطور وثلاثي الطور، محولات PWM، الآلة غير المتزامنة لـ PWM sine delta و MATLAB R2013a (Simulink) , PWS sinus sawtooth

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Table de matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

Chapitre 1: Etude de l'onduleur monophasé et triphasé

1.1 Définition2

1.2 Classification des onduleurs3

1.2.1 Selon la réversibilité.....3

1.2.2 Selon la nature de l'alimentation4

1.2.3 Selon la nature de la charge6

1.3 Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé6

1.4 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé10

1.5 Les onduleur multi niveaux11

1.6 Les applications des onduleur.....11

1.6.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone12

1.6.2 Alimentation de secours UPS.....12

1.6.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes13

1.7 Différents types de commandes des onduleurs13

1.7.1 La commande en pleine onde13

1.7.2 La commande MLI.....14

Chapitre 2 : Etude de la technique MLI

2.1	Principe de base de MLI	16
2.2	Classification des stratégies de modulation MLI.....	16
2.3	Caractéristiques de la modulation de MLI.....	18
2.4	Différente technique de modulation en MLI	18
2.5	Technique de production d'onde MLI.....	22
2.5.1	Technique analogique.....	22
2.5.2	Tzchnique numérique	22
2.5.3	Technique hybride.....	23
2.6	Différentes techniques de modulation de longueur d'impulsions	23
2.6.1	Lamodulation linéaire multiple (UPWM).....	23
2.6.2	La modulation sinusoidale triangulaire unipolaire (SPWM)	24
2.6.3	La modulation sinusoidale partielle (ou modifie) (MSPWM)	24
2.6.4	La modulation sinusoidale avec porteuse bidirectionnelle	25
2.7	Principaux avantages de la MLI	25

Chapitre 3 : Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie avec charge RL

3.1	Commande MLI sinus-triangle.....	26
3.1.1	Propriétés.....	27
3.1.2	Tension de référence	27
3.1.3	Les schéma bloc de la technique de commande MLI d'un onduleur triphasé avec la charge.....	28
3.1.4	Les schéma bloc de la technique de commande MLI d'un onduleur triphasé avec la charge	31
3.2	Commande MLI sinus-dent de scie	37
3.3	Interprétation des résultats	45

Chapitre 4: Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie associé à MAS

4.1	Simulation onduleur triphasé à commande MLI sinus dent de scie et MLI sinus triangle	47
4.2	Simulation onduleur monophasé à commande MLI sinus dent de scie et MLI sinus triangle.	51
4.3	Interprétation des résultats	55
Conclusion générale.....		57
Bibliographies.....		58

Liste des figures

Figure 1-1: Schéma de principe de l'onduleur.	2
Figure 1-2 : Schéma d'un système photovoltaïque non raccordé au réseau.....	3
Figure 1-3 : Système photovoltaïque connecté au réseau.	4
Figure 1-4 : Schéma pour l'onduleur de tension.	5
Figure 1-5 : structure de montage d'un onduleur en pont complet.	6
Figure 1-6 : Les cas possibles de commutation de l'onduleur.	8
Figure 1-7: Structure principal d'un onduleur monophasé en demi-pont..	9
Figure 1-8 : Schéma d'onduleur de tension triphasé.	10
Figure 1-9 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone.	12
Figure 1-10 : Alimentation de secours	12
Figure 1-11 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes.	13
Figure 1-12 : Durée de conduction des interrupteurs.	14
Figure 2-1: Schéma synoptique de la MLI.	16
Figure 2-2 : L'échantillonnage naturel à un seul front.	19
Figure 2-3 : Technique d'échantillonnage à deux fronts.	19
Figure 2-4 : Echantillonnage régulier symétrique.	20
Figure 2-5 : Echantillonnage régulier asymétrique.	20
Figure 2-6 : Comparaison aléatoire.	21
Figure 2-7 : Comparaison synchronisée.	21
Figure 2-8 : Technique analogique.....	22
Figure 2-9 : Technique Numérique.	22
Figure 2-10 : Technique Hybride.	23
Figure 2-11 : La modulation de largeur d'impulsions multiples.	23
Figure 2-12 : MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire.	24
Figure 2-13 : La modulation sinusoïdale modifiée.....	24
Figure 2-14 : La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle.	25
Figure 3-1 : Principe de la commande sinusoïdale.....	26
Figure 3-2 : Le schéma bloc de la technique de commande MLI d'un onduleur monophasé avec la charge.....	28
Figure 3-3 : Illustration de la MLI SINUS TRIANGLE.	28

Figure 3-4 : Le courant et la tension de sortie d'onduleur monophasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega$).	29
Figure 3-5 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI avec $R=20\Omega, E=100V$.	29
Figure 3-6 : Spectre harmonique de tension de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI avec $R=20\Omega, E=100V$.	29
Figure 3-7 : Le courant et la tension de sortie d'onduleur monophasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega, L=0.2H$).	30
Figure 3-8 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI avec $R=20\Omega, E=100V, L=0.2H$.	30
Figure 3-9 : Spectre harmonique de tension de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI avec $R=20\Omega, E=100V, L=0.2H$.	30
Figure 3-10 : Le schéma bloc de la technique de commande MLI d'un onduleur triphasé avec la charge.	31
Figure 3-11 : Le courant de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega$).	31
Figure 3-12 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI avec $R=20\Omega, E=100V$ et $f=50Hz$.	32
Figure 3-13 : La tension de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega$).	33
Figure 3-14 : Spectre harmonique de la tension de la sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI avec $R=20\Omega, E=100V$ et $f=50Hz$.	34
Figure 3-15 : Le courant de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega, L=0.2H$).	34
Figure 3-16 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI avec $R=20\Omega, E=100V, L=0.2H$ et $f=50Hz$.	35
Figure 3-17 : La tension de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega, L=0.2H$).	35
Figure 3-18 : Spectre harmonique de la tension de la sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI avec $R=20\Omega, E=100V, L=0.2H$ et $f=50Hz$.	36
Figure 3-19 : Illustration de la mli sinus-dent de scie.	37
Figure 3-20 : Le courant et la tension de sortie d'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$).	38
Figure 3-21 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega, E=100V$.	38

Figure 3-22 : Spectre harmonique de la tension de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega, E=100V$	38
Figure 3-23 : Le courant et la tension de sortie d'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$, $L=0.2H$).	39
Figure 3-24 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega, E=100V, L=0.2H$	39
Figure 3-25 : Spectre harmonique de la tension de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega, E=100V, L=0.2H$	39
Figure 3-26 : Le courant de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$, $L=0.2H$).	40
Figure 3-27 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega, E=100V, L=0.2H$	41
Figure 3-28 : La tension de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$).	41
Figure 3-29 : Spectre harmonique de la tension de sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega, E=100V$	42
Figure 3-30 : Le courant de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$).	42
Figure 3-31 : Spectre harmonique de courant de sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega, E=100V$	43
Figure 3-32 : La tension de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$).	44
Figure 3-33 : Spectre harmonique de tension de sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega, E=100V$	45
Figure 4-1 : Schéma bloc du système étudié.	47
Figure 4-2 : Courant rotorique de la MAS (MLI sinus triangle).	48
Figure 4-3 : Courant Statorique de la MAS (MLI sinus triangle).	48
Figure 4-4 : Vitesse de rotation de la MAS (MLI sinus triangle).	48
Figure 4-5 : Couple électromagnétique de la MAS. (MLI sinus triangle).	49
Figure 4-6 : Spectre harmonique de courant statorique (MLI Sinus Triangle).	49
Figure 4-7 : Courant rotorique (MLI Dent de scie).	49
Figure 4-8 : Courant statorique (MLI Dent de scie).	50
Figure 4-9 : Vitesse de rotation (MLI Dent de scie).	50

Figure 4-10 : Couple électromagnétique (MLI Dent de scie).	50
Figure 4-11 : Spectre harmonique de courants statorique (MLI Dent de scie).	51
Figure 4-12 : Le schéma bloc de la technique de commande MLI sinus dent de scie et sinus triangle d'un onduleur monophasé en charge.	51
Figure 4-13 : Couple électromagnétique (MLI dent de scie).	52
Figure 4-14 : Vitesse de rotation (MLI dent de scie).	52
Figure 4-15 : Allure de courant (MLI dent de scie).	52
Figure 4-16 : Spectre harmonique de courants statorique (is) de la machine associer avec onduleur monophasé à commande MLI sinus dent de scie.	53
Figure 4-17 : Fonctionnement en charge de la machine asynchrone associé à un onduleur monophasé a la commande MLI Sinus Triangle. (a) : Vitesse de rotation, (b) : courant de charge, (c) : Couple électromagnétique.....	54
Figure 4-18 : Spectre harmonique de courants statorique (is) de la machine associer avec onduleur monophasé a commande MLI Sinus triangle.	54

Liste des tableaux

Tableau 1-1: Les configurations possible de Q1, Q2, Q3, Q4.	7
Tableau 3-1 : La simulation d'onduleur monophasé.....	45
Tableau 3-2 : La simulation d'onduleur triphasé.	45
Tableau 4-1 : Résultats de l'onduleur monophasé.	55
Tableau 4-2 : Résultats de l'onduleur triphasé.	55

Introduction générale

L'alimentation sans interruption des équipements électrique industriels, et l'entraînement électrique à vitesse variable des machines électriques, était l'objectif de plusieurs études dans ces dernières années grâce à l'évolution technologique des convertisseurs statique qui représente le cœur de tous systèmes électriques. L'association des convertisseurs statiques aux machines asynchrone permet de réaliser des entraînements électriques à vitesse variable tout en conservant les avantages bien connus de ce type de moteur, à savoir le faible coût, robustesse et entretien réduit [1]. La fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée [2]. Les onduleurs triphasés sont les plus utilisés dans les industries à cause de leurs faibles prix, très approuvés du côté de la réalisation et facile du côté de la commande électrique [3].

Ces dernières années, les domaines de l'électronique de puissance se sont développés considérablement et offrent un potentiel énorme pour la conversion d'énergie électrique [4]. La recherche dans ce domaine considère plusieurs aspects, notamment les topologies des convertisseurs, les structures et les performances des interrupteurs de puissance et ainsi que les techniques de commande [5].

Les convertisseurs statiques monophasés à structure tension sont des éléments essentiels de nombreux systèmes d'électronique de puissance tels que les variateurs de vitesse, les alimentations sans interruption et les filtres actifs. La sécurité de ces systèmes, leur fiabilité, leurs performances, la qualité de l'énergie et la continuité de service constituent aujourd'hui des préoccupations majeures dans le domaine de l'énergie [6].

L'objectif principal de notre travail est d'étudier et de simuler un convertisseur statique monophasé et triphasé (appelé onduleur) se convertisseur il assure la conversion courant continu - courant alternatif et associé avec la machine asynchrone.

Notre mémoire est organisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre consacré à l'étude d'onduleur de tension monophasé et triphasé, le deuxième présentons les différentes techniques de commande des onduleurs à MLI. Le troisième chapitre, consacré à la simulation de l'onduleur de tension monophasé et triphasé en pont commandé à pleine onde par la technique d'MLI, à l'aide de logiciel de MATLAB (Simulink). Dernier chapitre est consacré à la simulation de machine asynchrone-onduleur pour les deux cas monophasé et triphasé.

Chapitre 1

Etude de l'onduleur monophasé et triphasé

Dans les zones industrielles, les entraînements électriques exigent de plus en plus des vitesses variables, à cet effet, le progrès de l'électronique de puissance a permis de développer plusieurs moyens qui assurent de l'entraînement alternatif à vitesse variable. Parmi ces moyens, citons les onduleurs autonomes commandés en modulations de largeurs d'impulsion (MLI), elle utilisée en électronique de puissance pour convertir une tension continue en tension alternative (conversion DC-AC) [8].

1.1 Définition

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue – alternative, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie [7]. L'onduleur est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication), pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux). La représentation symbolique d'un onduleur est donnée par la figure 1-1 [12] :

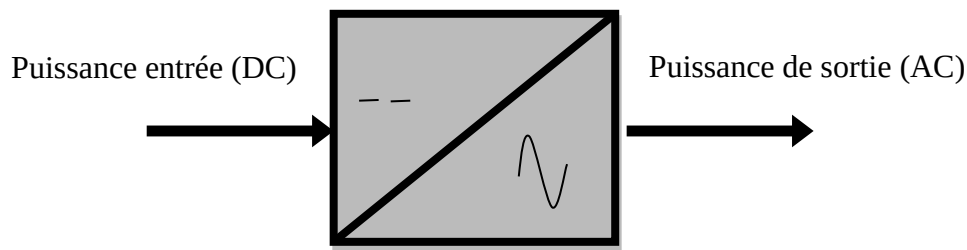


Figure 1-1: Schéma de principe de l'onduleur [9].

1.2 Classification des onduleurs

Il existe plusieurs classifications des onduleurs. Nous citerons quelque une :

1.2.1 Selon la réversibilité

a. Onduleur autonome : On appelle onduleur autonome, un système qui délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur en épuisant de l'énergie d'un circuit auxiliaire pour la commutation des thyristors ou l'autre semi- conducteurs [10].

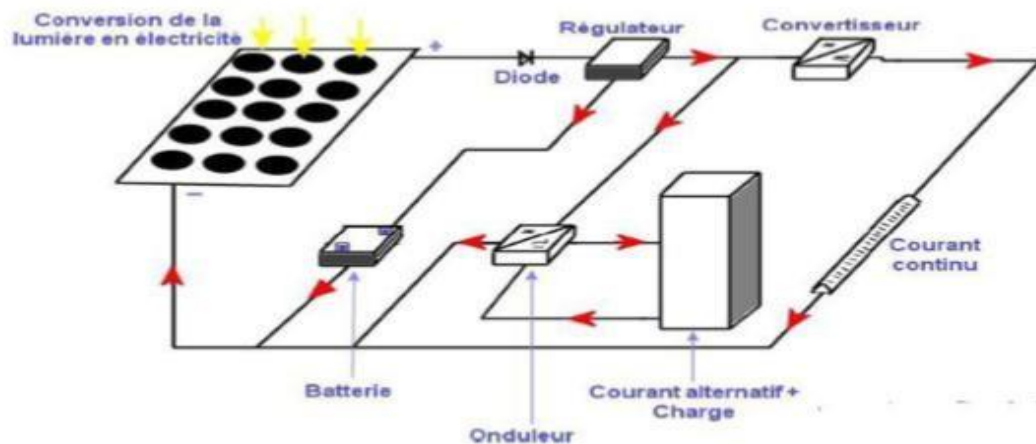


Figure 1-2 : Schéma d'un système photovoltaïque non raccordé au réseau [12].

b. Onduleurs non autonome (raccordés aux réseaux)

Un onduleur réseau a pour principe de transformer une tension continue en une tension alternative, mais dans ce cas avec une fréquence et une valeur équivalentes à celle du réseau.

En effet, l'onde sera obligatoirement sinusoïdale et que cette tension alternative qui va charger le réseau, devra se mettre en phase avec ce dernier et répondre à un ensemble de prescriptions et d'impératifs de sécurité plus contraignants. Les onduleurs couplés au réseau utilisent deux techniques de génération du signal alternatif : [10]

- ✓ Soit la sinusoïde est produite par l'onduleur qui utilise le passage par zéro du réseau pour se synchroniser.
- ✓ Soit le réseau est utilisé comme source du signal et de synchronisation.

Certains onduleurs utilisent un transformateur pour isoler les panneaux solaires du réseau [10].

D'autres, possède un système de test en continu du courant délivré par les panneaux. En cas de fuite, l'onduleur s'arrête pour éviter tout court-circuit entre les panneaux et le réseau. Chaque onduleur utilise pour son fonctionnement interne, une certaine quantité d'énergie fournie, soit par les panneaux photovoltaïques, soit par le réseau ce qui contribue à influencer les pertes de rendement annuelles [10].

Pour la sécurité du système, les compagnies d'électricité exigent en général une surveillance de la tension et de la fréquence produites et une coupure très rapide en cas d'absence de réseau [10].

Il faut noter que la limitation de puissance à 3,5 kW par phase implique une limitation du courant produit [10].

Enfin, les onduleurs réseau sont de type MPPT (Maximum Power Point Tracking) et leur microprocesseur peut faire varier le point de puissance maximale du générateur en direction de la tension ouverte et ainsi limiter la puissance à l'entrée [11].

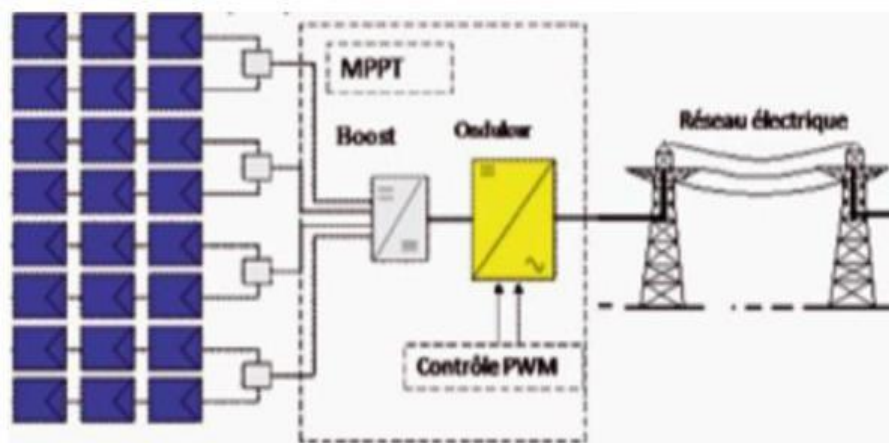


Figure 1-3 : Système photovoltaïque connecté au réseau [13].

1.2.2. Selon la nature de l'alimentation

a. Onduleur de tension

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension « u » n'est pas affecté par les variations du courant « i » qui la traverse (Figure 1-4), la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. Le courant à la sortie « i » et donc le courant à l'entrée « i » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f.e.m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie [14].

Les deux grands domaines d'application classiques des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entraînements à vitesse variable. Ils sont également caractéristiques de deux grandes familles, respectivement celle des systèmes à fréquence fixe et celle des systèmes à fréquence variable [15].

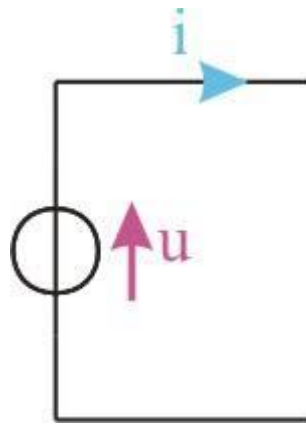


Figure 1-4 : Schéma pour l'onduleur de tension [7].

b. Onduleur de courant

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant « i » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension « u » à ses bornes [14].

c. Onduleurs à résonance

Dans les onduleurs à résonance, la charge est constituée par un circuit résonnant peu amorti alimenté à une fréquence très proche de la fréquence de résonance. La fréquence de fonctionnement est donc imposée par la charge et la commutation est naturelle. Le fonctionnement de l'onduleur n'est plus autonome. Les onduleurs à résonance sont souvent appelés onduleurs moyenne fréquence car ils fonctionnent à des fréquences nettement supérieures à celle du réseau industriel (400 Hz à 400 KHz) [16].

1.2.3. Selon la nature de la charge

a. Onduleur monophasé :

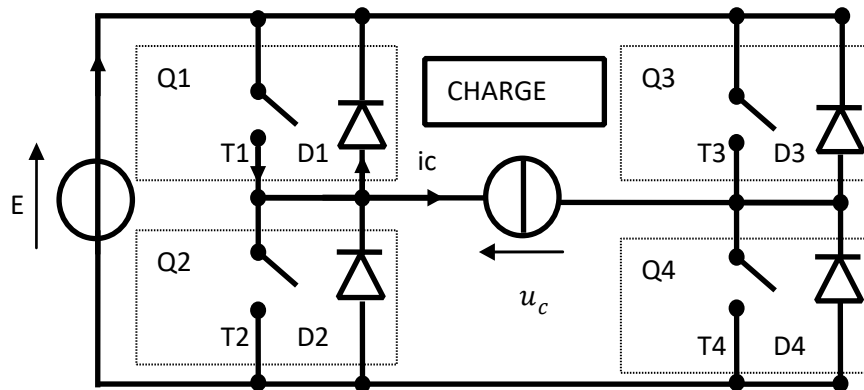


Figure 1-5 : structure de montage d'un onduleur en pont complet.

On notera que :

- T1, T2, T3, T4 : Transistors de puissance.
- D1, D2, D3, D4 : Diodes de puissance.
- Q1, Q2, Q3, Q4 : Transistors avec une diode antiparallèle.
- E : Tension continue.
- U_c : La tension et le courant de la charge.

La Figure 1-5 rappelle le schéma symbolique de l'onduleur et le montage d'un onduleur en pont complet. Le montage consiste deux bras chaque bras est composé de deux étages d'interrupteurs. Chaque étage comporte deux composant semi-conducteur (transistors IGBT ou MOSFET) avec une diode en antiparallèle. Les diodes antiparallèles sur les transistors assurent la réversibilité des courants dans la charge. À partir de la source principale de tension continue, l'onduleur permet d'avoir une tension plus proche de la sinusoïde à la sortie [17].

1.3 Principe de fonctionnement d'un onduleur monophasé

L'onduleur en pont est représenté en Tableau 1-1, il comporte quatre interrupteurs de puissance désignés par Q1, Q2, Q3 et Q4. L'analyse de cette structure montre à l'évidence qu'il est possible d'imposer aux bornes de la source de courant i_c une tension aussi bien positive que négatives. Le tableau des données 1-1 permet d'en infliger ou ils ne sont considérés que les états respectifs des

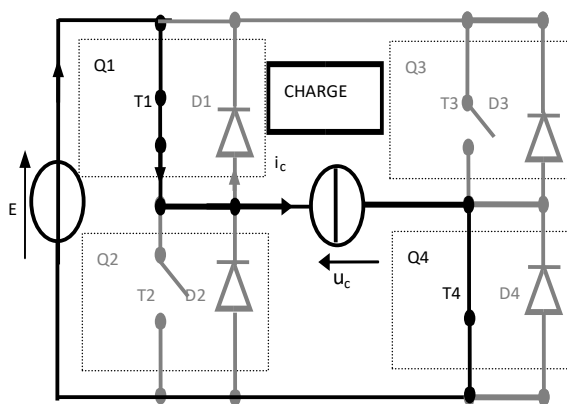
interrupteurs qui ne violent aucune des règles fondamentales définissant les états bloqués ou passent des interrupteurs au sein d'un bras de commutation [18].

	Bras 1		Bras2		Tension u_c
	Q1	Q2	Q3	Q4	
Cas 1	Passent	Bloqué	Passent	Bloqué	$u_c = 0$
Cas 2	Passent	Bloqué	Bloqué	Passent	$u_c = E$
Cas 3	Bloqué	Passent	Passent	Bloqué	$u_c = -E$
Cas 4	Bloqué	Passent	Bloqué	Passent	$u_c = 0$

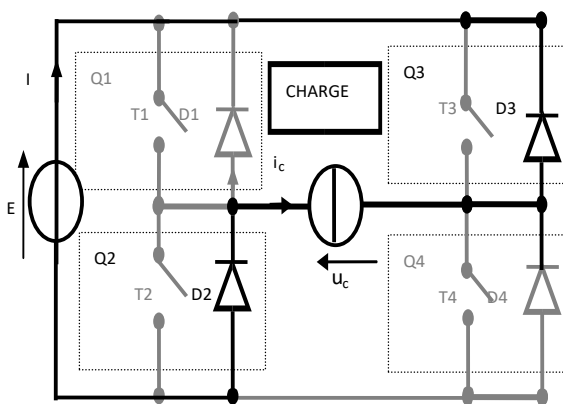
Tableau 1-1: Les configurations possible de Q1, Q2, Q3, Q4 [19].

On doit noter qu'une telle structure permet d'imposer en fait trois niveaux de tension, à savoir $u_c = E$, $u_c = -E$ ainsi que, $u_c = 0$, ce dernier niveau de tension correspond à une phase de roue libre, sans échange d'énergie entre les deux sources. Suivant le type de commande adopté, ce troisième niveau peut être ou non mis à contribution [19].

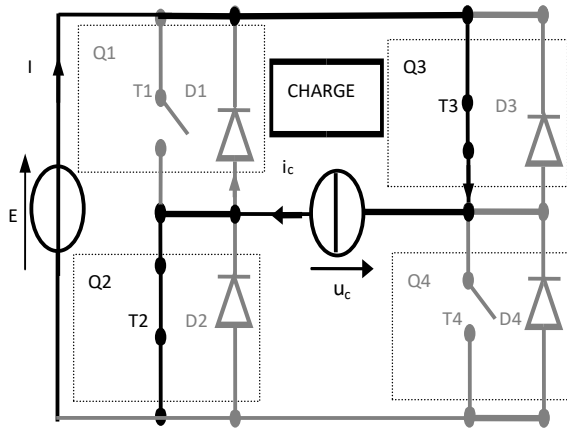
Avec cette commande, il y a enchaînement de quatre mailles de conduction (Figure 1-7) :



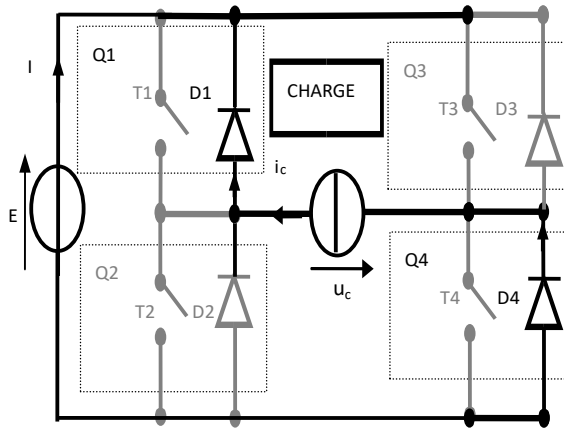
Cas 1 : Accumulation alternance positive.



Cas 2 : Restitution alternance négative.



Cas 3 : Accumulation alternance négative.



Cas 4 : Restitution alternance positive.

Figure 1-6 : Les cas possibles de commutation de l'onduleur [19].

On notera d'emblée la différence de notation suivant que l'on considère les grandeurs électriques côté continue ou bien côté alternatif : [19]

- o Côté continue : les grandeurs (E et I) sont notées en lettre majuscule pour caractériser leur nature continue.
- o Côté alternatif : les grandeurs (u_c, i_c) sont notées en lettre minuscule pour caractériser leur nature alternative.

$$u_c = \widehat{U}_c \sin \omega t \quad / \quad \widehat{U}_c = \sqrt{2}U_c \quad (1-1)$$

$$i_c = \widehat{I}_c \sin(\omega t + \varphi) \quad / \quad \widehat{I}_c = \sqrt{2}I_c \quad (1-2)$$

Avec :

$\widehat{U}_c, \widehat{I}_c$: Les valeurs max de la tension et courant.

U_c, I_c : Les valeurs efficaces de la tension et courant.

ω, φ : La pulsation et le déphasage du courant par rapport à la tension.

On utilise pour l'explication de la commande plaine onde, T1 et T3 sont commandés en même temps, saturés pendant l'alternance positive et bloqués pendant l'alternance négative. De même pour T2 et T4, bloqués pendant l'alternance positive et saturés pendant l'alternance négative [19].

- Onduleur monophasé en demi-pont

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la Figure I-8.

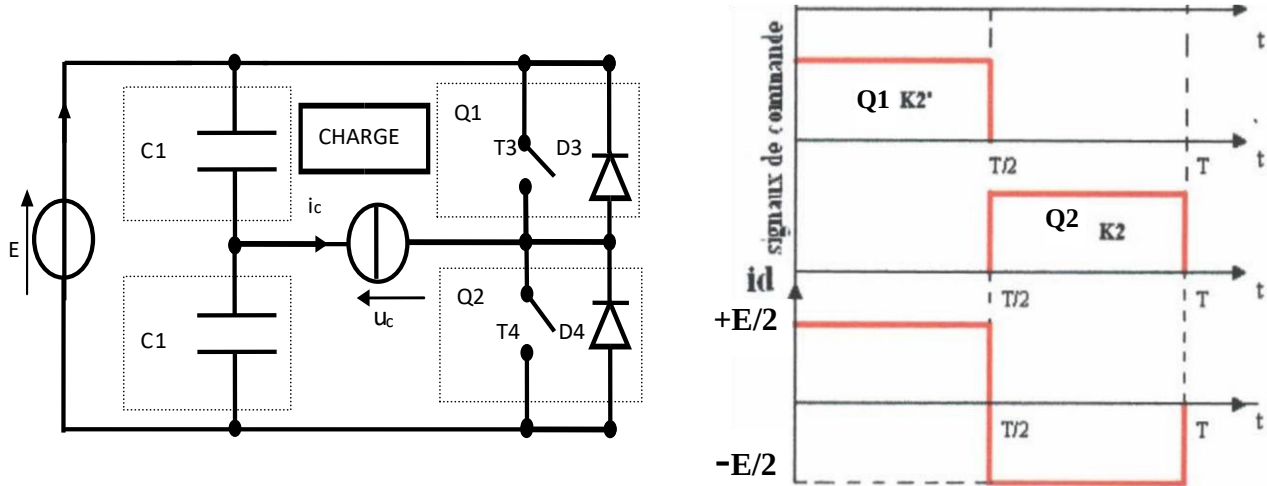


Figure 1-7: Structure principal d'un onduleur monophasé en demi-pont. [19].

Il est constitué principalement d'un seul bras qui se compose de deux interrupteurs de puissance notés $Q1$ et $Q2$ à commande complémentaire. La commande (180°) définit la durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi cycle correspondant à la fréquence du signal de sortie requis lors de la fermeture de l'interrupteur $Q1$, la tension aux bornes de la charge serait donc de $+E/2$, et prend la valeur $-E/2$ quand le second interrupteur, $Q2$ est fermé [19].

Il y a des avantages et des inconvénients pour l'onduleur en demi-pont :

Avantages :

- ✓ Structure simple et économique avec seulement deux interrupteurs commandés et deux diodes [20].
- ✓ Un seul interrupteur passant à chaque instant donc chute de tension réduite [20].
- ✓ Les condensateurs du diviseur capacitif peuvent servir pour le filtrage en entrée et/ou pour la résonance série [20].

Inconvénients :

- ✓ La tension de blocage des interrupteurs est $2.E$ soit deux fois la tension maximale aux bornes de la charge [20].
- ✓ Le réglage de la puissance ne peut se faire que par modulation de largeur d'impulsions [20].

1.4 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs [21].

- Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode [21].
- La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur [21].
- Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b , I_c , les interrupteurs S_1 , S_1' et S_2 , S_2' , S_3 et S_3' doivent être complémentaires deux à deux [21].

On définit $S_i = (T_i, D_i)$.

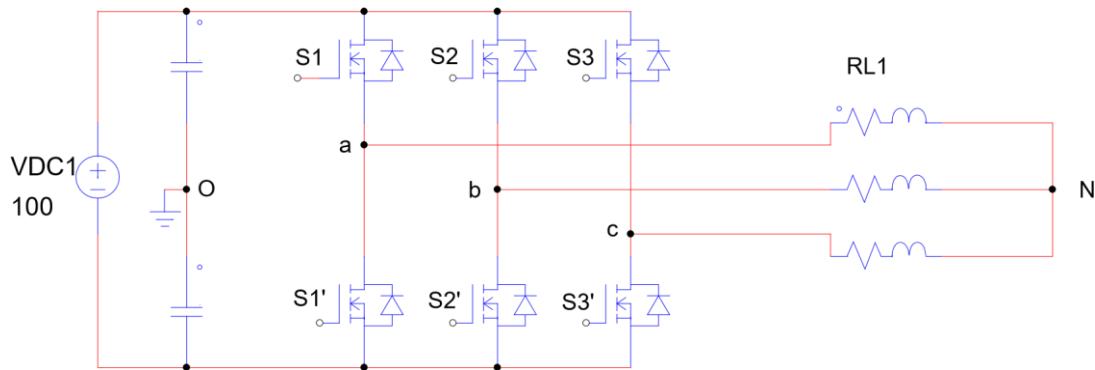


Figure 1-8 : Schéma d'onduleur de tension triphasé [21].

La représentation schématique de l'onduleur est fournie par la (figure 1-9) Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b et I_c , les interrupteur S_1 et S_1' , S_2 et S_2' , S_3 et S_3' doivent être complémentaires deux à deux, et pour que les tensions de sortie V_a , V_b et V_c soient identiques à un tiers de la période T de leur fondamental près, il faut commander chaque demi pont avec un retard de $T/3$ sur le précédent. En commande pleine onde on ferme donc : [22]

S_1 pour $\omega t = 0$ et S_1' pour $\omega t = \pi$.

S_2 pour $\omega t = 2\pi/3$ et S_2' pour $\omega t = \pi + 2\pi/3$

S_3 pour $\omega t = 4\pi/3$ et S_3' pour $\omega t = \pi + 4\pi/3$

La présence du neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré et tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre. Si le

récepteur triphasé est équilibré (moteur triphasé par exemple) on peut supprimer la liaison entre le point neutre « N » et le point milieu « 0 » du la source, donc supprimer celui- ci, on obtient alors l'onduleur triphasé proprement dit [23].

1.5 Les onduleurs multi niveaux

Les onduleurs multi niveaux permettent d'augmenter la tension de sortie des convertisseurs statiques au-delà des limites des semi- conducteurs. Pour les réaliser ou doit disposer de plusieurs sources de tension continue (obtenu par exemple à partir d'un diviseur capacitif), on peut faire apparaître autant de cellules de commutation élémentaires et les associer en les superposant ou en les mettant en cascade. Cela permet de multiplier le nombre de niveau que l'on peut donner à la tension de sortie. Cette dernière est souvent obtenue par une modulation de largeur d'impulsions (MLI) [22].

Ces onduleurs sont utilisés pour l'entraînement des moteurs asynchrones de grande puissance, d'autres applications sont possibles pour des moteurs qui tournent à vitesse élevée (> 5000 tr/mn) [24].

Pour le cas de notre mémoire, on a mis en évidence un onduleur de tension autonome triphasé.

La technique de MLI est la plus appropriée à la commande des moteurs asynchrone. Car l'atténuation des harmoniques avec cette technique est remarquable [22].

1.6 Les applications des onduleurs

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre, le principe déboucle actuel des onduleurs autonomes [22].

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forces : Alimentés à partir du réseau Industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeurs efficaces nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif [22].

L'onduleur de secours pour le matériel informatique permet d'assurer la continuité de l'alimentation en cas de coupures sur le réseau, il permet aussi de filtrer les éventuels défauts de la tension du réseau (parasites ou Surtensions) [22].

1.6.1 Réglage de vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée [26].

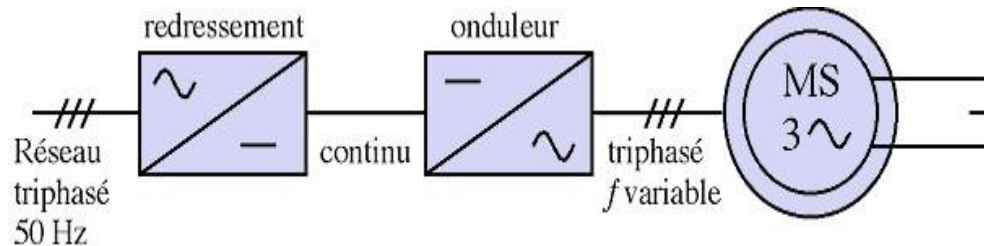


Figure 1-9 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone [26].

1.6.2 Alimentation de secours UPS

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [22].

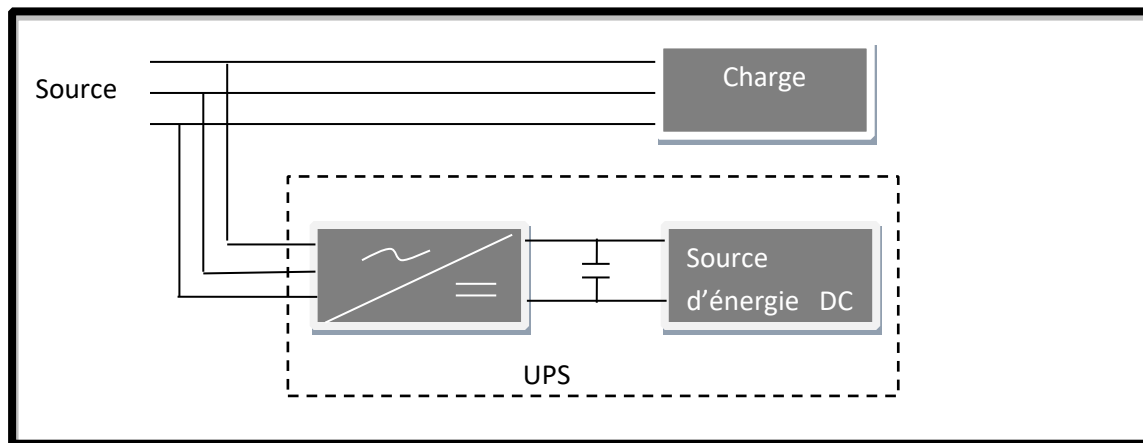


Figure 1-10 : Alimentation de secours [22].

1.6.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence [22].

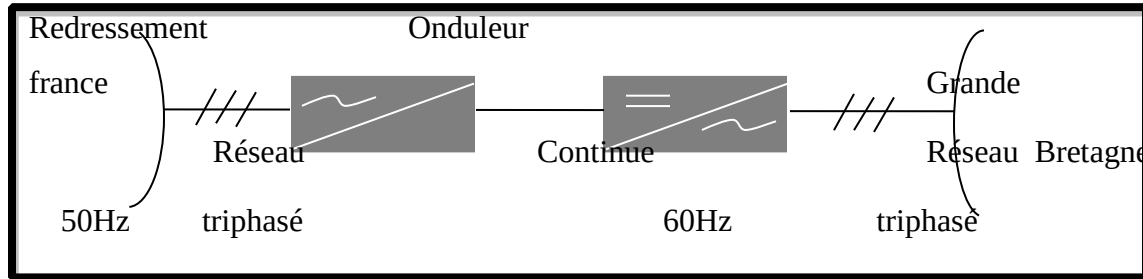


Figure 1-11 : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes [22].

1.7 Différents types de commande des onduleurs

Il existe plusieurs types de commandes, leur but est d'améliorer les formes des grandeurs de sortie des onduleurs tel que la tension et le courant, c'est-à-dire de les rendre le plus sinusoïdales possible [27].

Parmi ces types de commandes on cite : [27]

- La commande pleine onde.
- La commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

1.7.1 Commande en pleine onde

Dans la commande en pleine onde, on ferme les interrupteurs d'une même branche de façon complémentaire pendant une demi période et en décalant la commande de chaque bras d'un tiers de la période ($2\pi/3$). Par conséquent on obtient trois ondes carrées de tension décalées respectivement de $2\pi/3$, dont l'amplitude est égale à la tension continue [27].

Cette commande a un inconvénient, elle génère un signal très riche en harmoniques de tension et de courant ; ceci gêne le transfert de l'énergie de la source à la charge, et ne permet pas aussi d'optimiser le fonctionnement des interrupteurs [27].

La figure 1-12 représente la durée de commande à la fermeture de chaque transistor des trois bras :

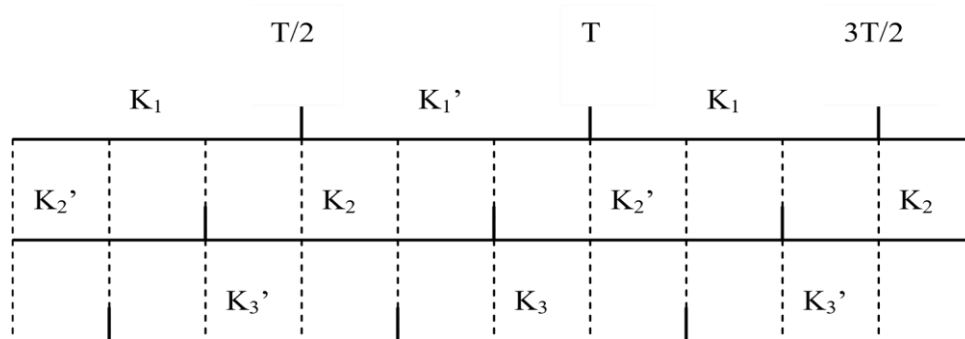


Figure 1-12 : Durée de conduction des interrupteurs.

1.7.2 La commande MLI

La modulation de largeur d'impulsion (MLI), consiste à adapter une fréquence de commutation (f') supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie (f) et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession des créneaux de largeur convenable [28].

La multiplication du nombre des impulsions formant chacune des alternances de la tension de sortie présent deux avantages importants : [28]

- ✓ Elle repousse vers des fréquences plus élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- ✓ Elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie et sa fréquence.

Si la référence est sinusoïdale, cette commande est caractérisée par deux paramètres qui sont : [28]

- ✓ L'indice de modulation « m », égale au rapport f'/f .
- ✓ Le coefficient de réglage en tension « r », égale au rapport de l'amplitude de la tension de référence sur la valeur crête de l'onde modulante.

Plusieurs types de MLI se présentent pratiquement, on peut citer [27] :

- ✓ Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence sinusoïdal à une porteuse généralement triangulaire.

- ✓ Les modulations précalculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre de la tension, et donner une certaine onde fondamentale.
- ✓ Les modulations postcalculées appelées encore MLI régulières symétriques ou MLI vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.

Discussion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types d'onduleurs et types de commande ainsi leurs applications dans notre vie quotidienne. Nous avons rappelé aussi les stratégies de commandes pour onduleurs. Le chapitre suivant présente les différentes techniques de commande des onduleurs à MLI,

Chapitre 2

Etude de la technique d'MLI

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes techniques de commande des onduleurs à MLI, avec une étude détaillée des techniques les plus utilisées actuellement dans le domaine de recherche à savoir la modulation sinusoïdale triangulaire. Cette étude est consacrée à la conception d'une stratégie de commande qui permet de donner une meilleure forme de la tension de sortie de l'onduleur, donc une meilleure qualité spectrale.

2.1 Principe de base de MLI

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueil à la sortie de l'onduleur (Figure 2-1) [29].

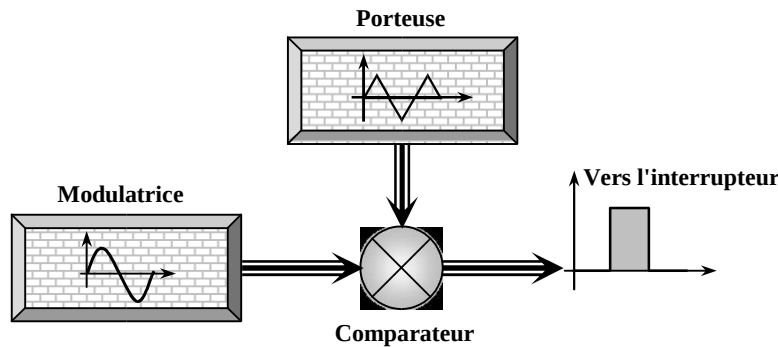


Figure 2-1: Schéma synoptique de la MLI [29].

2.2 Classification des stratégies de modulation MLI

Le nombre de stratégies de modulation en largeur d'impulsion et de ses variantes est important mais il est tout de même possible d'en établir une classification [30].

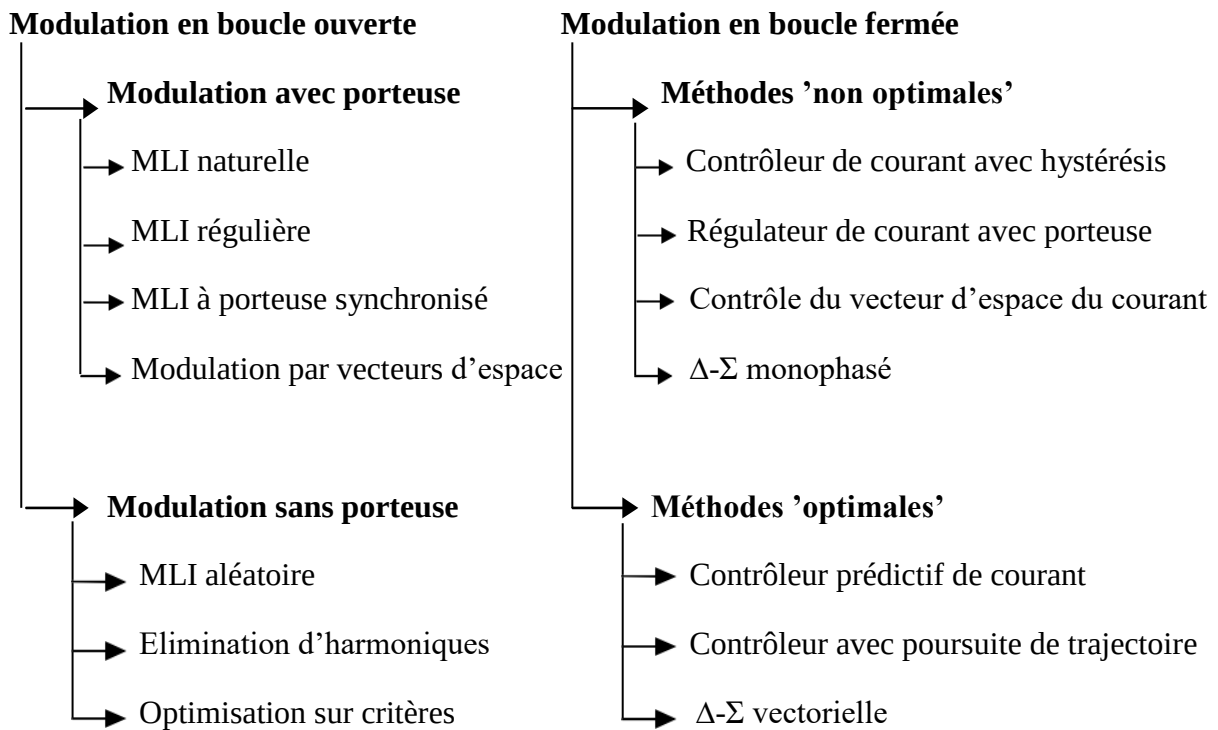
Le contrôle de l'impulsion de la tension permet d'obtenir un signal de fréquence et d'amplitude donnée. Suivant la technique d'obtention des stratégies MLI nous pouvons les classifiées en deux catégories différentes : [30]

- La technique de comparaison d'une modulante et d'une porteuse (technique appelée aussi intersective).
- La technique directe numérique (DDT – Direct Digital Technique) ou technique sans porteuse.

Une deuxième approche classifie les stratégies de commande d'onduleur en : [30]

- Commande MLI en boucle ouverte.
- Commande MLI en boucle fermée : il s'agit en général d'un comparateur d'hystérésis, ou bien une technique de réinjection (feedback) des harmoniques.

Elle regroupe ces deux approches et est reproduite en schéma simplifié :



Cette classification est basée sur trois critères : la structure du modulateur (boucle ouverte ou boucle fermée), les notions de modulation avec porteuse ou sans porteuse et la notion de modulation vectorielle qui est une approche globale de l'onduleur triphasé en opposition avec le contrôle bras par bras [30].

2.3 Caractéristiques de la modulation MLI

Les caractéristiques de la modulation MLI, se caractérise par deux grandeurs :

- ✓ Le coefficient de réglage : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion : [29]

$$Mr = \frac{Vm}{Vp}$$

- ✓ L'indice de modulation : Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante : [29]

$$Mi = \frac{fp}{fm}$$

2.4 Différente technique de modulation en MLI

Le principe de base pour la comparaison des deux ondes est un amplificateur fonctionnant en comparateur, le chargement d'état du comparateur est obtenu après chaque intersection des deux ondes, d'où à la sortie on obtient un créneau d'impulsion de largeur variables pour cela on distingue deux procédés pour l'obtention des ondes modulés : [29]

- ✓ Fonctionnement en boucle ouverte.
- ✓ Fonctionnement en boucle fermée.

a. Modulation en boucle ouverte

Le fonctionnement en boucle ouverte est caractérisé par deux types de modulation : Modulation naturelle et la modulation régulière (uniforme) [29].

b. Modulation d'échantillonnage naturelle

L'échantillonnage naturel est un processus de sélection naturel des points échantillonnés. Le temps d'échantillonnage coïncide avec le temps d'apparitions des largeurs d'impulsions modulés. L'échantillonnage naturel comporte : L'échantillonnage naturel à un seul front (Figure 2-2) et l'échantillonnage naturel à deux fronts (Figure 2-3) [29].

Dans le premier cas l'impulsion modulée est échantillonnée par un seul côté, tandis que dans le deuxième cas, l'impulsion modulée par les deux côtés. L'influence du nombre l'impulsion concernant L'échantillonnage à doubles fronts, est l'amélioration du spectre d'harmonique [29].

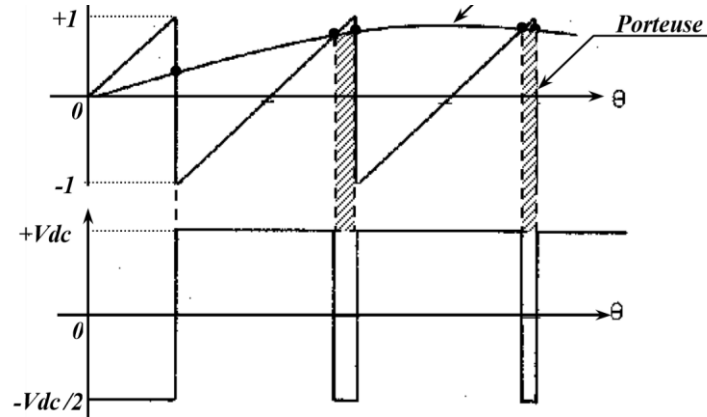


Figure 2-2 : L'échantillonnage naturel à un seul front [29].

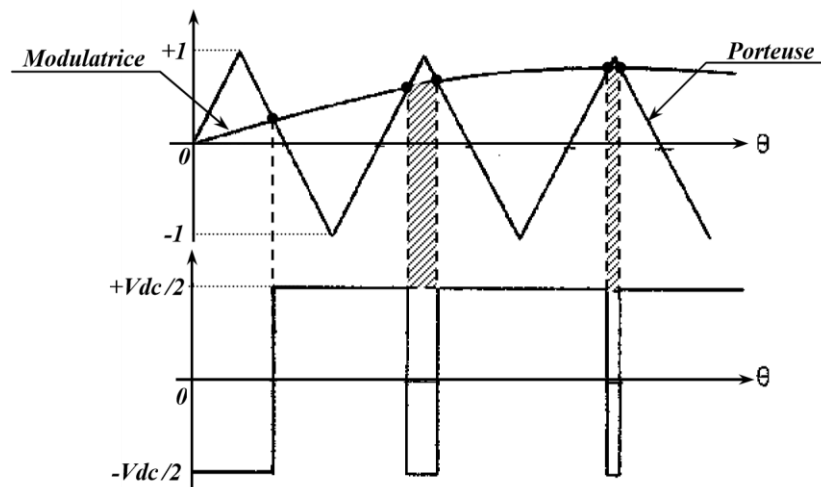


Figure 2-3 : Technique d'échantillonnage à deux fronts [29].

- Modulation d'échantillonnage régulier (uniforme)

On appelle ce processus (d'échantillonnage régulier) car ces échantillons ont un espace de temps régulier ou uniforme. Dans ce mode l'intervalle entre deux points échantillonnés successif est constant, ainsi que l'amplitude du signal modulé reste constante dans tout l'intervalle il existe deux types d'échantillonnage régulier : Echantillonnage régulier symétrique et échantillonnage régulier asymétrique [29].

✓ Echantillonnage régulier symétrique

Dans ce cas, les fronts de commutation sont déterminés par l'intersection de l'onde porteuse avec l'onde modulatrice (Figure 2-4) [29].

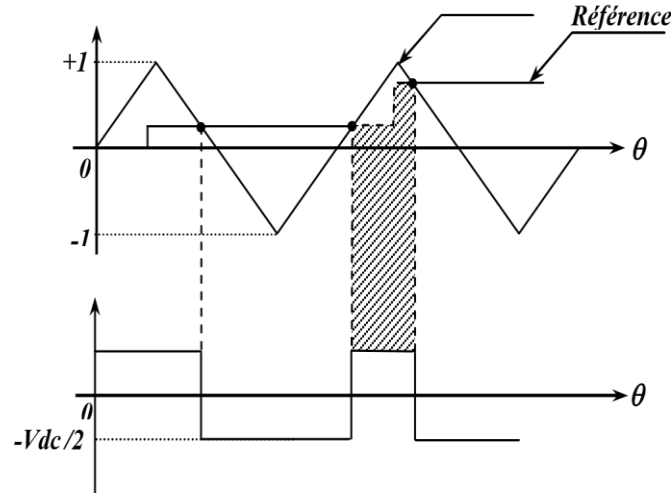


Figure 2-4 : Echantillonnage régulier symétrique [29].

✓ Echantillonnage régulier asymétrique

La technique d'échantillonnage régulier asymétrique au même principe que la technique d'échantillonnage régulier symétrique sauf que l'onde en marge d'escalier est échantillonnée deux fois par cycle de l'onde porteuse (Figure 2-5) [29].

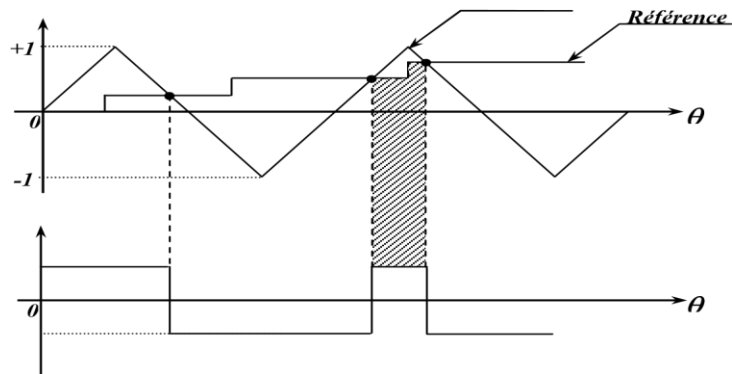


Figure 2-5 : Echantillonnage régulier asymétrique [29].

b. Modulation en boucle fermée

On a deux types modulation :

- ✓ Modulation aléatoire (Figure 2-6).
- ✓ Modulation synchronisée (Figure 2-7).

Dans le premier cas, elle consiste à commander les interrupteurs avec le signal résultant à la sortie du détecteur de seuil, tandis que le deuxième cas elle a le même principe que le premier mais les interrupteurs sont commandés par un signal de sortie d'une bascule de type (D) commandé par une horloge et montée en cascade avec le comparateur assurant ainsi une meilleure cohérence des basculements de commande des interrupteurs [30].

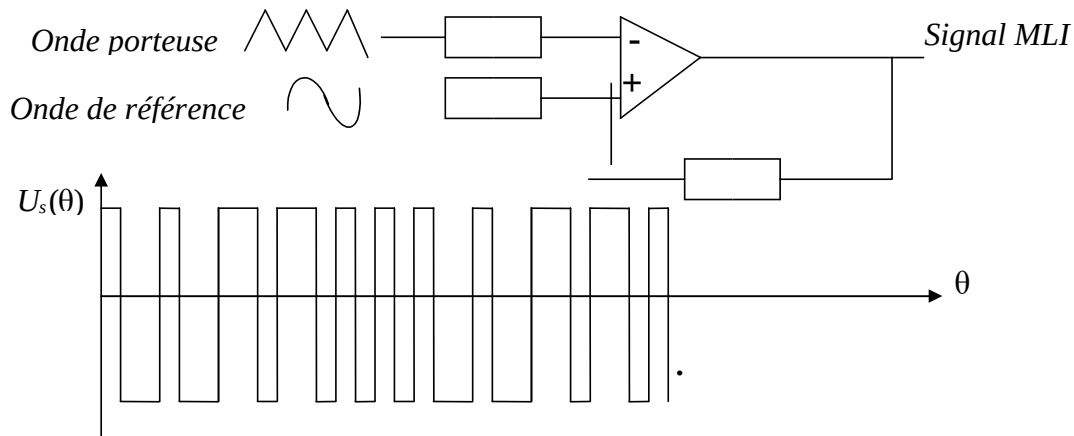


Figure 2-6 : Comparaison aléatoire [29].

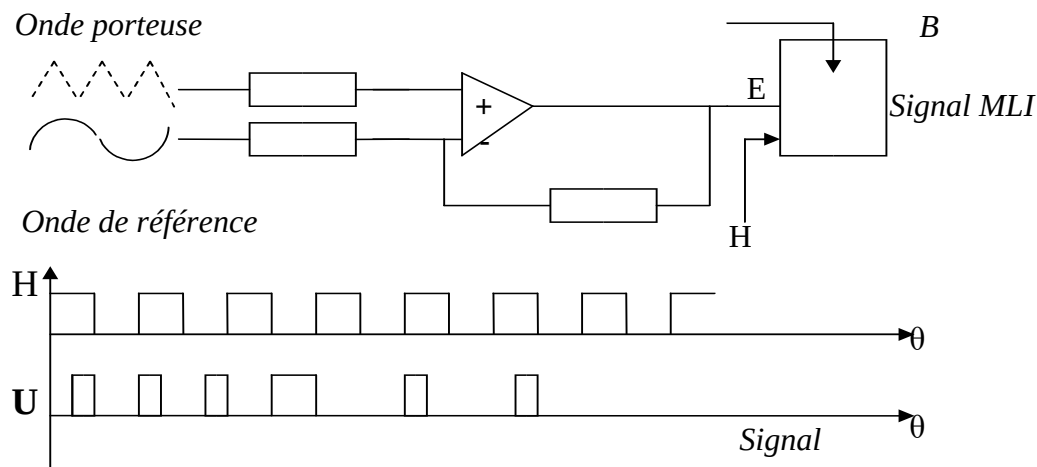


Figure 2-7 : Comparaison synchronisée [29].

2.5 Technique de production d'onde MLI

Plusieurs techniques d'obtention d'onde MLI sont utilisées pour générer le signal de contrôle nécessaire à la commande et au blocage des éléments semi-conducteurs par exemple : impulsions de commande pour thyristors et courant de base pour les transistors. Le plus souvent, on fait appel à la technique analogique, numérique ou en utilisant les deux au même temps [22].

2.5.1. Technique analogique

Cette technique est basée sur la comparaison entre une porteuse triangulaire et la référence, la comparaison est réalisée à l'aide d'un amplificateur opérationnel (Figure 2-8) [22].

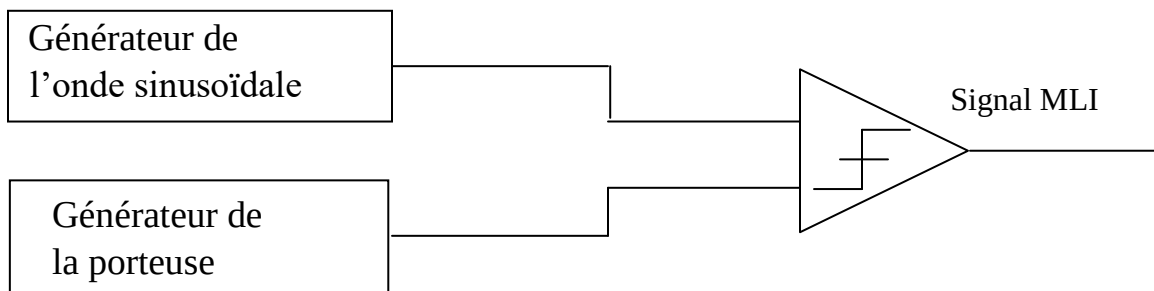


Figure 2-8 : Technique analogique [22].

2.5.2. Technique numérique

Elle est basée sur l'utilisation des microprocesseurs qui assurent la génération des impulsions en se servant d'un programme définissant les angles d'amplitudes calculés au préalable. Cette technique a apporté une grande amélioration significative en matière de simplicité et performance du circuit de commande (Figure 2-9) [22].



Figure 2-9 : Technique Numérique [22].

2.5.3. Technique hybride

Elle consiste à combiner les deux techniques précédentes analogique et numérique, l'onde de référence est obtenue d'une manière numérique (programmer sa fonction), par contre l'onde porteuse est obtenue d'une manière analogique. La comparaison entre les deux signaux se fait par un comparateur analogique (Figure 2-10) [22].

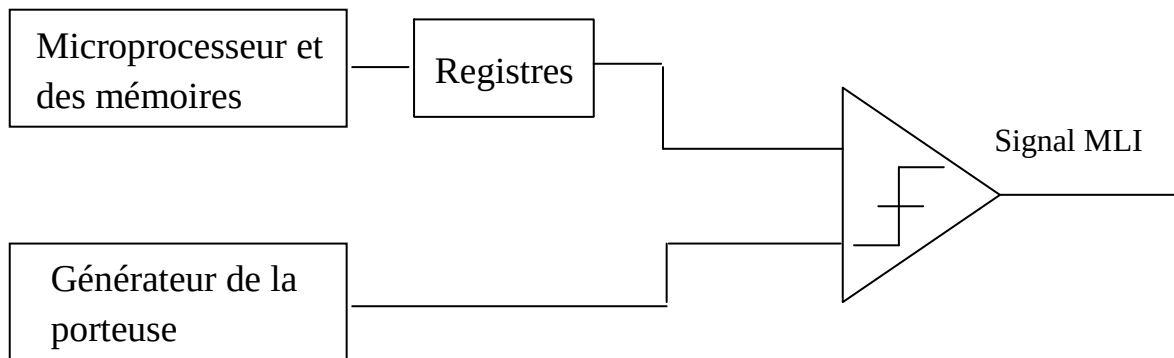


Figure 2-10 : Technique Hybride [22].

2.6 Différentes techniques de modulation de largeur d'impulsions

Plusieurs techniques de modulations ont été adoptées afin d'améliorer la qualité de la tension à la sortie de l'onduleur, parmi lesquelles on peut citer : [22]

2.6.1. La modulation linéaire multiple (UPWM)

Dans cette technique on compare une porteuse triangulaire avec un signal de référence linéaire. L'onde de sortie est sous la forme d'un train d'impulsion en créneaux de largeurs égales (Figure 2-11) [5]. Si l'indice de modulation est égal à un, on obtient la modulation singulière, dans laquelle le signal de sortie est formé d'une seule impulsion par demi-période [22].

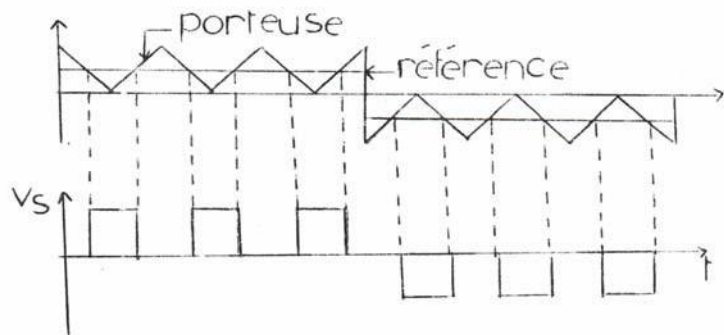


Figure 2-11 : La modulation de largeur d'impulsions multiples [22].

2.6.2. La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM)

Dans ce cas, le signal de référence est sinusoïdal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable (Figure 2-12) [22].

Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante [22].

La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle s'est avérée la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques [22].

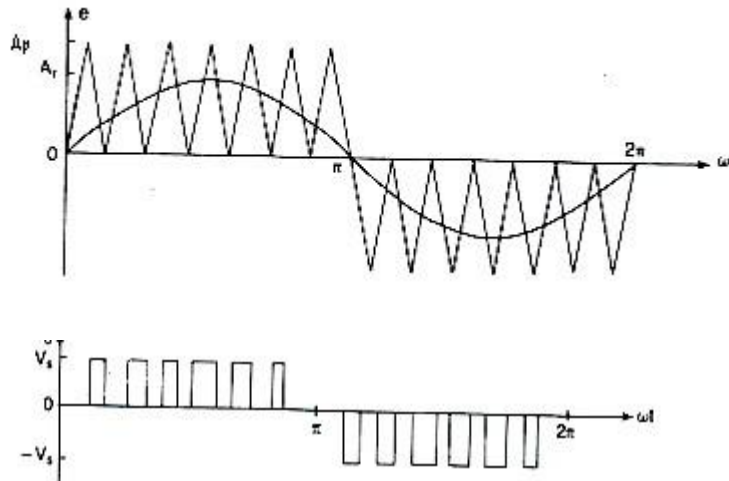


Figure 2-12 : MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire [22].

2.6.3. La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) (MSPWM)

Le signal référence est toujours sinusoïdal, sauf que dans cette technique la porteuse n'est pas appliquée au milieu des alternances de la sinusoïde (Figure 2-13) [22].

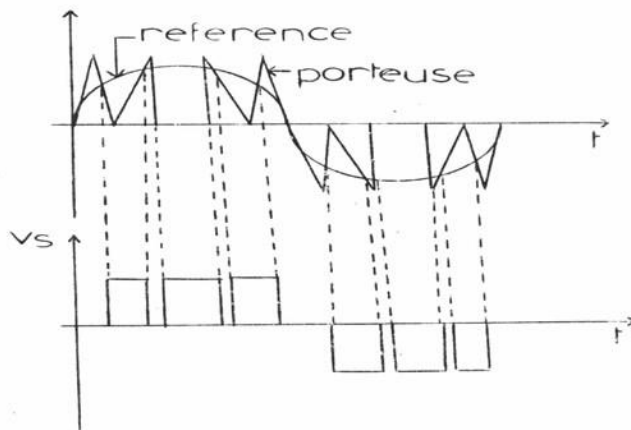


Figure 2-13 : La modulation sinusoïdale modifiée [22].

2.6.4 La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle

Le principe de cette technique est le même que celui de la modulation sinusoïdale, sauf que la porteuse triangulaire est bidirectionnelle (bipolaire) (Figure 2-14) [22].

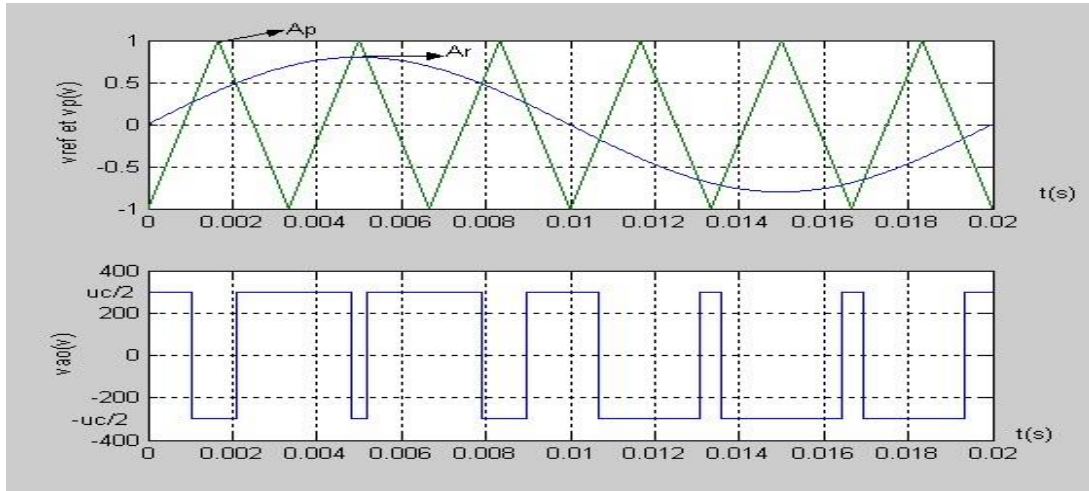


Figure 2-14 : La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle [22].

2.7 Principaux avantages de la MLI

La modulation de largeur d'impulsion présente les avantages suivants : [22]

- ✓ Une bonne neutralisation d'harmonique par rapport aux onduleurs à onde carrée ou en un seul créneau.
- ✓ Elle permet de repousser vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage.
- ✓ Elle permet de faire varier la valeur du fondamental de tension de sortie.

La MLI permet aussi l'alimentation de plusieurs ensembles onduleurs, moteurs asynchrones à partir d'une même source continue [22].

Discussion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de commande d'un onduleur. La commande MLI est la plus avantageuse pour générer des signaux sinusoïdaux.

Nous avons utilisé deux techniques de commande, une commande MLI sinus triangle et MLI sinus dent de scie. Dans le chapitre suivante nous avons étudié et simulé un onduleur monophasé et triphasé à command MLI sinus triangle et sinus dent de scie.

Chapitre 3

Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie avec charge RL

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante (pont à diode). Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande ont été proposées par différents auteurs. Nous étudierons dans ce chapitre deux stratégies de commandes : la MLI sinus-triangle et la commande sinus-dents de scie [29].

3.1 Command MLI sinus-triangle

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

En triphasé, trois références sinusoïdale déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f .

Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ce qui engendre des pertes supplémentaires. Cette MLI sert à remédier ces problèmes et elle a les avantages suivantes : [31]

- ✓ Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- ✓ Elimination de certaines harmoniques de tension.

D'autre part les conséquences de ces deux avantages sont : [31]

- ✓ Minimisation de la distorsion du courant.
- ✓ Faible coût du filtre de sortie.

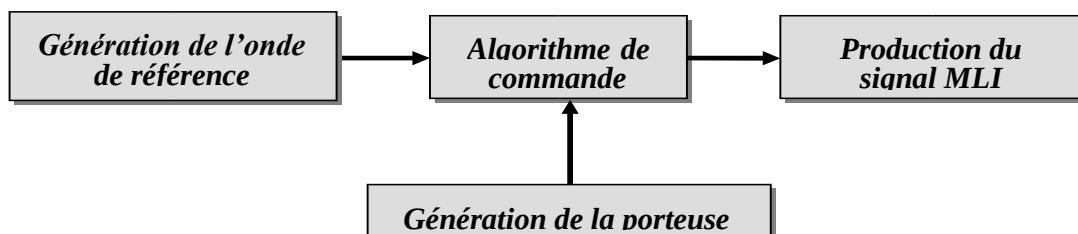


Figure 3-1 : Principe de la commande sinusoïdale [31].

Le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant : [29]

$$U_r \geq U_p \rightarrow S(t)$$

$$\text{Si non } S(t) = 0$$

Avec :

U_r : tension référence, U_p : tension porteuse et $S(t)$: le signal MLI résultant.

3.1.1 Propriétés

Cette technique est caractérisée par deux paramètres :

1. L'indice de modulation 'm' qui est l'image du rapport de fréquences de la porteuse f_p sur la référence f_{ref} [7] :

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} = \frac{T_{ref}}{T_p}$$

2. Le taux de la modulation (le coefficient de réglage en tension) 'r' qui est l'image du rapport des amplitudes de tension de la référence $V_{m\ ref}$ sur la porteuse $V_{m\ p}$: [29]

$$\tau = \frac{V_{m\ ref}}{V_{m\ p}}$$

3.1.2 Tensions de référence

Les tensions de référence de l'onduleur triphasé permettent de générer un système de tension triphasé équilibré directe sont [29] :

$$V_{ref1} = \frac{E}{2} \sin(\omega t)$$

$$V_{ref2} = \frac{E}{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$V_{ref3} = \frac{E}{2} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

3.1.3 Les schéma bloc de la technique de commande MLI d'un onduleur monophasé avec la charge

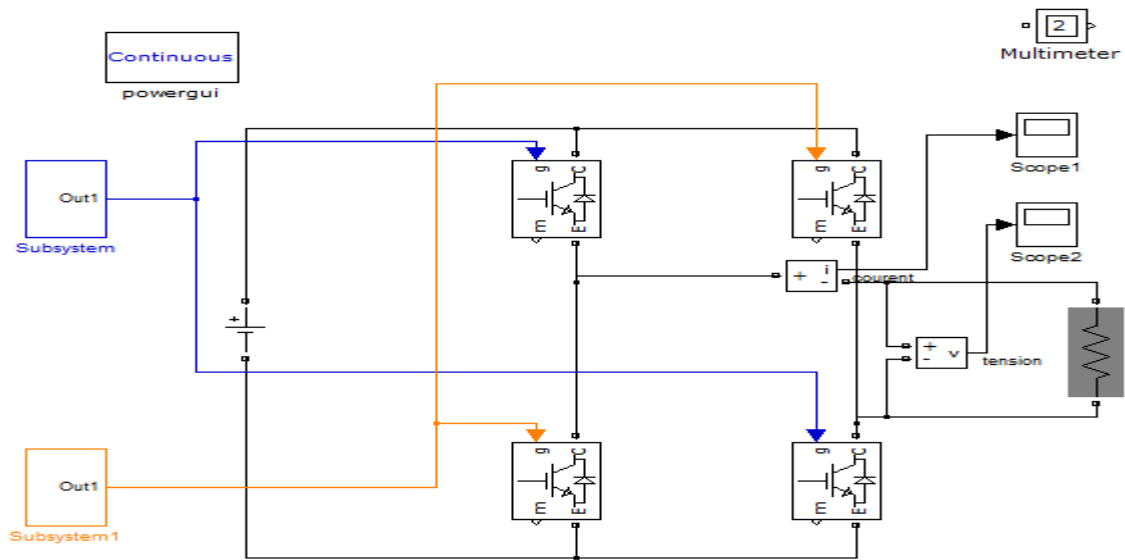


Figure 3-2 : Le schéma bloc de la technique de commande MLI d'un onduleur monophasé avec la charge.

✓ Les résultats

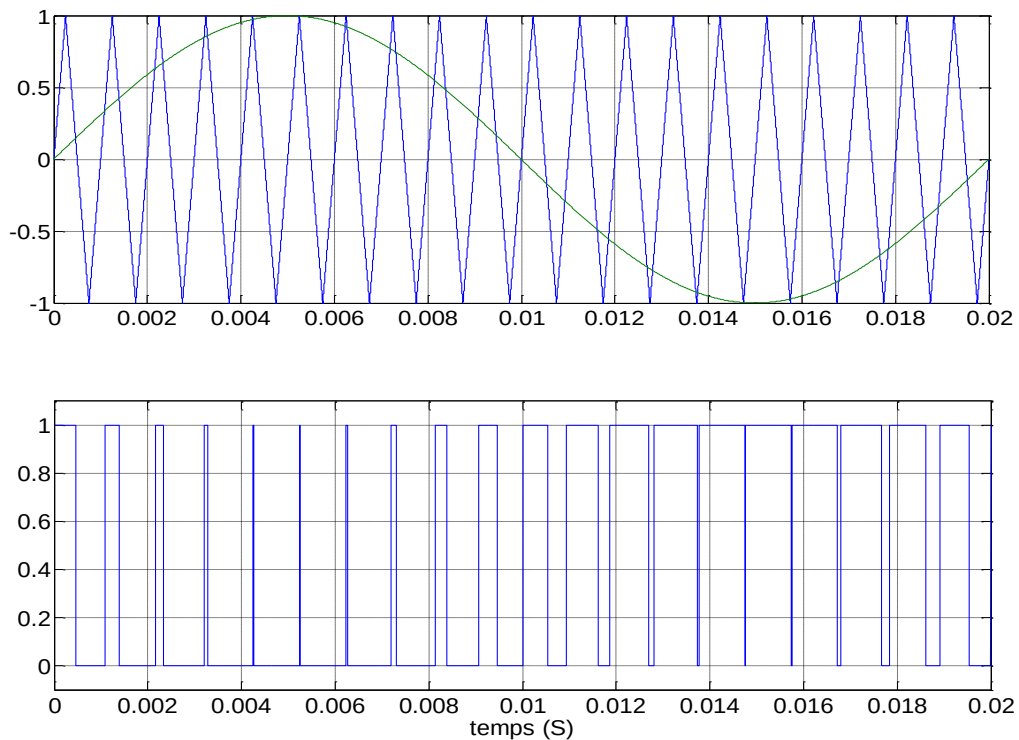


Figure 3-3 : Illustration de la MLI SINUS TRIANGLE.

Chapitre 3 : Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie avec charge RL

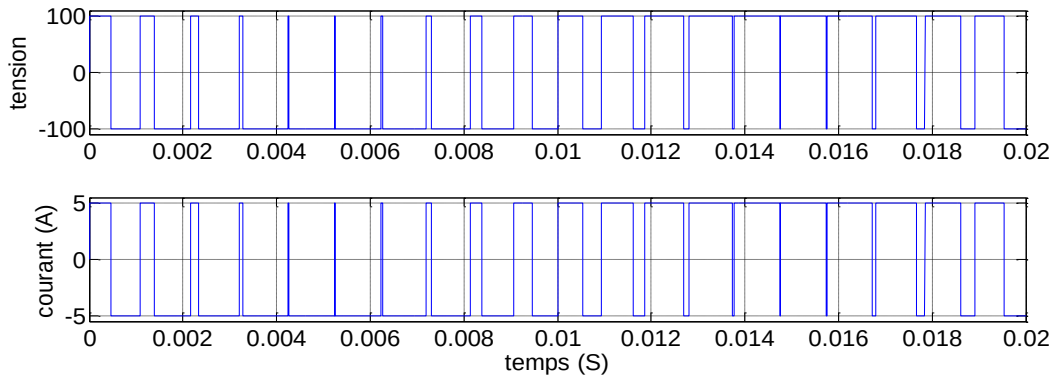


Figure 3-4 : Le courant et la tension de sortie d'onduleur monophasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega$).

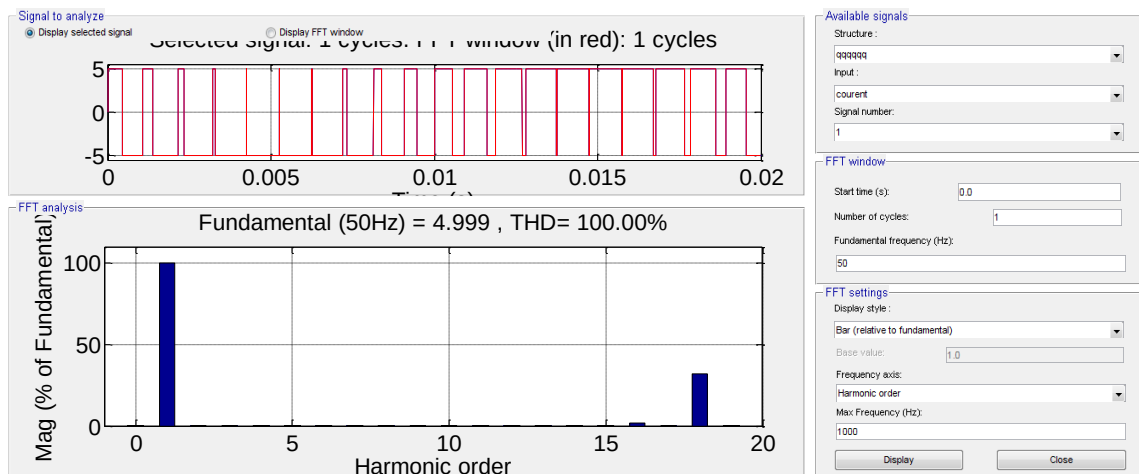


Figure 3-5 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI avec $R=20\Omega, E=100V$.

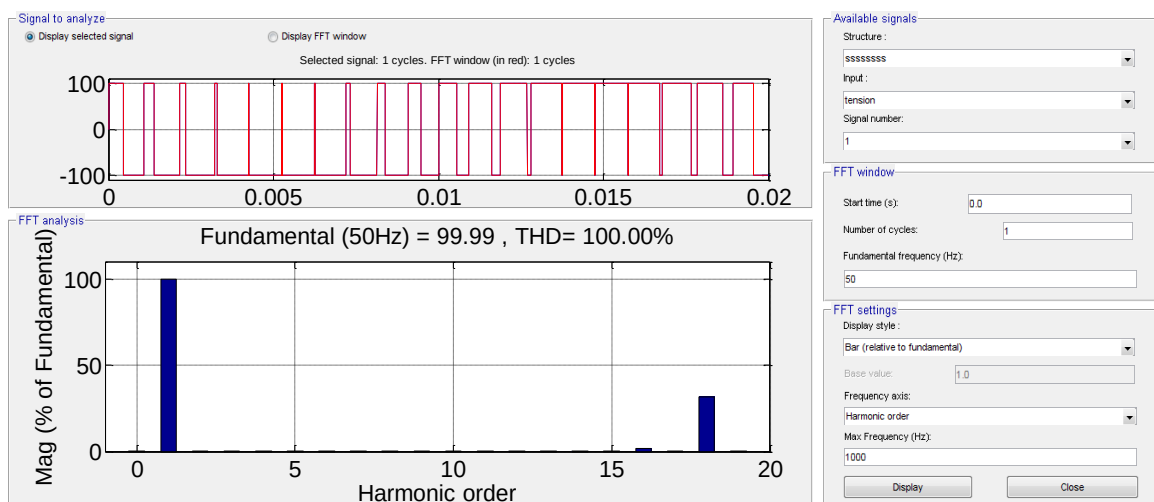


Figure 3-6 : Spectre harmonique de tension de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI avec $R=20\Omega, E=100V$.

Chapitre 3 : Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie avec charge RL

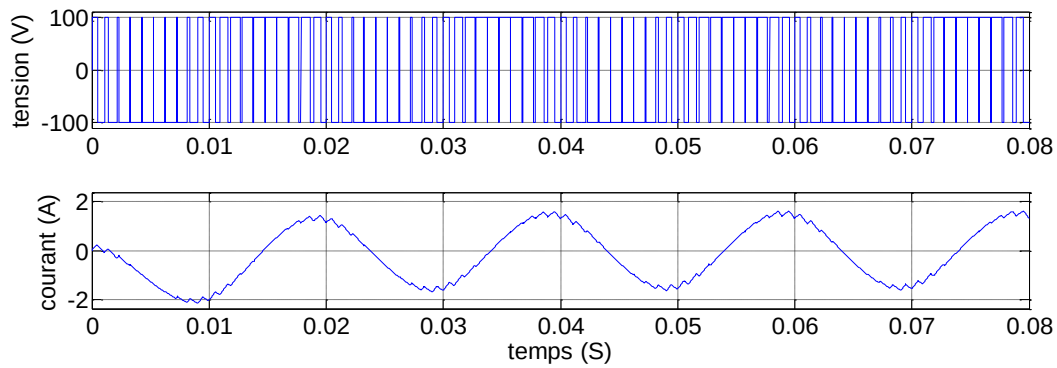


Figure 3-7 : Le courant et la tension de sortie d'onduleur monophasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega$, $L=0.2H$).

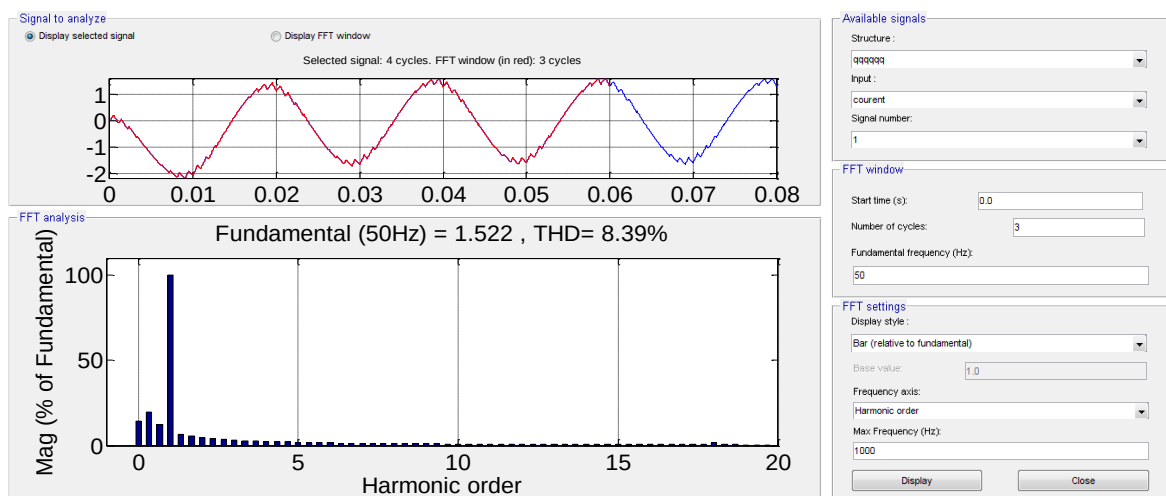


Figure 3-8 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI avec $R=20\Omega$, $E=100V$, $L=0.2H$.

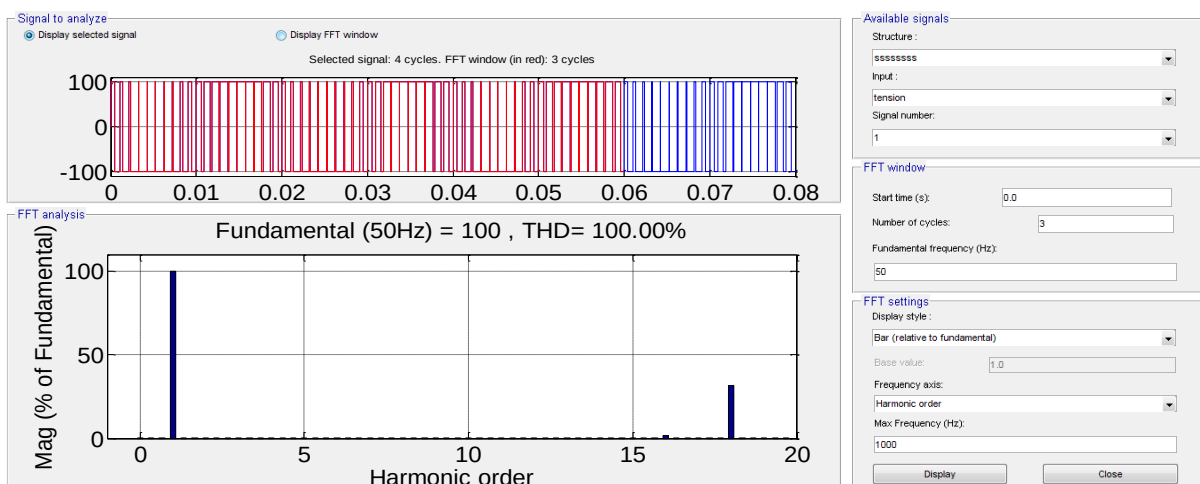


Figure 3-9 : Spectre harmonique de tension de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI avec $R=20\Omega$, $E=100V$, $L=0.2H$.

3.1.4 Le schéma bloc de la technique de commande MLI d'un onduleur triphasé avec la charge

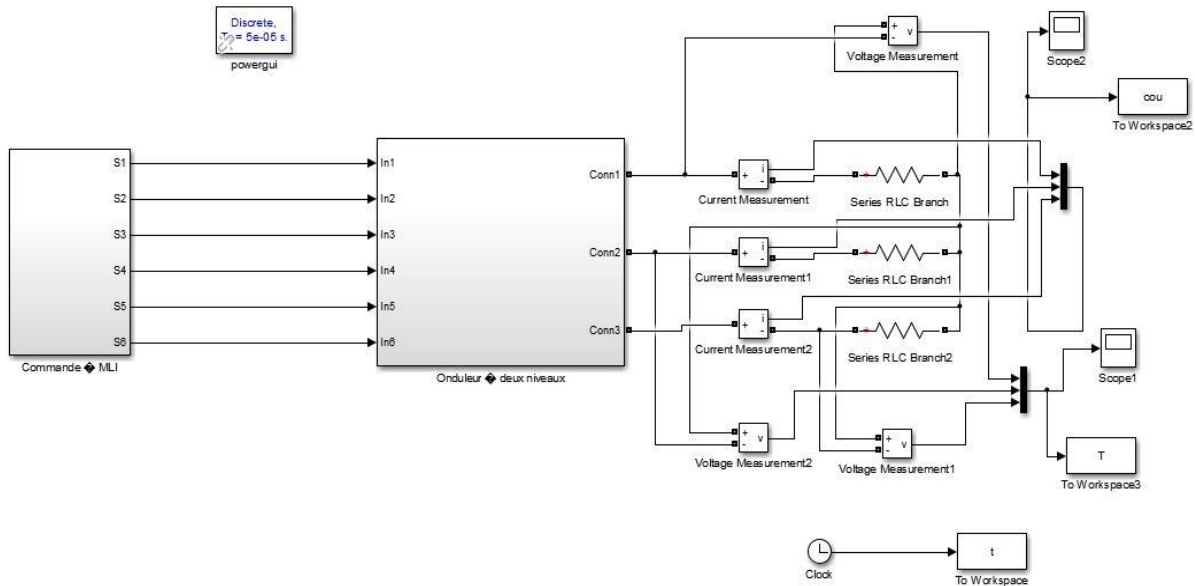


Figure 3-10 : Le schéma bloc de la technique de commande MLI d'un onduleur triphasé avec la charge.

□ Les résultats

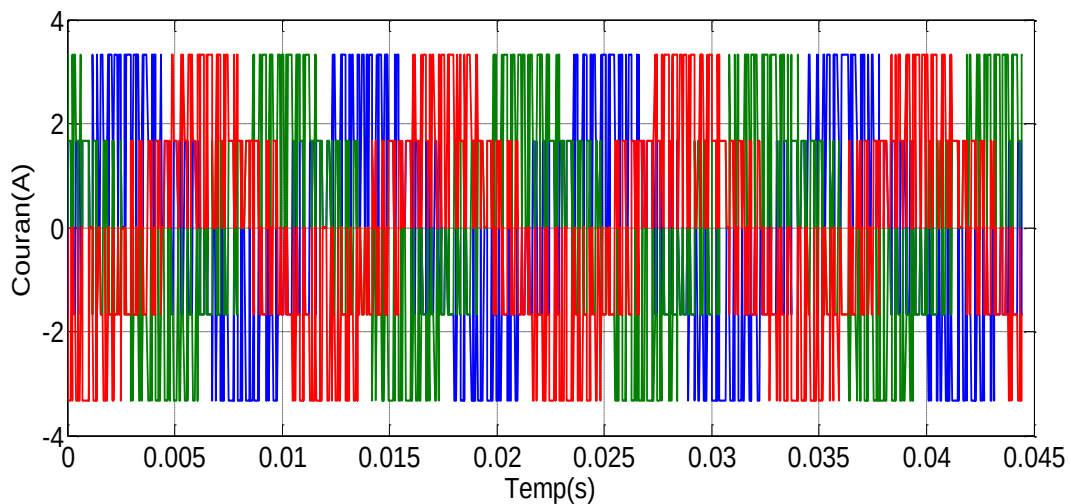


Figure 3-11 : Le courant de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega$).

Chapitre 3 : Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie avec charge RL

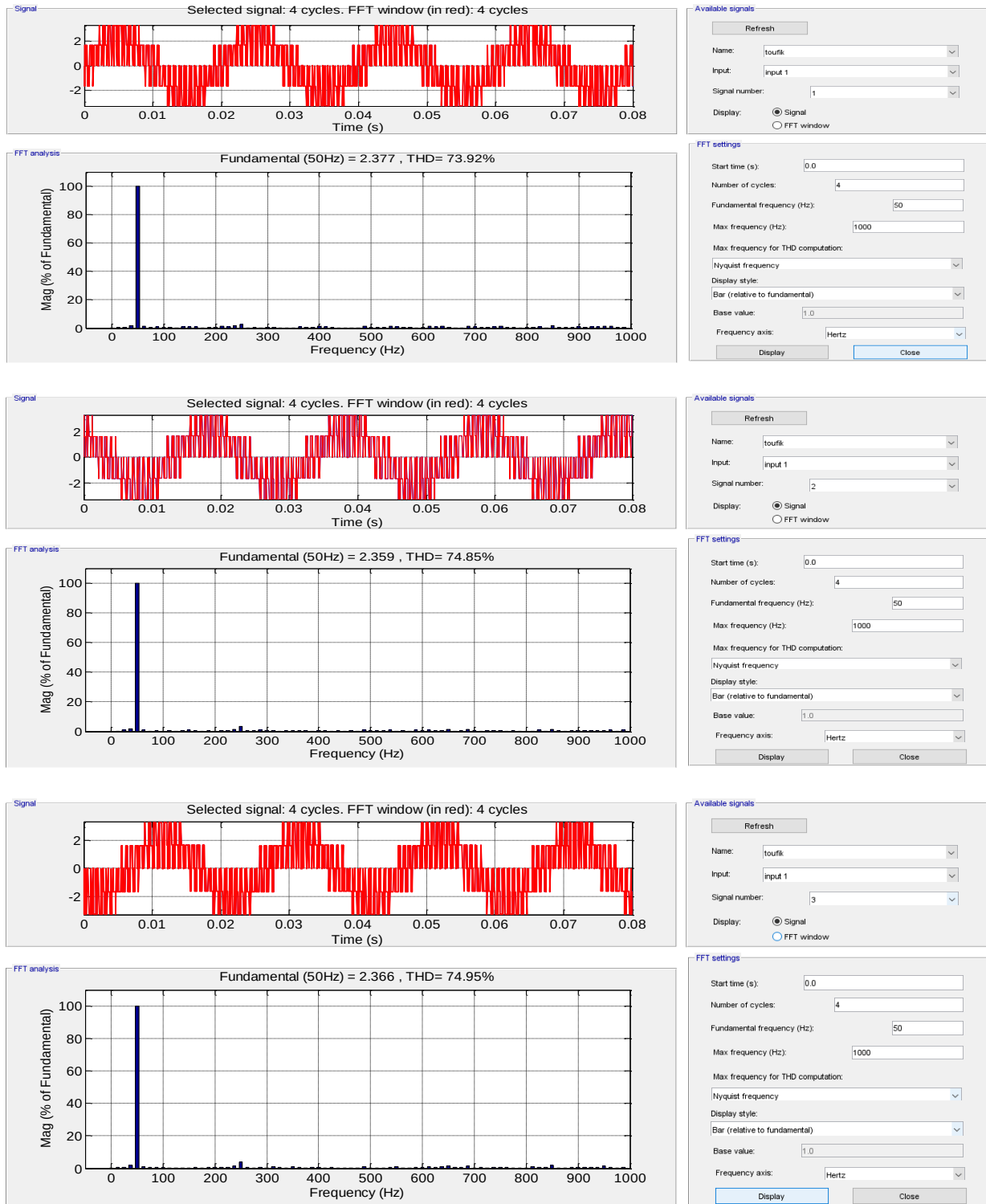


Figure 3-12 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI avec $R=20\Omega$, $E=100V$ et $f=50Hz$.

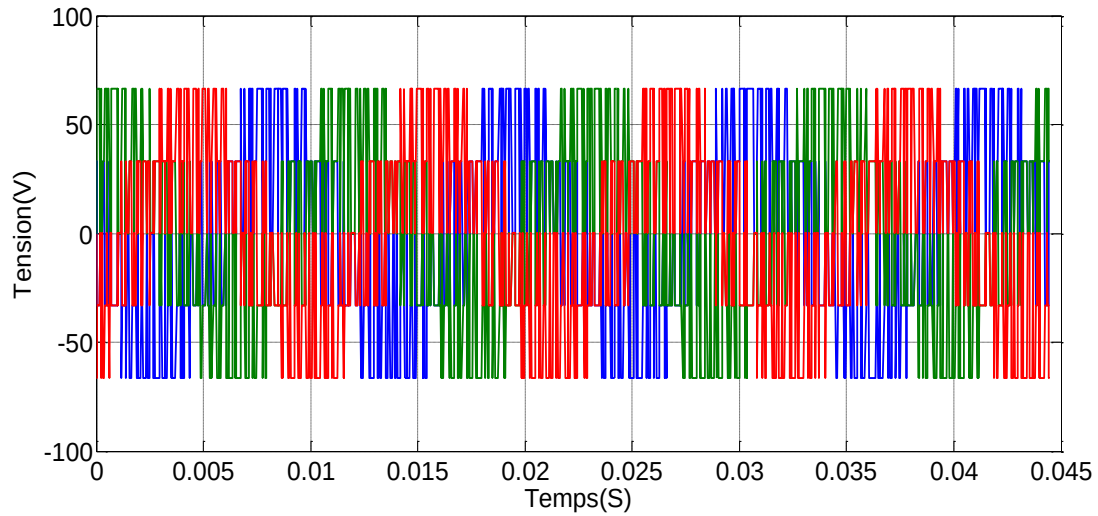
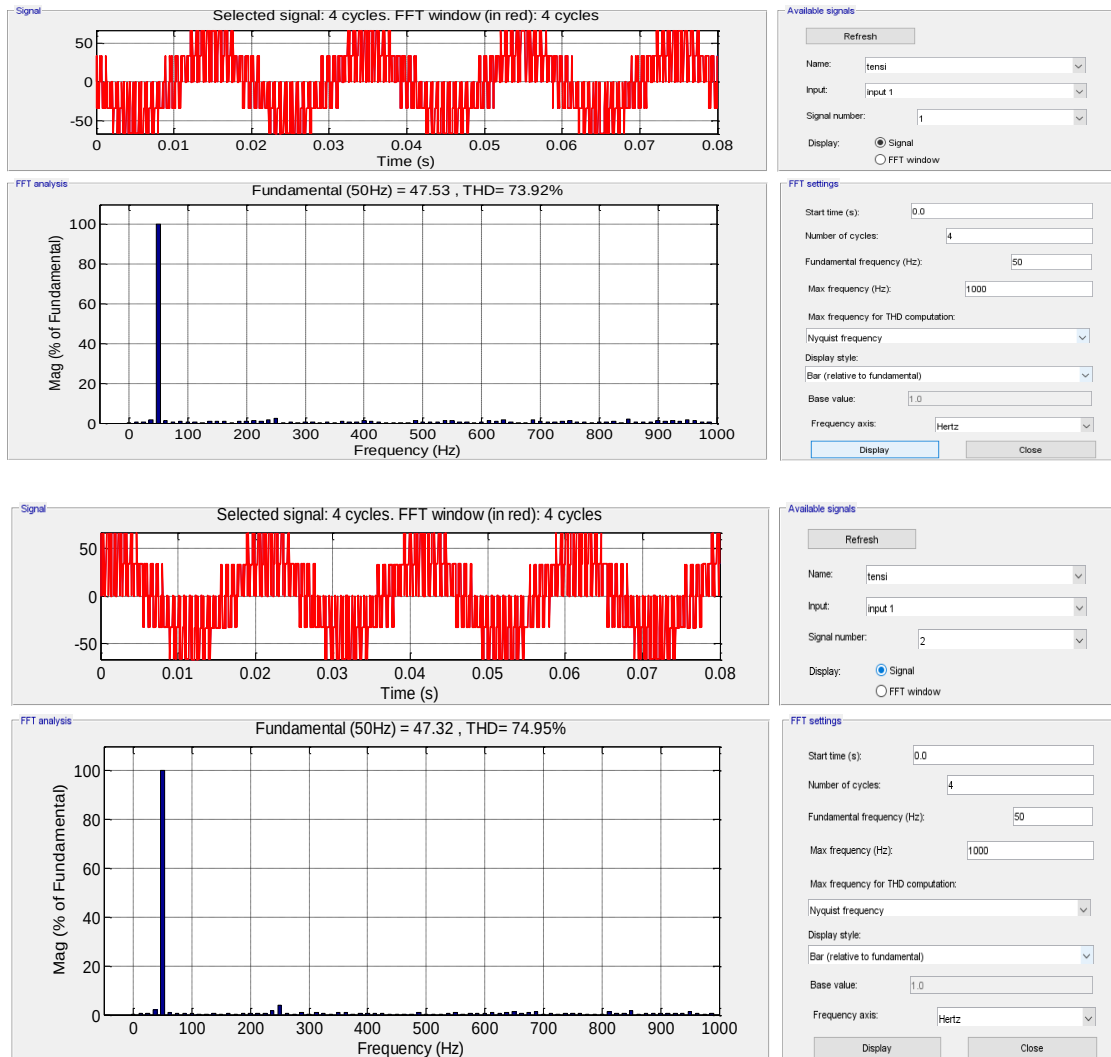


Figure 3-13 : La tension de sortie d'ondeur triphasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega$).



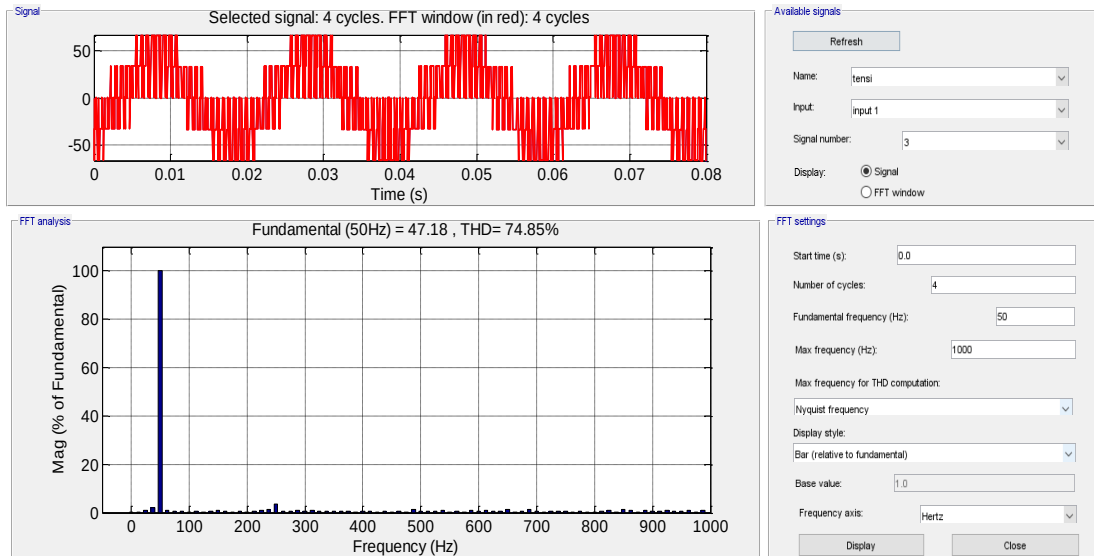


Figure 3-14 : Spectre harmonique de la tension de la sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI avec $R=20\Omega$, $E=100V$ et $f=50Hz$.

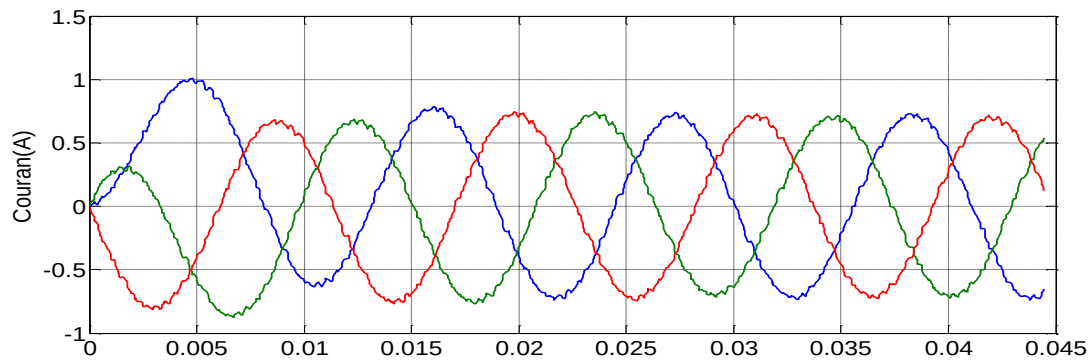
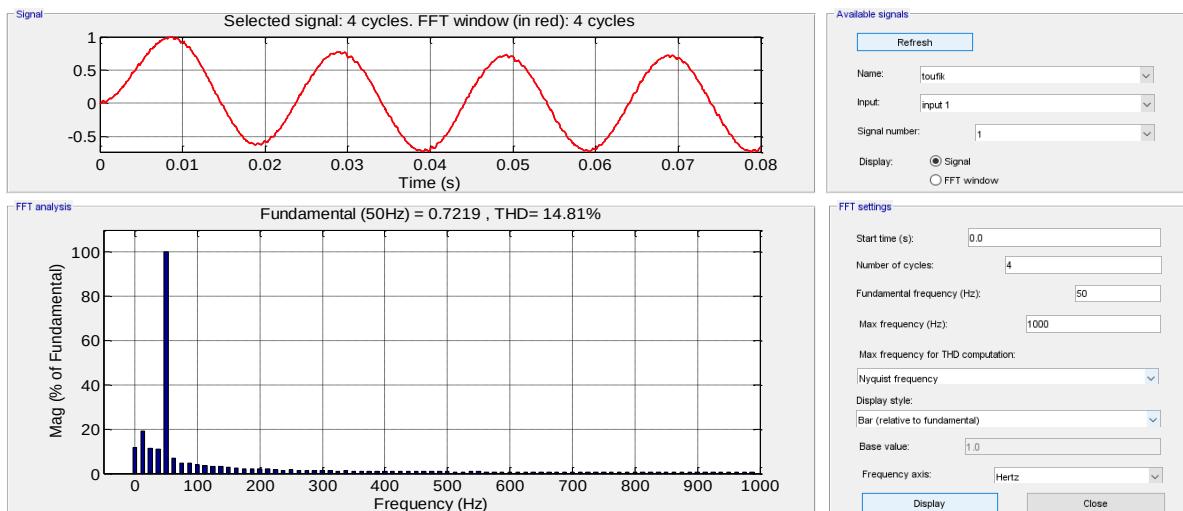


Figure 3-15 : Le courant de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega$, $L=0.2H$).



Chapitre 3 : Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie avec charge RL

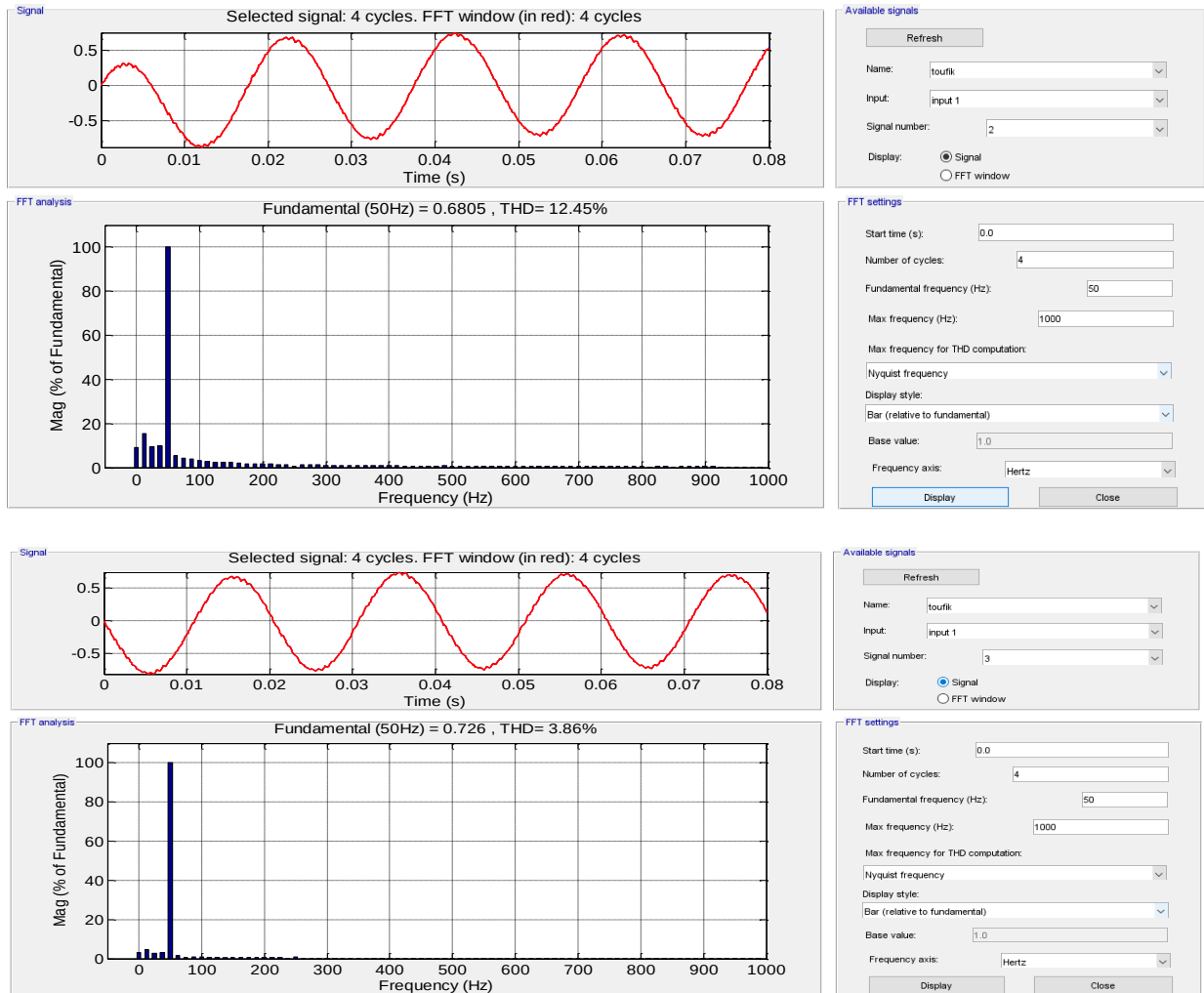


Figure 3-16 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI avec $R=20\Omega$, $E=100V$, $L=0.2H$ et $f=50Hz$.

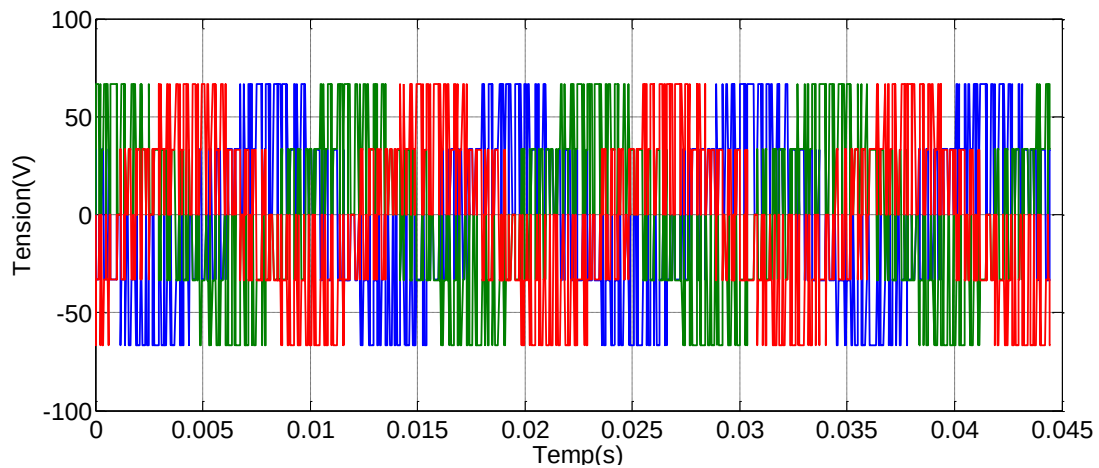


Figure 3-17 : La tension de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI ($E=100V$; $R=20\Omega$, $L=0.2H$).

Chapitre 3 : Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie avec charge RL

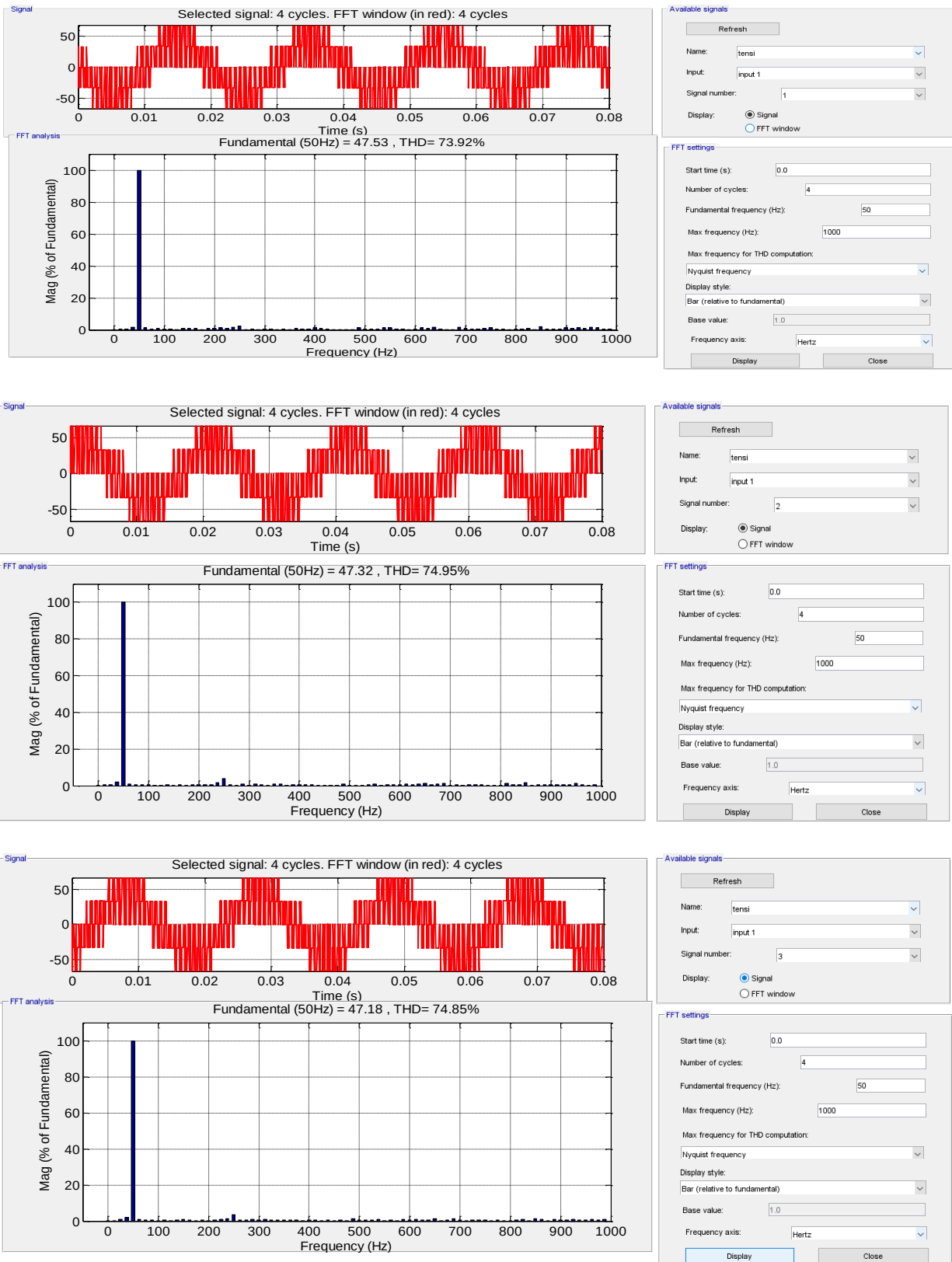


Figure 3-18 : Spectre harmonique de la tension de la sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI avec $R=20\Omega$, $E=100V$, $L=0.2H$ et $f=50Hz$.

3.2 Command MLI sinus-dent de scie

La MLI sinus dents de scie est facilement réalisable par rapport aux autres types de MLI. Cependant, elle présente quelques défauts, notamment, chaque bras d'onduleur commute en même temps sur les trois phases (deux fois par période de découpage) et génère ainsi des ondulations de couple plus importantes que l'autre modulation de largeur d'impulsion. D'autre type de MLI, plus complexe, peuvent intégrer une composante homopolaire (harmonique de rang trois) pour améliorer le rendement de l'onduleur. La figure (3-19) représente la forme de la MLI dite sinus-dents de Scie [29].

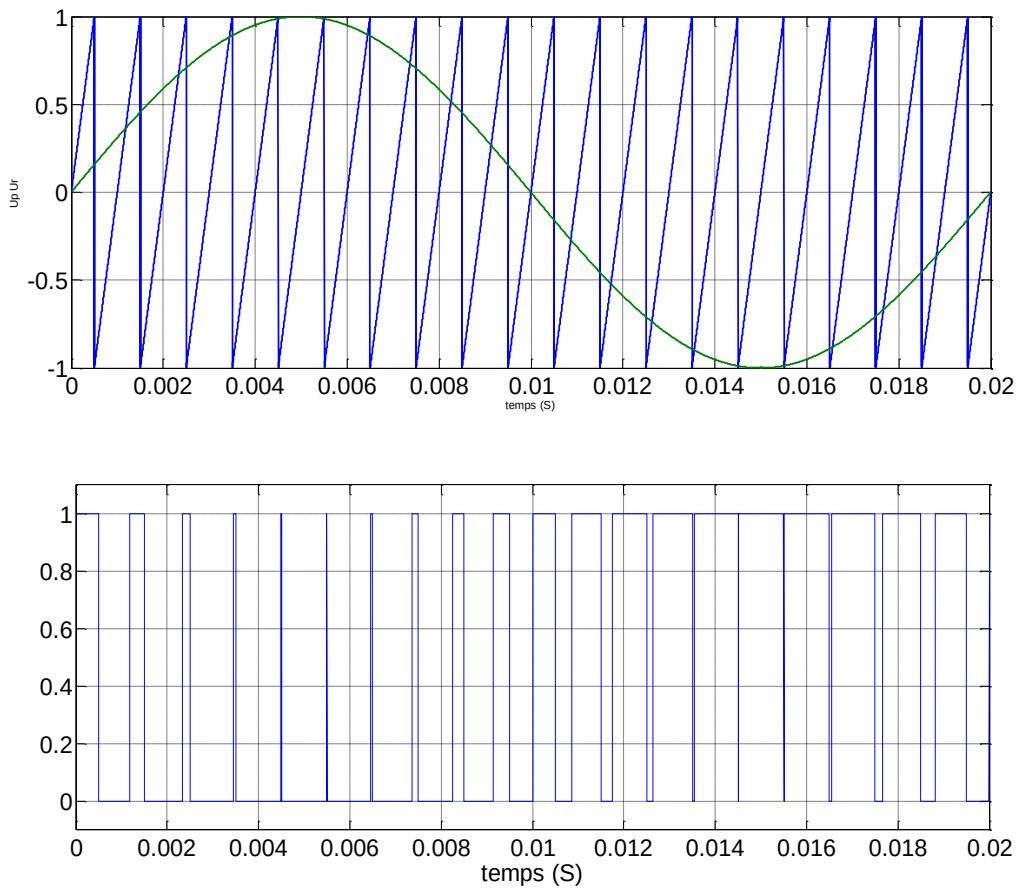


Figure 3-19 : Illustration de la mli sinus-dent de scie.

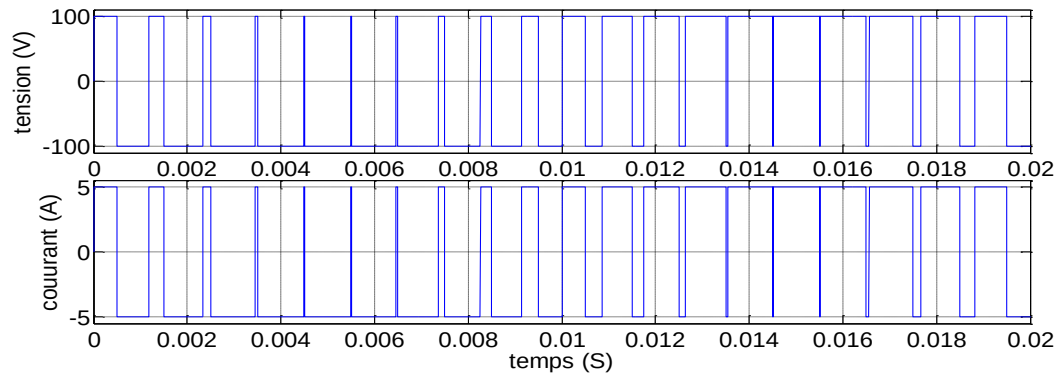


Figure 3-20 : Le courant et la tension de sortie d'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$).

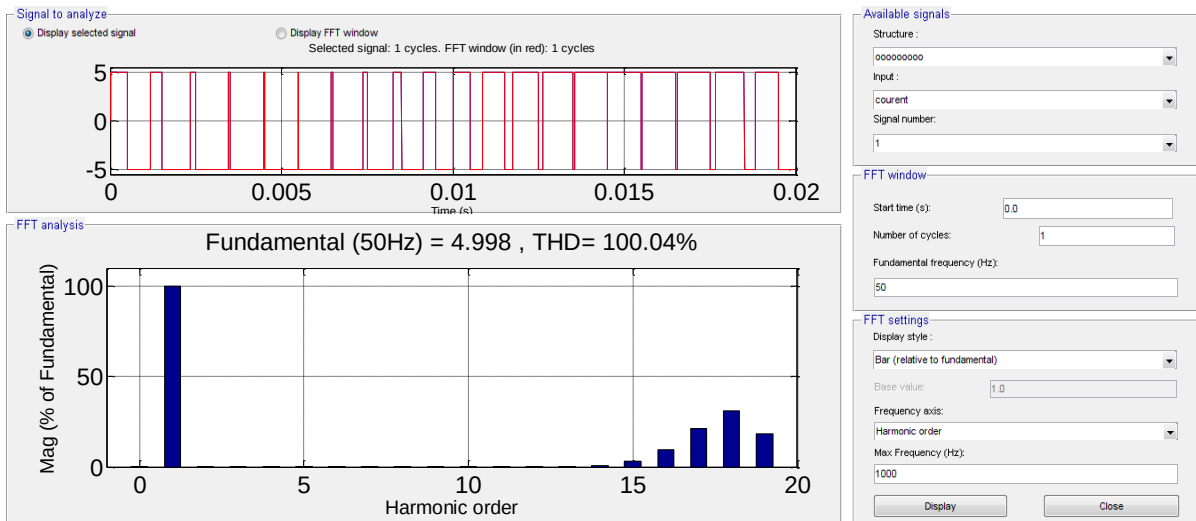


Figure 3-21 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega$, $E=100V$.

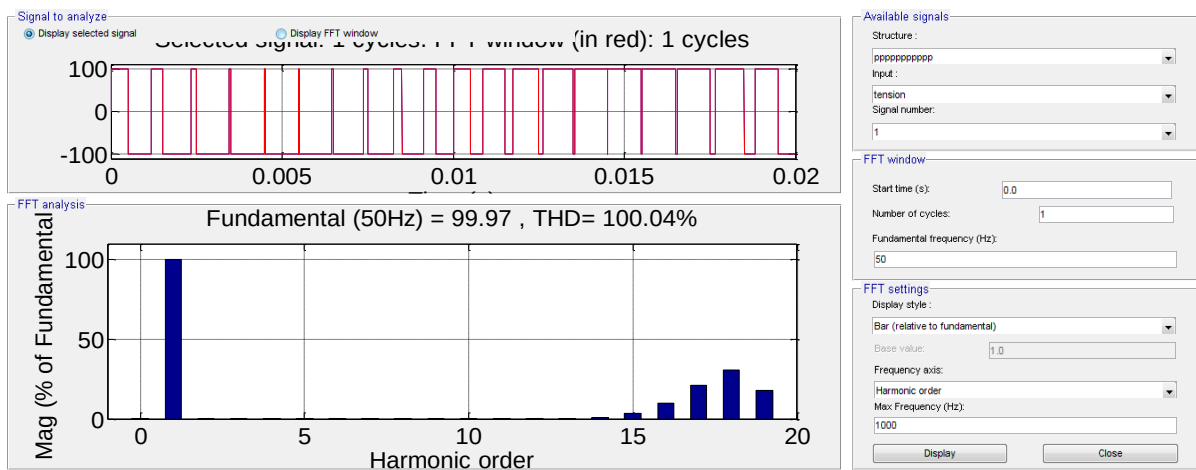


Figure 3-22 : Spectre harmonique de la tension de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega$, $E=100V$.

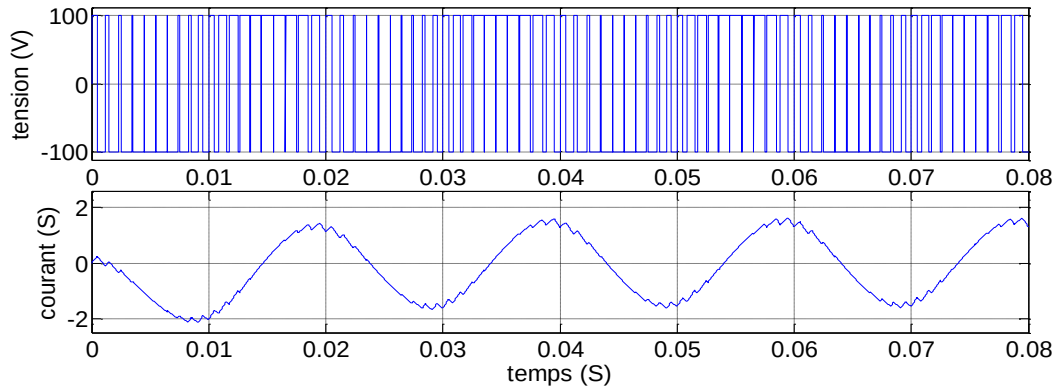


Figure 3-23 : Le courant et la tension de sortie d'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$, $L=0.2H$).

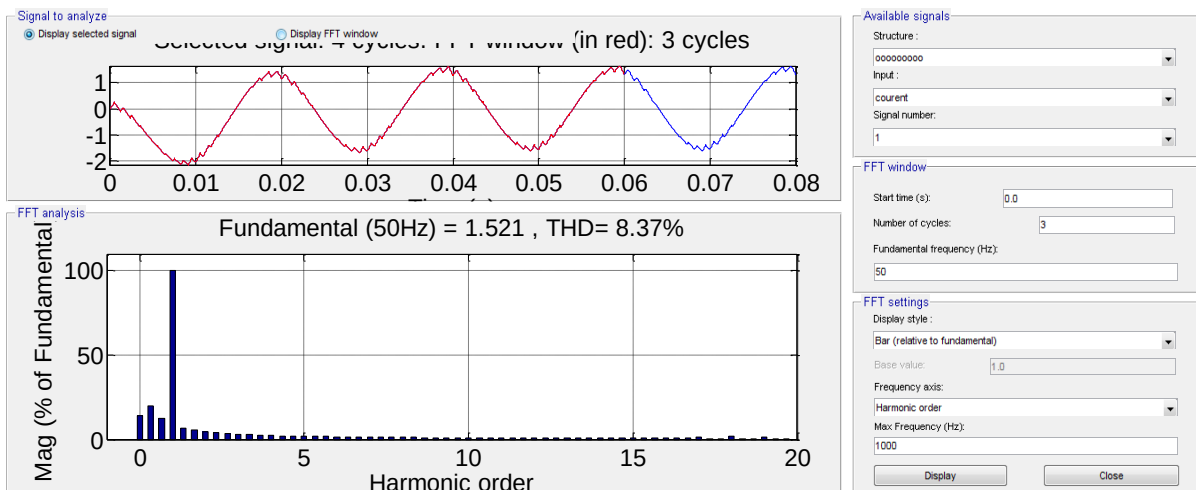


Figure 3-24 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega$, $E=100V$, $L=0.2H$.

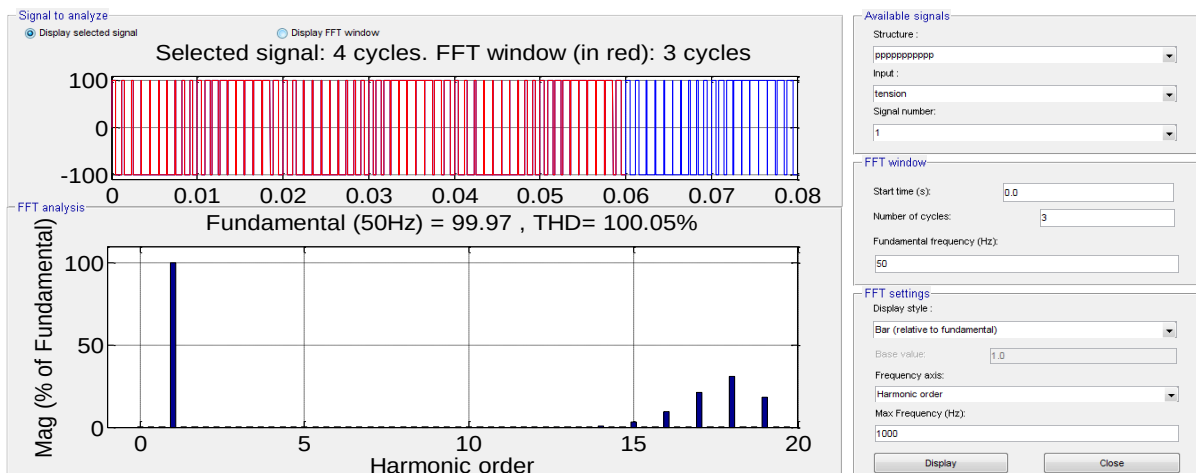


Figure 3-25 : Spectre harmonique de la tension de la sortie de l'onduleur monophasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega$, $E=100V$, $L=0.2H$.

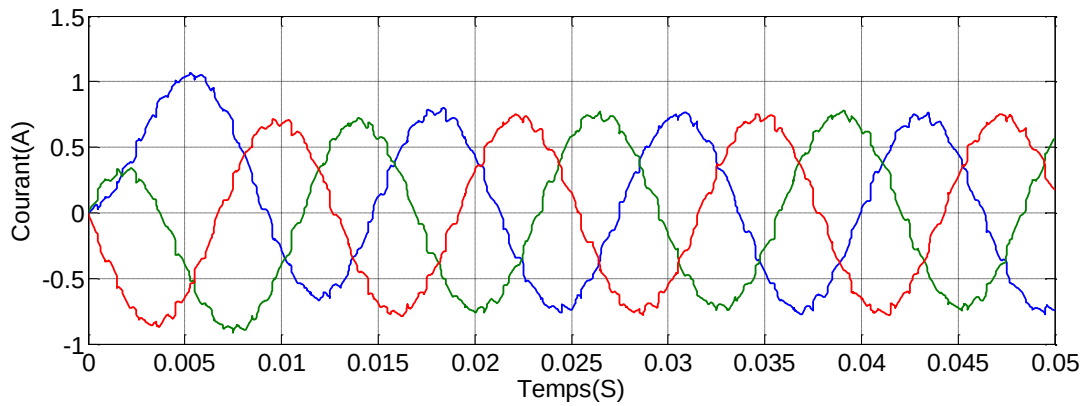
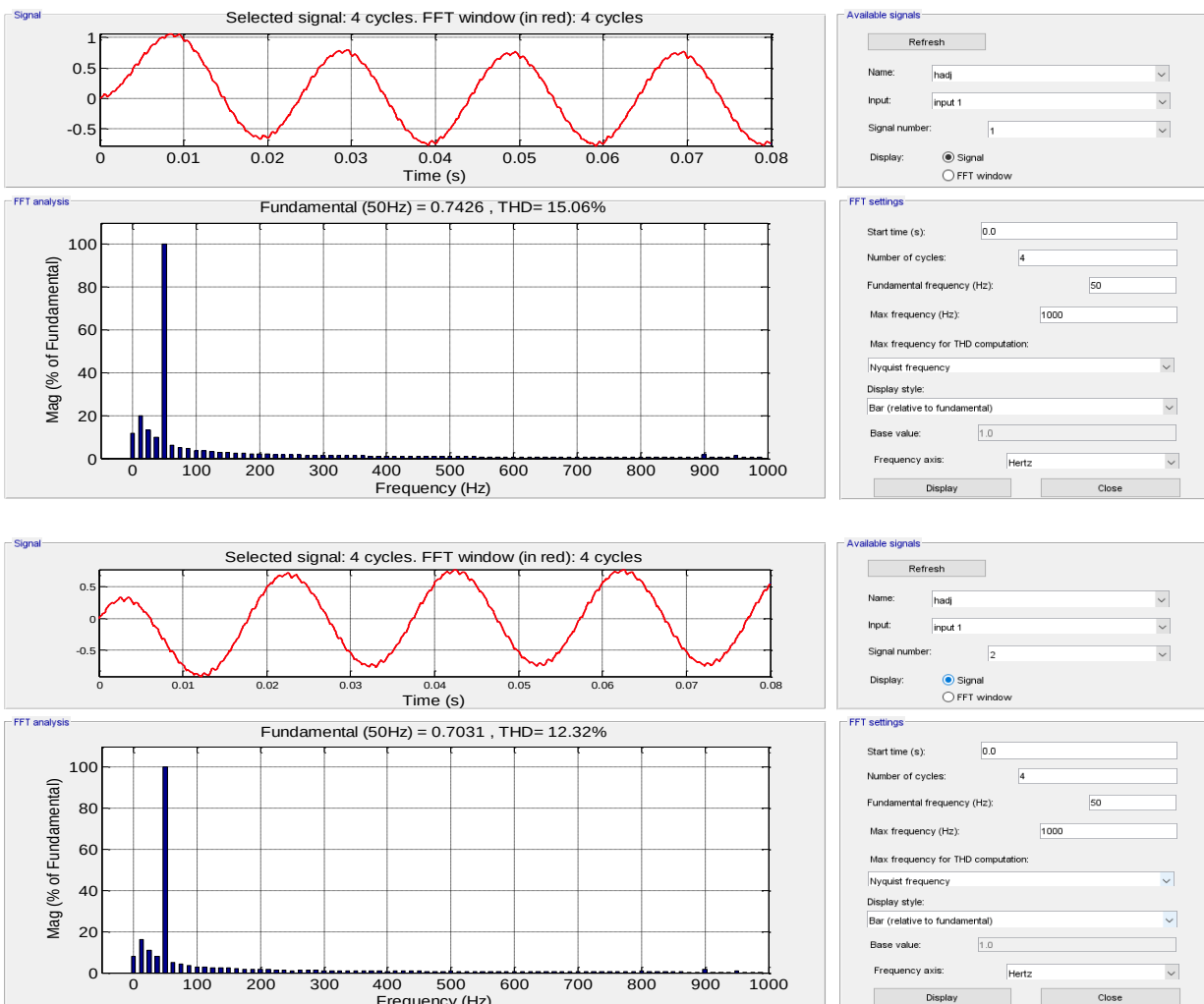


Figure 3-26 : Le courant de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$, $L=0.2H$).



Chapitre 3 : Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie avec charge RL

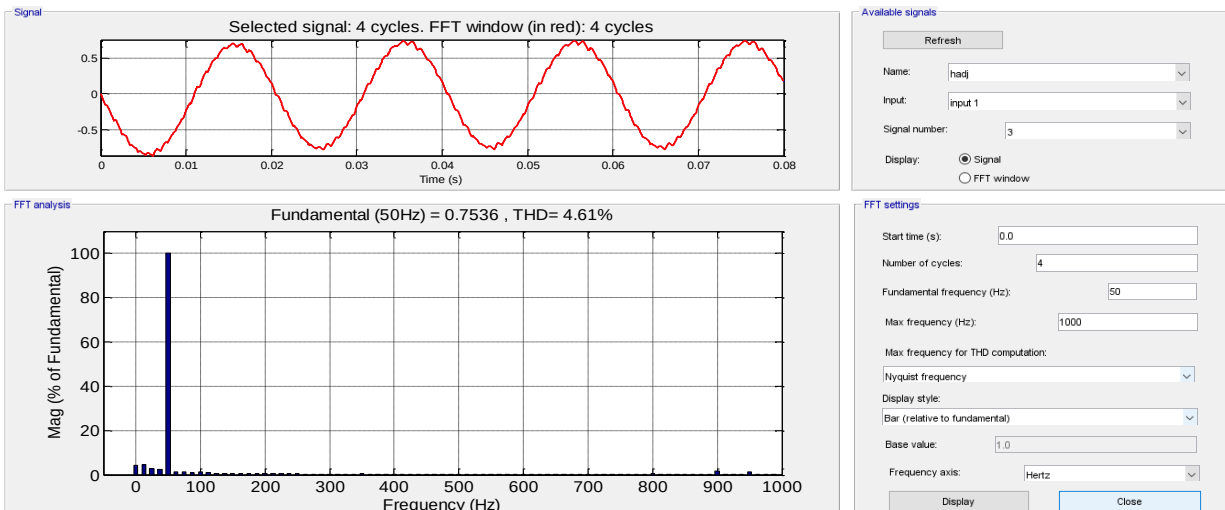


Figure 3-27 : Spectre harmonique de courant de la sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega$, $E=100V$, $L=0.2H$.

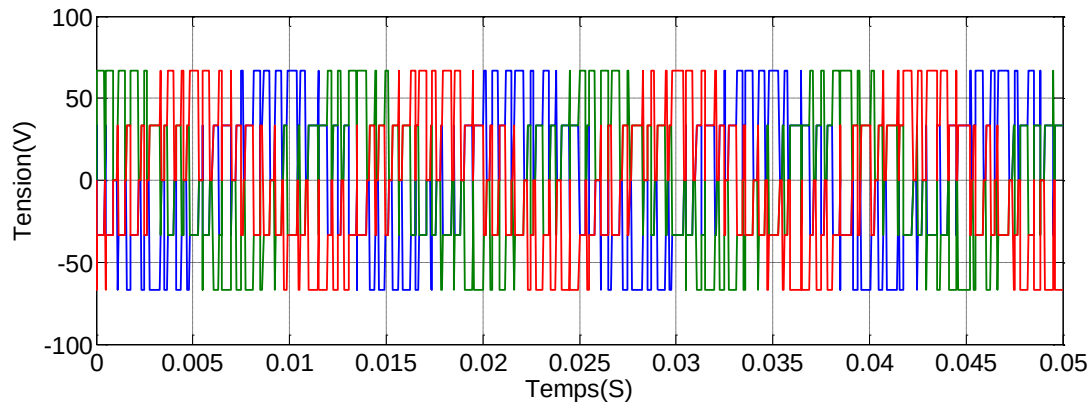
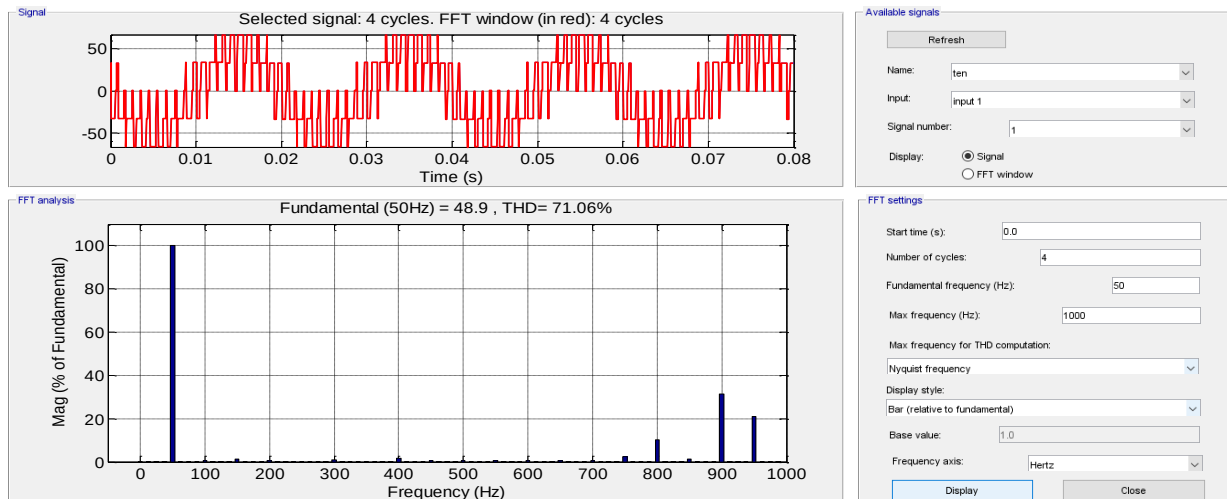


Figure 3-28 : La tension de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$).



Chapitre 3 : Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie avec charge RL

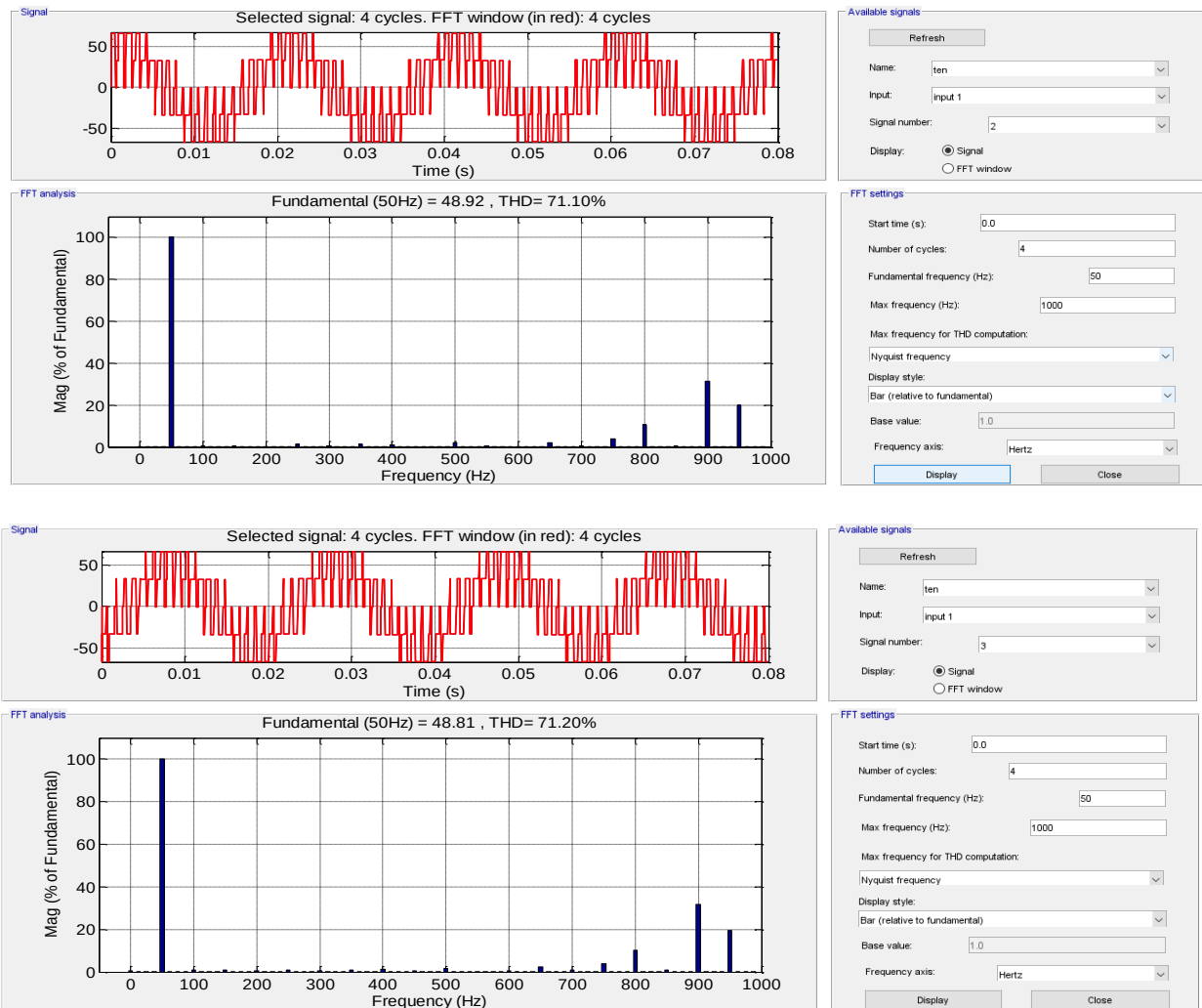


Figure 3-29 : Spectre harmonique de la tension de sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega$, $E=100V$.

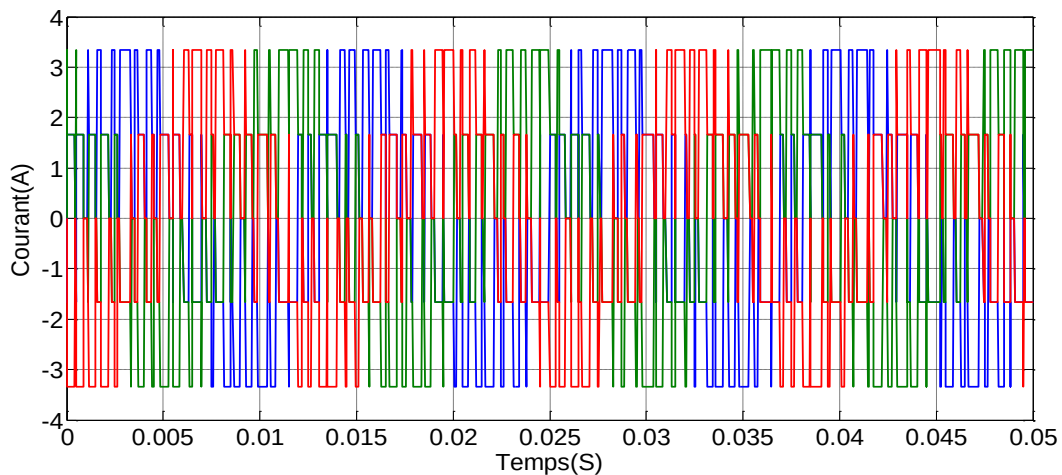


Figure 3-30 : Le courant de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$).

Chapitre 3 : Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie avec charge RL

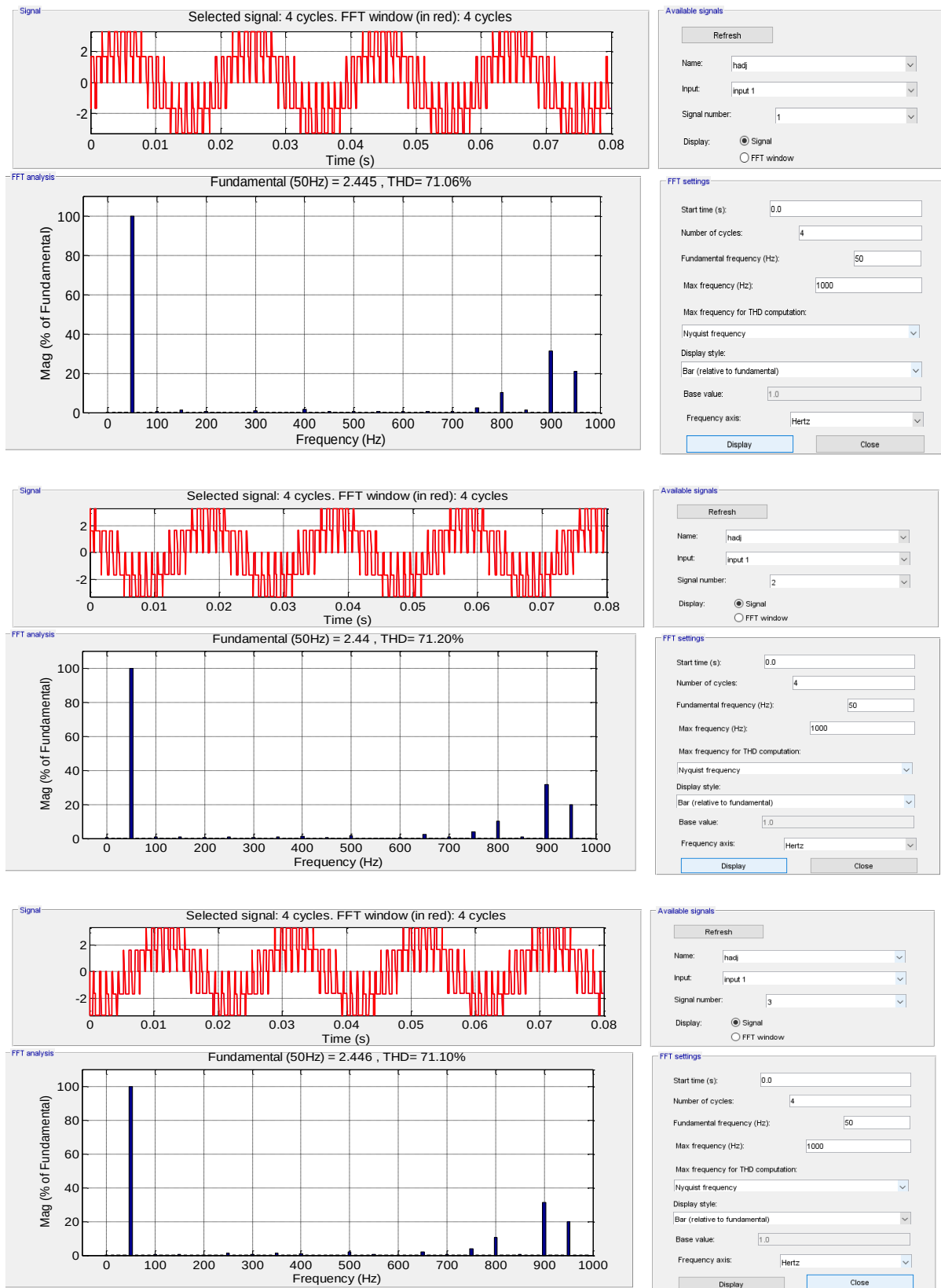


Figure 3-31 : Spectre harmonique de courant de sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega$, $E=100V$.

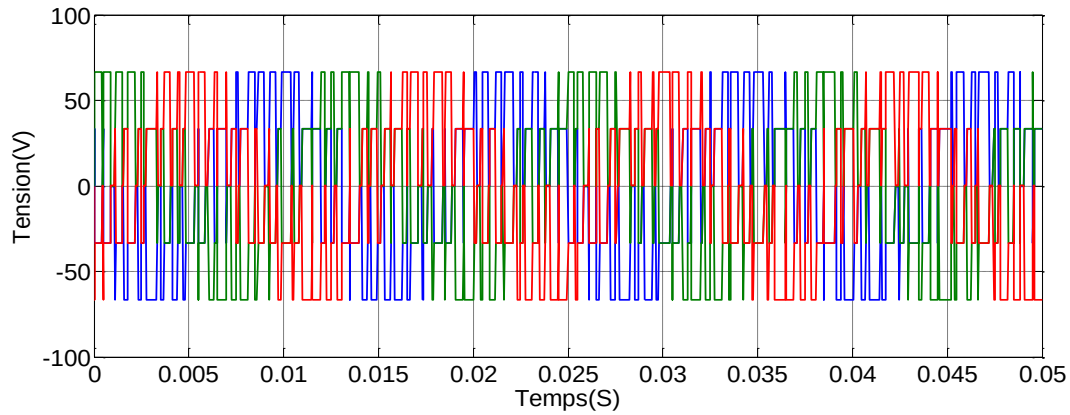
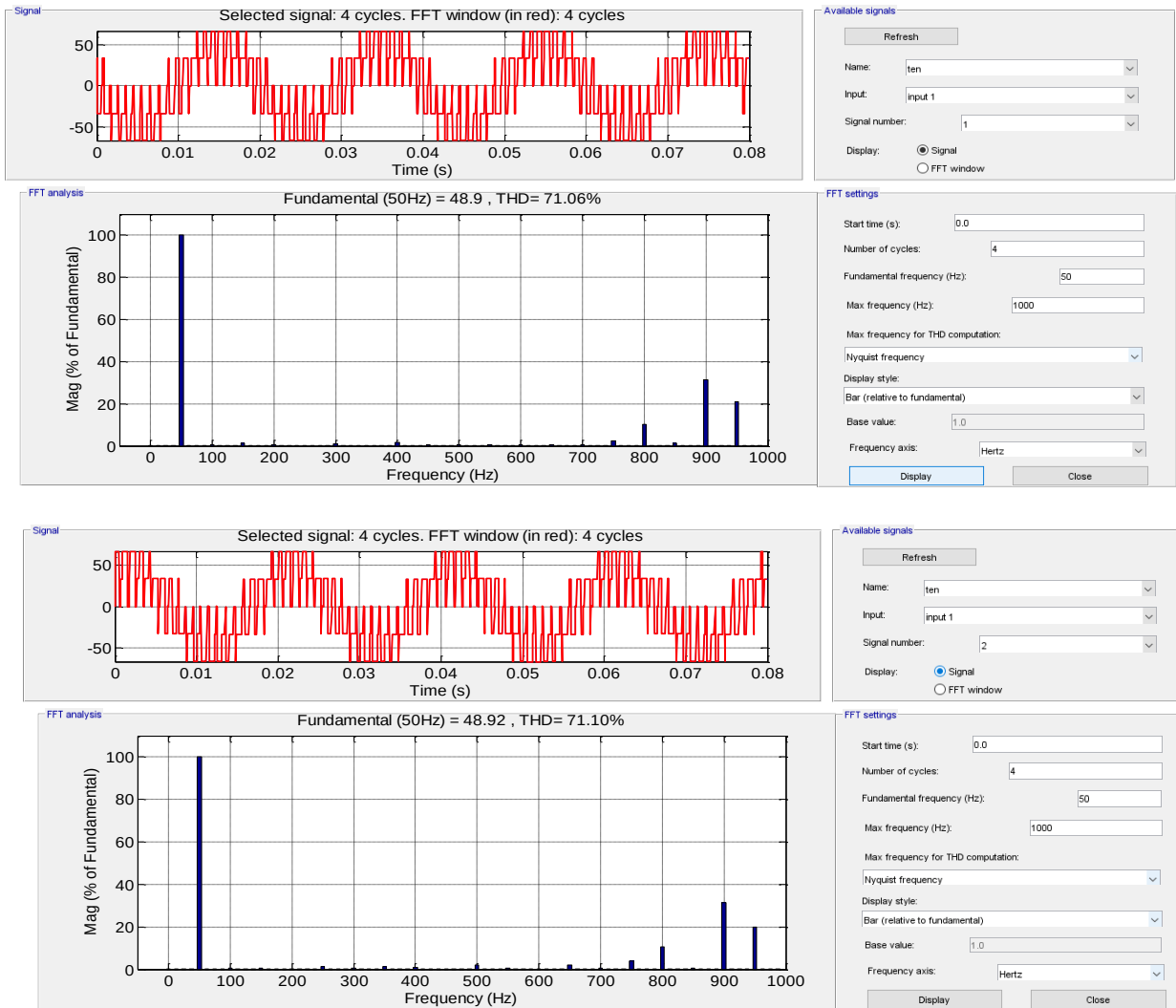


Figure 3-32 : La tension de sortie d'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie ($E=100V$; $R=20\Omega$).



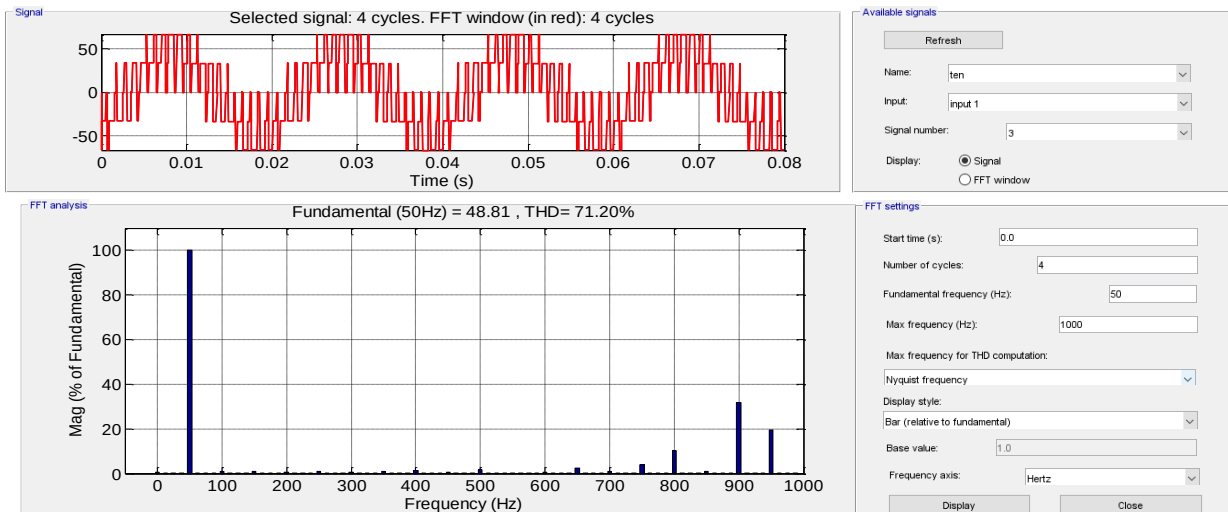


Figure 3-33 : Spectre harmonique de tension de sortie de l'onduleur triphasé à commande MLI sinus-dent de scie avec $R=20\Omega, E=100V$.

3.3 Interprétation des résultats

Type de command	THD (courant)	THD (tension)
MLI sinus triangle	8.39	100
MLI sinus dent de scie	8.37	100.05

Tableau 3-1 : La simulation d'onduleur monophasé.

Type de command	THD (courant)	THD (tension)
MLI sinus triangle	14.81	73.92
MLI sinus dent de scie	15.06	71.06

Tableau 3-2 : La simulation d'onduleur triphasé.

- 1) Après la simulation d'onduleur monophasé et triphasé à commande MLI sinus triangle et MLI sinus dent de scie, on remarque que le THD de courant et la tension est approximativement le même.
- 2) L'étude du spectre de la tension de sortie, montre que l'on obtient un fondamental dont la fréquence et l'amplitude dépendent de celles de la référence et des harmoniques d'amplitudes importantes, mais des fréquences proches de celle de la porteuse donc très élevées. Le filtrage

est donc très facile. On peut vérifier que le courant sur charge inductive est très proche d'une sinusoïde.

Discussion

Ce chapitre a été consacré à Simulink les modèles des différentes stratégies de commande MLI sinus-triangle et la commande sinus-dents de scie. L'analyse spectrale montre que les spectres d'harmonique des courants et des tensions sont très proches avec ces deux stratégies.

Dans le chapitre suivant nous avons associant une machine asynchrone-onduleur pour les deux cas monophasé et triphasé.

Chapitre 4

Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie associé à MAS

Le moteur asynchrone monophasé et triphasé est largement utilisé dans l'industrie, sa simplicité de construction nous donne un matériel très fiable et qui demande peu d'entretien [32].

Le modèle de la machine asynchrone, obtenu dans le référentiel tournant associé à son onduleur, a été validé par simulation dans un environnement Matlab (Simulink), les résultats de cette simulation sont regroupés dans ce chapitre. Et nous avons comparé THD de courant statorique de l'onduleur monophasé et triphasé entre la commande MLI sinus triangle et MLI dent de scie.

4.1 Simulation onduleur triphasé à commande MLI sinus dent de scie et MLI sinus triangle

Ce bloc permet de simuler toute les sorties de la machine asynchrone alimentée par un onduleur. La figure (4-1) montre le schéma de simulation d'une machine asynchrone alimenté par un onduleur à MLI.

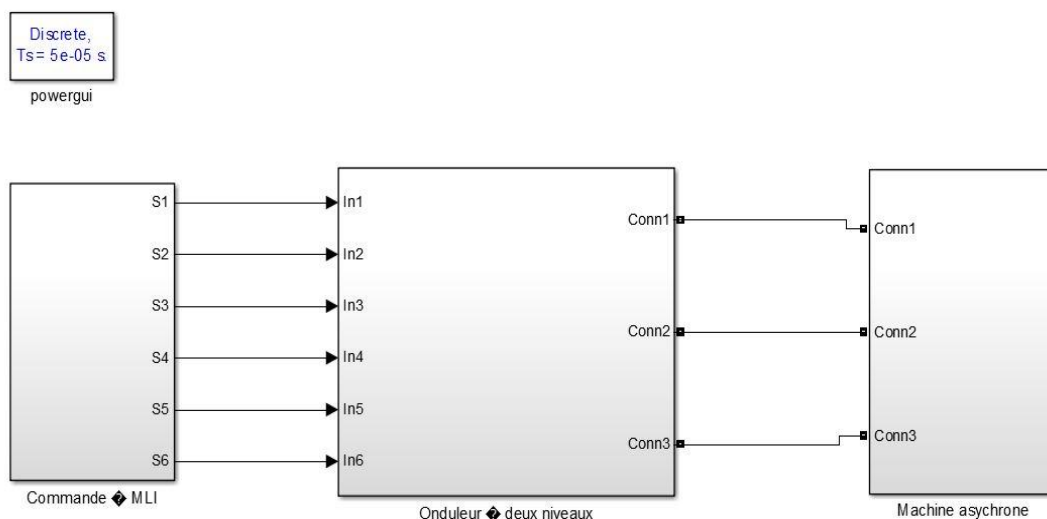


Figure 4-1 : Schéma bloc du système étudié.

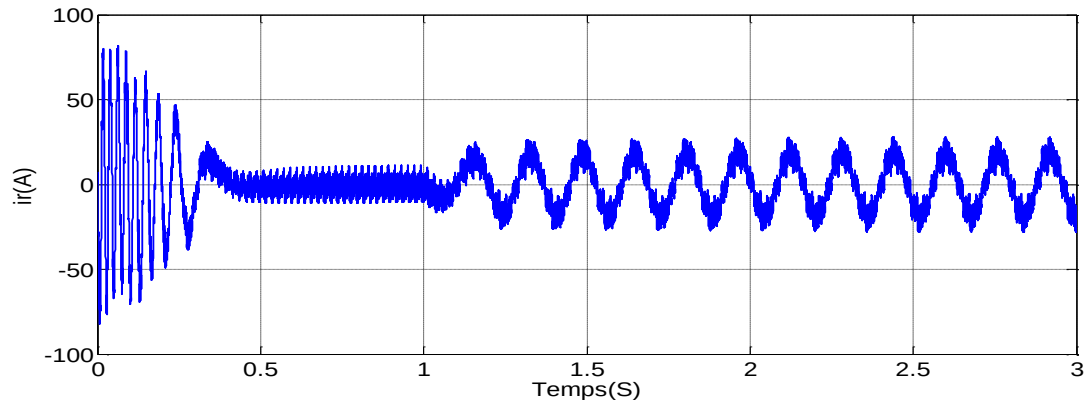


Figure 4-2 : Courant rotorique de la MAS (MLI sinus triangle).

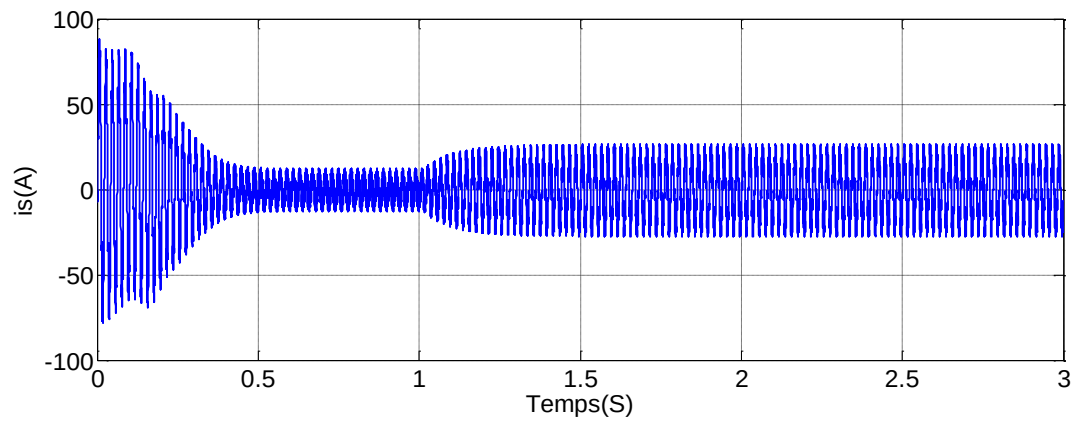


Figure 4-3 : Courant Statorique de la MAS (MLI sinus triangle).

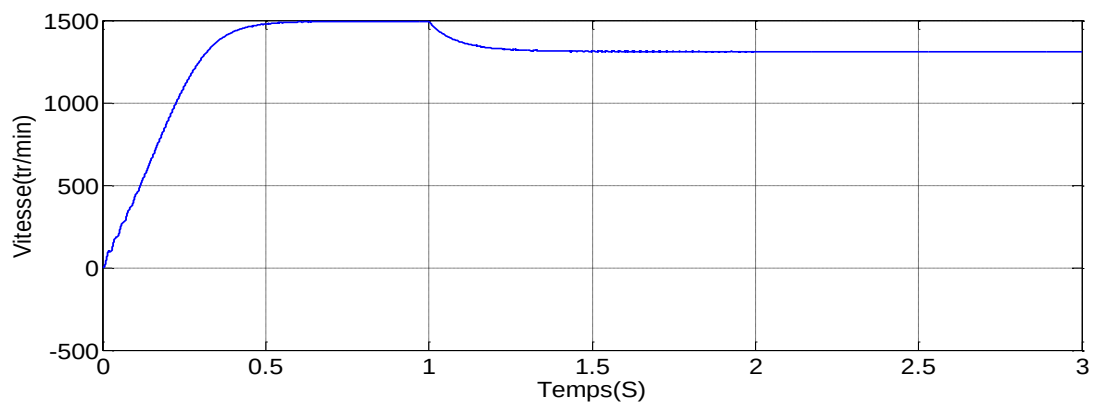


Figure 4-4 : Vitesse de rotation de la MAS (MLI sinus triangle).

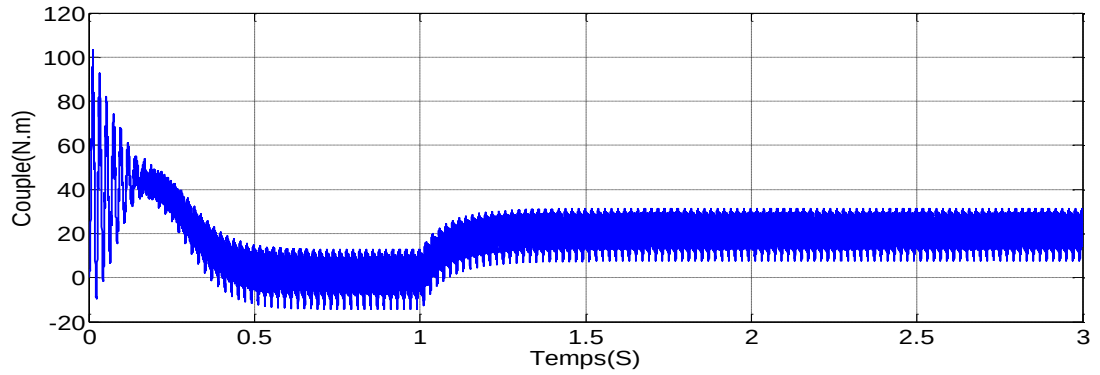


Figure 4-5 : Couple électromagnétique de la MAS. (MLI sinus triangle).

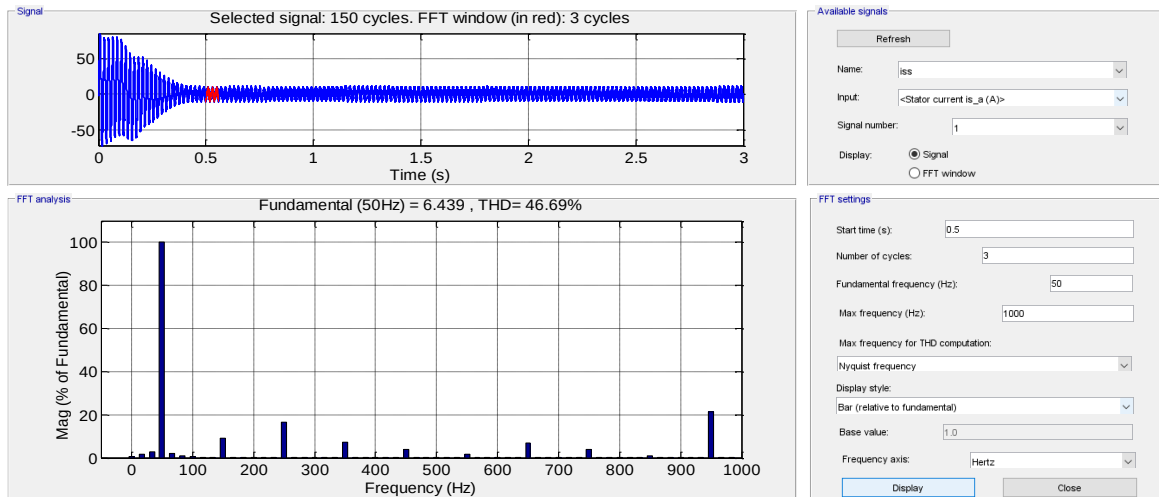


Figure 4-6 : Spectre harmonique de courant statorique (MLI Sinus Triangle).

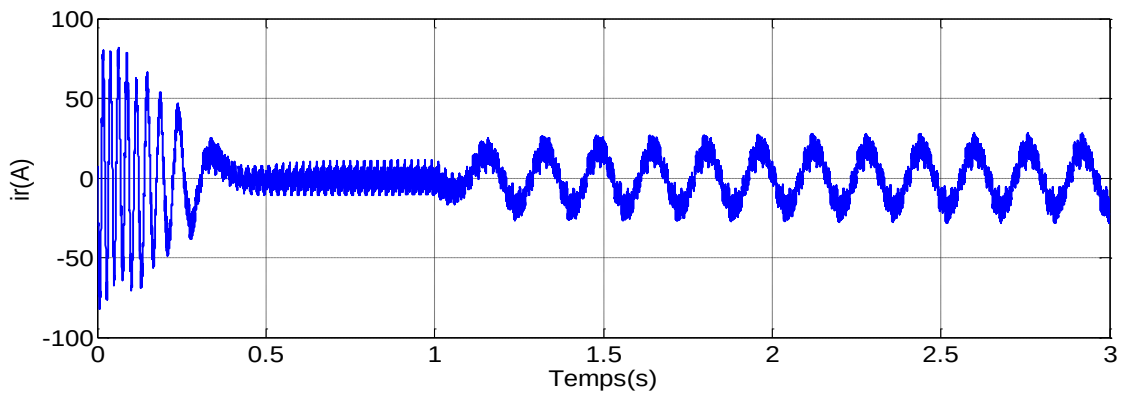


Figure 4-7 : Courant rotorique (MLI Dent de scie).

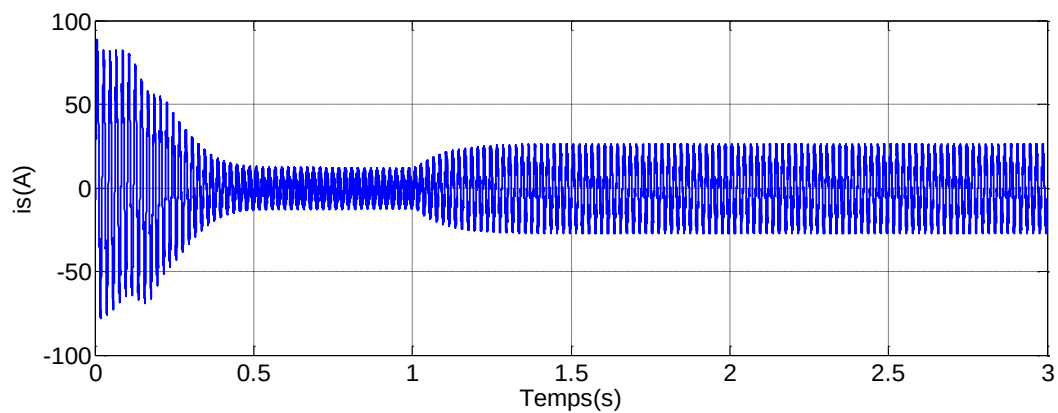


Figure 4-8 : Courant statorique (MLI Dent de scie).

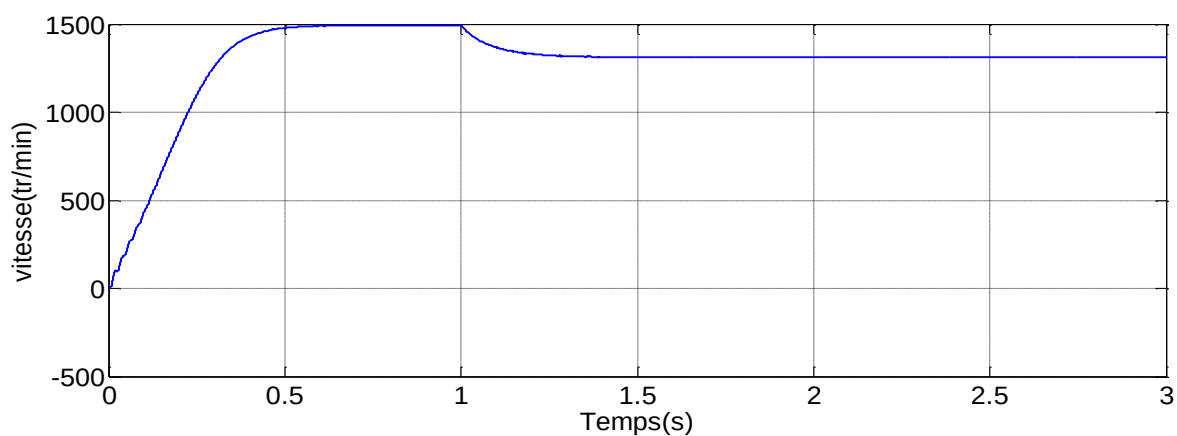


Figure 4-9 : Vitesse de rotation (MLI Dent de scie).

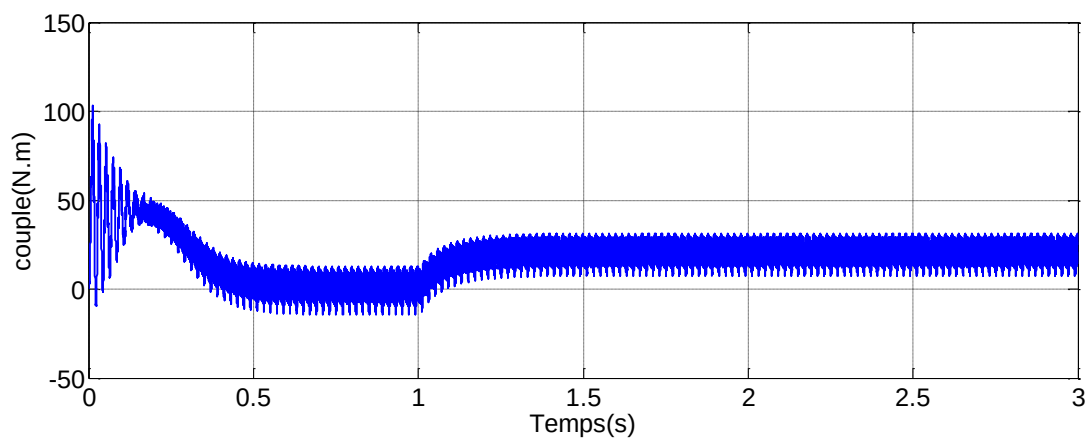


Figure 4-10 : Couple électromagnétique (MLI Dent de scie).

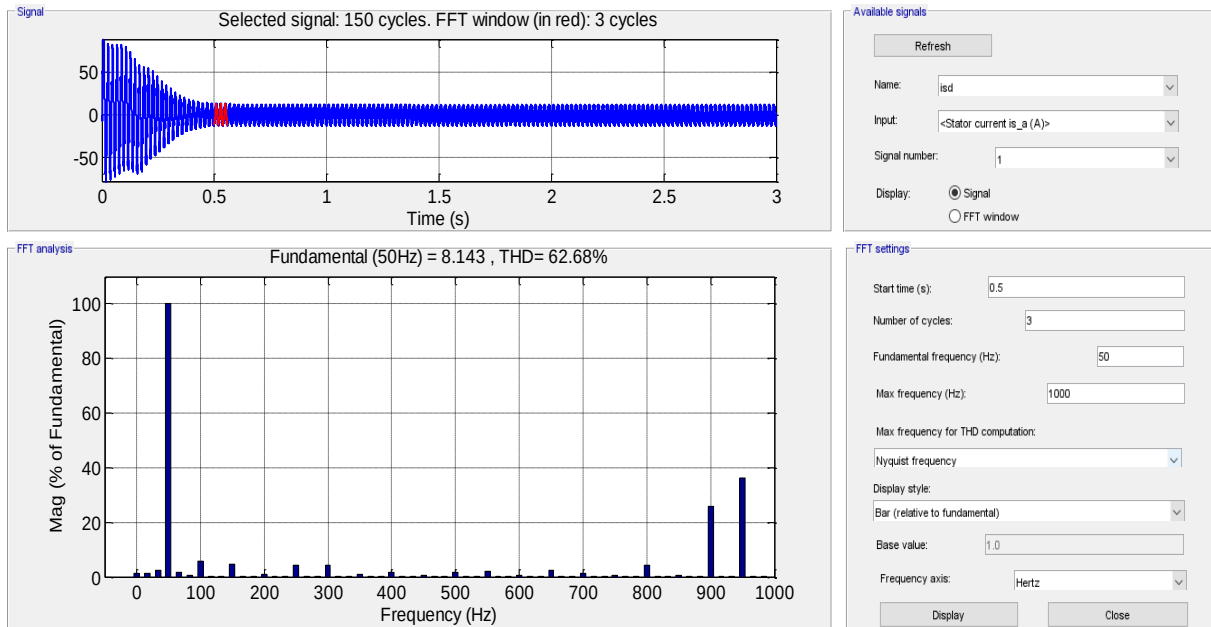


Figure 4-11 : Spectre harmonique de courants statorique (MLI Dent de scie).

4.2. Simulation onduleur monophasé à commande MLI sinus dent de scie et MLI sinus triangle

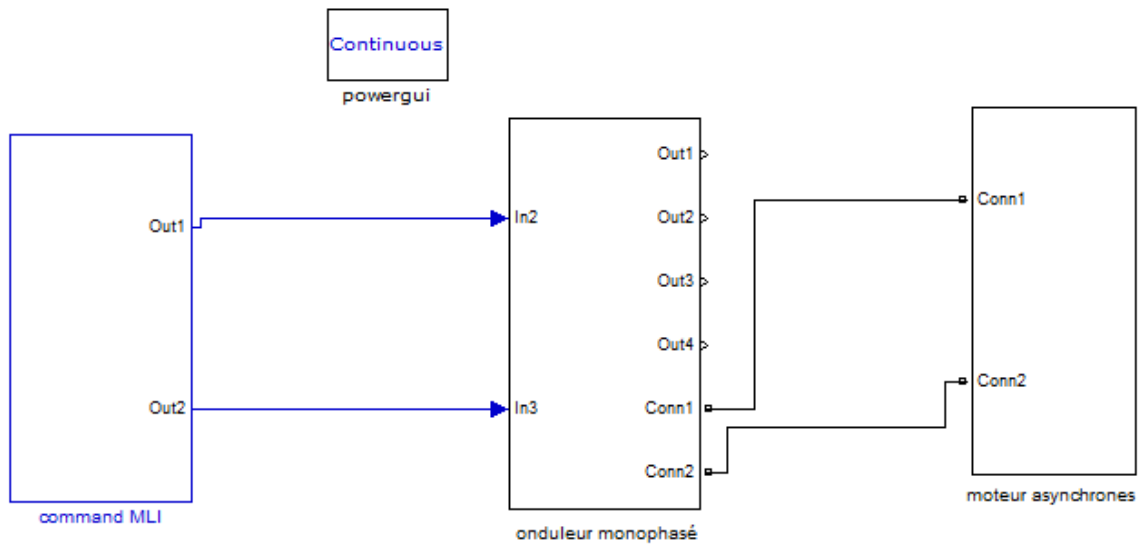


Figure 4-12 : Le schéma bloc de la technique de commande MLI sinus dent de scie et sinus triangle d'un onduleur monophasé en charge.

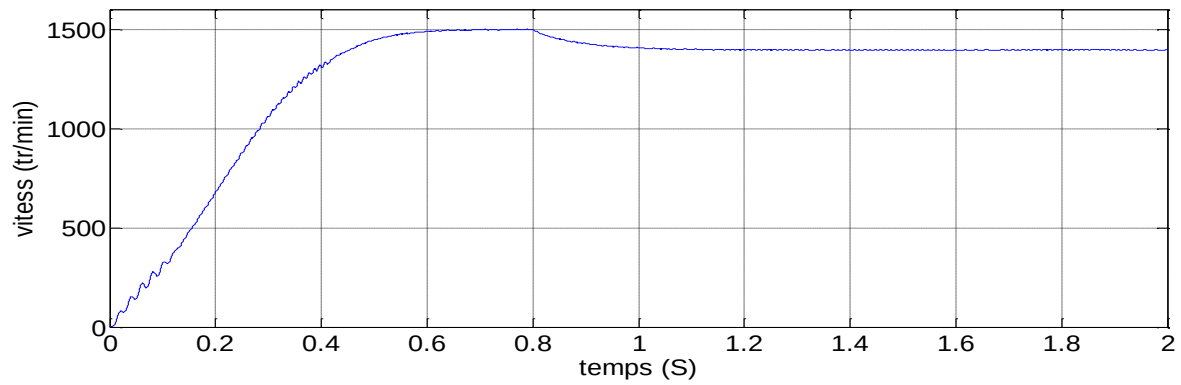


Figure 4-13 : Couple électromagnétique (MLI dent de scie).

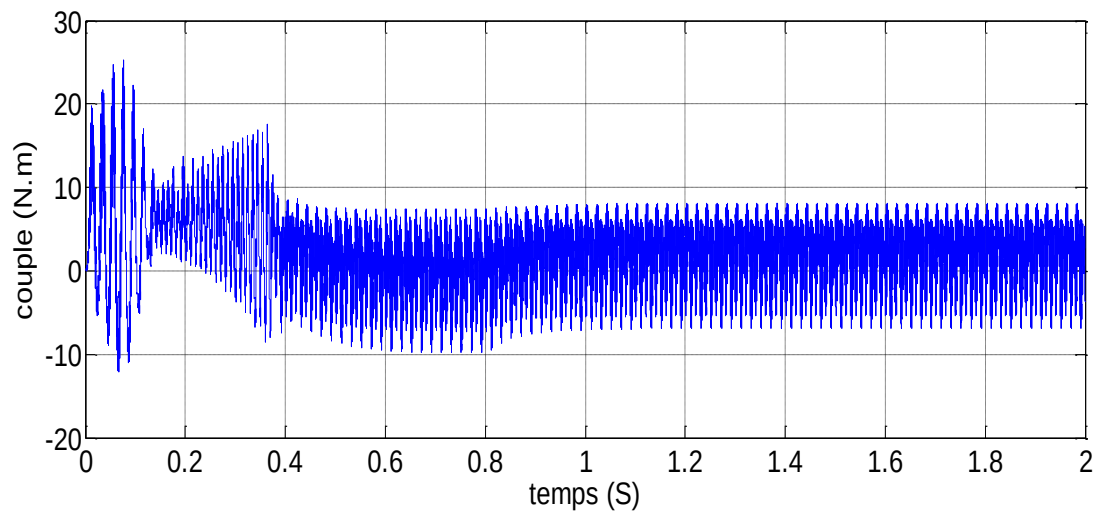


Figure 4-14 : Vitesse de rotation (MLI dent de scie).

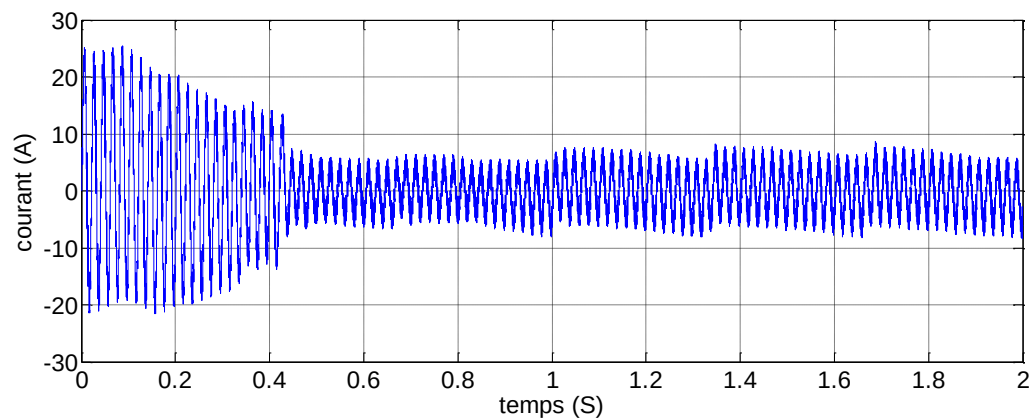


Figure 4-15 : Allure de courant (MLI dent de scie).

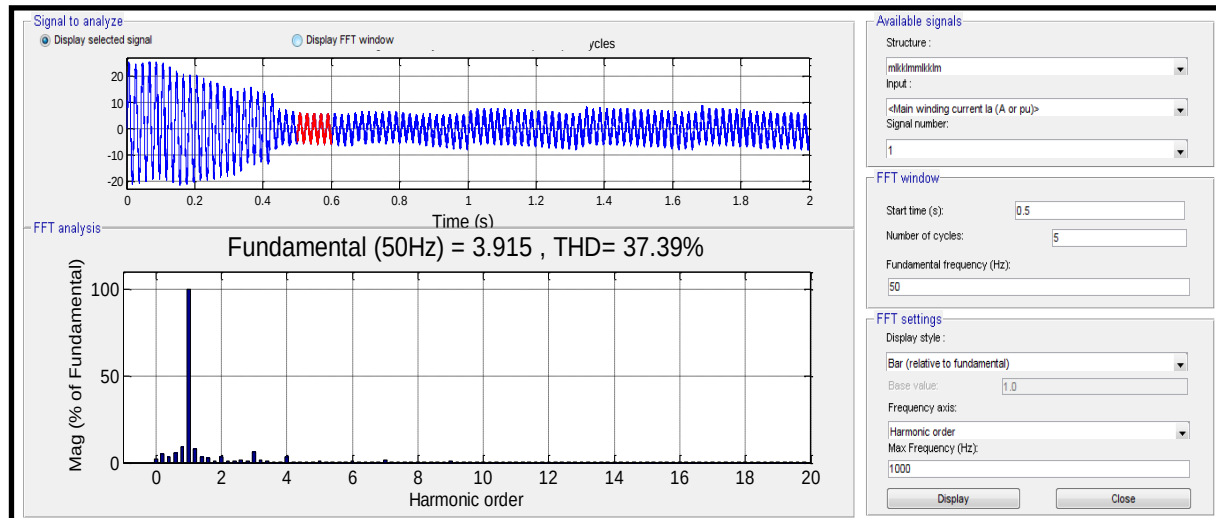
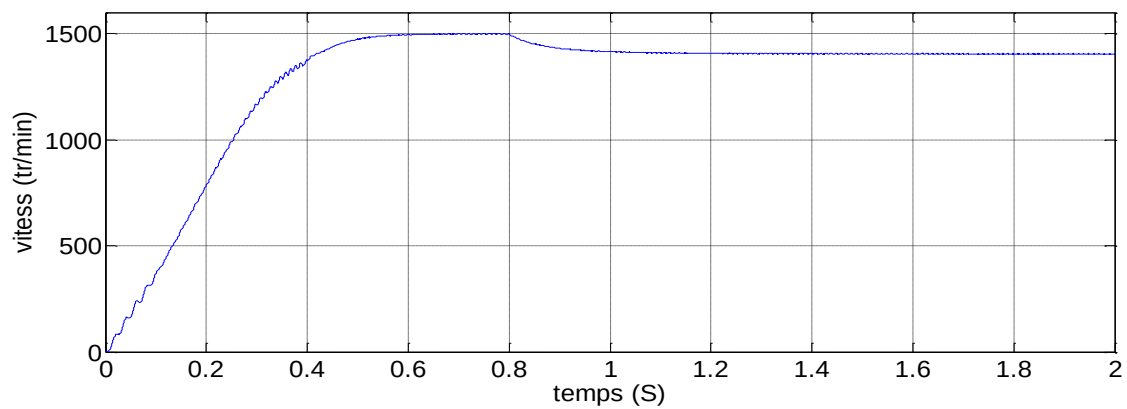
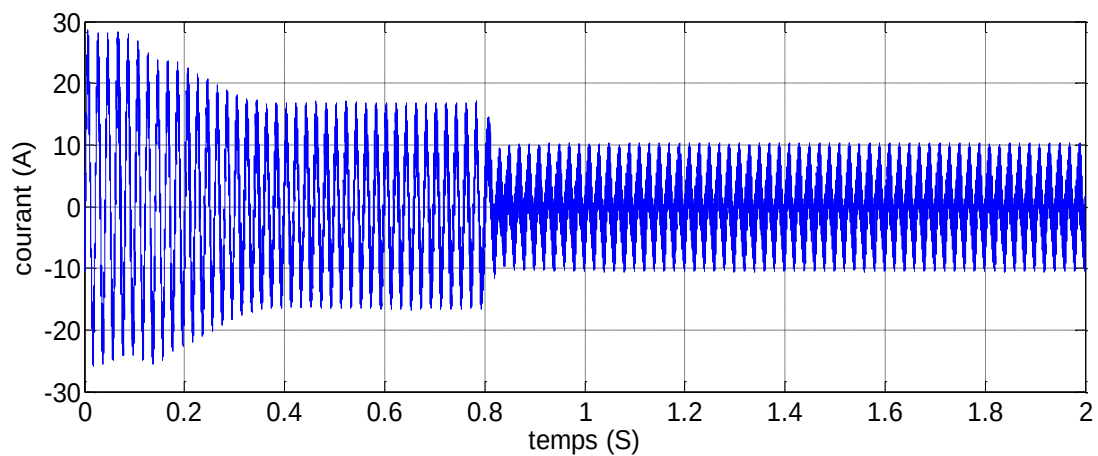


Figure 4-16 : Spectre harmonique de courants statorique (i_s) de la machine associer avec onduleur monophasé à commande MLI sinus dent de scie.



(a)



(b)

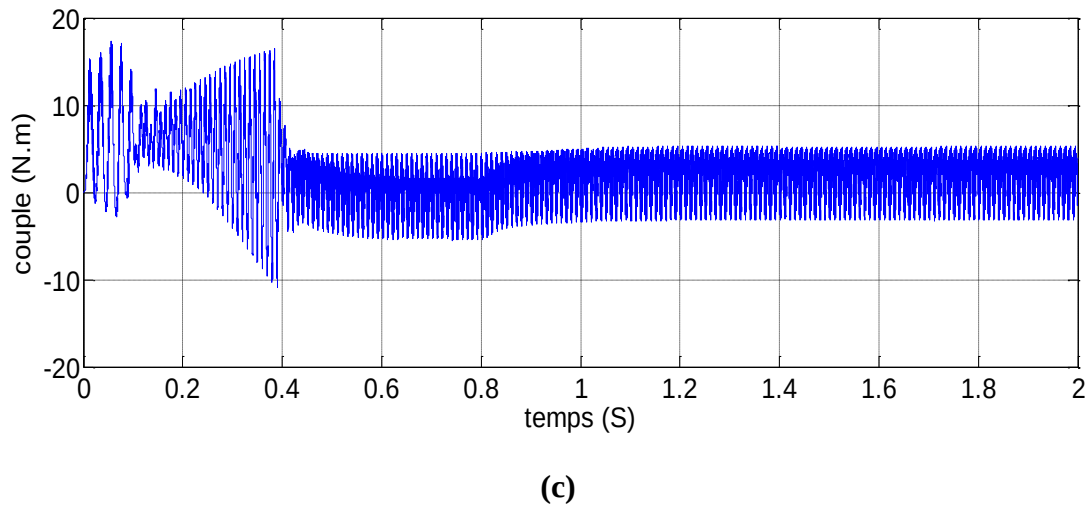


Figure 4-17 : Fonctionnement en charge de la machine asynchrone associé à un onduleur monophasé a la commande MLI Sinus Triangle. (a) : Vitesse de rotation, (b) : courant de charge, (c) : Couple électromagnétique.

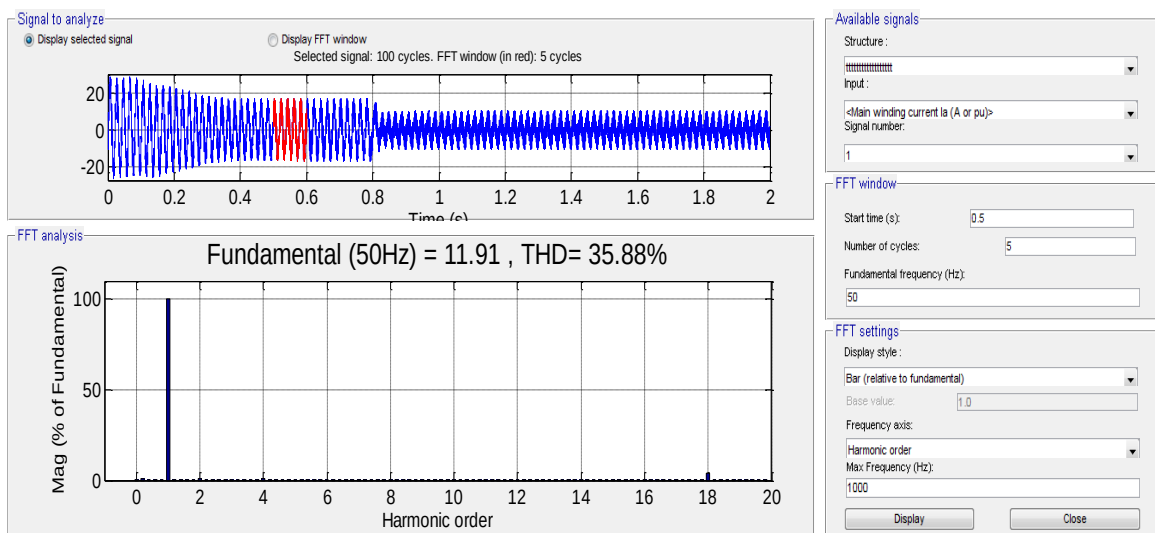


Figure 4-18 : Spectre harmonique de courants statorique (is) de la machine associer avec onduleur monophasé a commande MLI Sinus triangle.

4.3 Interprétation des résultats

- ✓ THD (is) [%] de courant statorique de l'onduleur monophasé associé de la machine asynchrone

Type de la commande	THD (is) [%]
MLI sinus triangle	35.88%
MLI sinus dent de scie	37.39

Tableau 4-1 : Résultats de l'onduleur monophasé.

- ✓ THD (is) [%] de courant statorique de l'onduleur triphasé associé de la machine asynchrone

Type de la commande	THD (is) [%]
MLI sinus triangle	46.69
MLI sinus dent de scie	62.68

Tableau 4-2 : Résultats de l'onduleur triphasé.

Les figures de (4-2) à (4-18) montrent les résultats de simulation lorsque la machine est couplée avec l'onduleur.

On remarque que les courbes du couple et de la vitesse obtenus sont oscillatoires (cas d'une alimentation en MLI), pour le couple et la vitesse qui sont dû aux harmoniques de rang faible en raison des commutations non instantanées dans l'alimentation car la fréquence des composants est limitée, le régime permanent est établi lorsque la vitesse atteint la vitesse nominale au point de fonctionnement ou le couple électromagnétique égalise le couple résistant.

Chapitre 4 : Onduleur commandé par MLI sinus triangle et dent de scie associé à MAS

Concernant les courants statoriques, en régime transitoire un pic de courant s'établit dans le moteur, ce sont les courants de démarrage, ces courants représentent l'un des grands problèmes de la machine asynchrone. La force contre-électromotrice qui s'oppose à la tension appliquée est nulle au démarrage, il apparaît un courant intense, ce qui crée à la fois une contrainte au moteur lui-même et une gêne pour le réseau.

Discussion

Ce chapitre a été consacré à simuler l'onduleur monophasé et triphasé associé de la machine asynchrone et comparer le THD entre la commande MLI sinus triangle et MLI sinus dent de scie. On remarque que le THD dans la commande MLI sinus triangle est moins riche d'harmonique que celui de la MLI sinus-dents de scie.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'est porté sur l'étude de l'onduleur en pont triphasé et monophasé commandé par MLI.

Dans le premier chapitre nous avons représenté différents types des onduleurs et leurs applications, et en montrant leur principe pour différentes commandes (commande en plein onde et commande par MLI).

Et en deuxième chapitre le travail consistait à étude de la technique d'MLI et leur principe

Dans le chapitre trois est consisté à simulation l'onduleur monophasé et triphasé avec la charge RL pour deux différente commande (MLI sinus triangle et MLI sinus dent de scie).

Le dernier chapitre est consisté à simulation l'onduleur monophasé et triphasé associé avec la machine asynchrone pour deux différente commande (MLI sinus triangle et MLI sinus dent de scie).

Les résultats de simulation obtenus sont très satisfaisants et s'adaptent avec le fonctionnement de l'onduleur de tension en pont triphasé et monophasé, suivant le type de commande appliquée.

L'étude de l'analyse spectrale de l'onduleur monophasé et triphasé avec la charge RL montre que les spectres des courants et la tension sont très proches avec ces deux stratégies (commande MLI sinus tringle et MLI sinus dent de scie).

L'étude de l'analyse spectrale de l'onduleur monophasé et triphasé avec machine asynchrone montre que les spectres de courant statorique que la MLI sinus-triangle est légèrement moins riche que celui de la MLI sinus-dents de scie.

En termes de perspectives, notre travail peut être amélioré, afin d'obtenir des résultats plus performants selon les recommandations suivantes :

- ✓ Utilisé les méthodes numériques de programmation d'impulsion (Vectorielle, pré-calculée).
- ✓ Utilisé la modulation en MLI aléatoire RPWM pour minimiser le problème des harmoniques.

Bibliographie

- [1] DIAB, Ahmed A. Zaki, AL-SAYED, Abo-Hashima M., ABBAS MOHAMMED, Hossam Hefnawy, *et al.* « Literature review of induction motor drives. Development of Adaptive Speed Observers for Induction Machine System Stabilization », 2020, p. 7-18.
- [2] CHENCHIREDDY, Kalagotla, JEGATHESAN, V., et ASHOK KUMAR, L. « Different topologies of inverter: a literature survey ». *Innovations in Electrical and Electronics Engineering*, 2020, p. 35-43.
- [3] ZHOU, Keliang et WANG, Danwei. « Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: a comprehensive analysis [three-phase inverters] ». *IEEE transactions on industrial electronics* , 2002, vol. 49, no 1, p. 186-196.
- [4] IOINOVICI, Adrian. « Power Electronics and Energy Conversion Systems: Fundamentals and Hard-switching Converters ». Volume 1. Wiley, 2013.
- [5] Kheireddine CHETTIH, « Réalisation d'un onduleur monophasé avec un bras redondant » Mémoire de Master, Université des Frères Mentouri Constantine, Algérien, 2015.
- [6] MOLYNEAUX, Lynette, BROWN, Colin, WAGNER, Liam, *et al.* « Measuring resilience in energy systems: Insights from a range of disciplines ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 2016, vol. 59, p. 1068-1079.
- [7] BÜHLER, Hansruedi. « Convertisseurs statiques. PPUR presses polytechniques », 1991.
- [8] WILDI, Théodore. « Électrotechnique (4e édition) ». Presses de l'université Laval, 2005.
- [9] Scribd, « Cours sur l'onduleur », < <https://fr.scribd.com/document/473362126/cours-sur-l-onduleur-docx>> (Consulté le 16/05/2022).
- [10] LASNE, Luc. « Électronique de puissance ». Dunod, 2011.
- [11] ZEB, Kamran, UDDIN, Waqar, KHAN, Muhammad Adil, *et al.* « A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 94, p. 1120-1141.

Bibliographie

- [12] Electronique Mixte, « Cours PV Autonome-Licences Pro-VLS-2017.ppt », <<https://www.electronique-mixte.fr/wp-content/uploads/2018/07/Batterie-panneaux-solaire-6.pdf>> (Consulté le 16/05/2022).
- [13] HUSAIN, Iqbal, OZPINECI, Burak, ISLAM, Md Sariful, *et al.* « Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles ». Proceedings of the IEEE, 2021, vol. 109, no 6, p. 1039-1059.
- [14] RANA, Ronak A., PATEL, Sujal A., MUTHUSAMY, Anand, *et al.* « Review of multilevel voltage source inverter topologies and analysis of harmonics distortions in FC-MLI ». Electronics, 2019, vol. 8, no 11, p. 1329.
- [15] Techniques ingénieur, « Onduleur de tension », <<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/convertisseurs-electriques-et-applications-42253210/onduleurs-de-tension-d3176/domaines-d-applications-classiques-d3176niv10001.html>> (Consulté le 16/05/2022).
- [16] Franki66, « Onduleur à résonance », <<https://www.google.com/url?q=https://franki66.free.fr/Elec%25203/>> (Consulté le 18/05/2022).
- [17] MECHERI Salah-eddine, « Réalisation d'un onduleur de tension monophasé contrôle par une carte arduino », Mémoire Master, Université Constantine 1, Algérie, 2014.
- [18] KHANOUCHE, Sarah, CHARIKH, M., KHENTACHE, Yamina, *et al.* « Onduleur monophasé connecté au réseau pour les modules photovoltaïques ». 2020. Thèse de doctorat. Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, Algérie.
- [19] MOUSSOUNI Nasser Eddine et OUADFEL Sofiane, « Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasé », Mémoire Master, Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA, Algérie, 2017.
- [20] Public.iutenligne, « Onduleur monophasé de tension », <https://public.iutenligne.net/electricite/marty/ELPU/fichiers/72_Ondul_Mono/OndMonoV.htm> (Consulté le 18/05/2022).
- [21] ABOELSAUD, Raef, IBRAHIM, A., et GARGANEEV, Alexander G. « Review of three-phase inverters control for unbalanced load compensation ». International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2019, vol. 10, no 1, p. 242.

Bibliographie

- [22] BERREZZEK Farid, « Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone », Mémoire Magister, Université Badji Mokhtar – Annaba –, 2006.
- [23] ARABA, TARIQ ZYAD, KHADRAOUI, AISSA, et al. « Détection de défaut sur un système onduleur triphasé par l'analyse des courants ». 2022. Thèse de doctorat. Université de M'sila.
- [24] HAQ, Safa, BISWAS, Shuvra Prokash, HOSAIN, Md Kamal, *et al.* « Performance analysis of switching techniques in modular multilevel converter fed induction motor ». In : 2019 4th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT). IEEE, 2019. p. 1-6.
- [25] GHORZI, Zoulikha et MIMOUNI, Amina. « Stratégies de commande des onduleurs ». 2019. Thèse de doctorat. Directeur: Mr. F BOUKLI HACENE Fouad/Co-Directeur: Mr. Ahmed Tahour.
- [26] FERDIANSYAH, Indra, RUSLI, Muhammad Rizani, PRAHARSENA, Bayu, *et al.* « Speed control of three phase induction motor using indirect field oriented control based on real-time control system ». In: 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). IEEE, 2018. p. 438-442.
- [27] Mme Aissamane Alia, « Mise en œuvre d'algorithme mli vectorielle avec une carte espace ds 1102 », Mémoire de fin d'études d'Ingénieur, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2008.
- [28] ADAMOUE, Mamane, ALKASSOUM, Nabil, FOULANI, André, *et al.* « Dépollution harmonique des réseaux électriques : Etude comparative des commandes, par Modulation de Largeur d'Impulsion et par Hystérésis, des filtres actifs shunts triphasés ». International Journal of Innovation and Applied Studies, 2020, vol. 28, no 2, p. 557-566.
- [29] Adjimi Nadia et Belaidi Wahiba, « Modélisation et commande d'un onduleur MLI », Mémoire de Master, Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi, Algérien, 2009.
- [30] NACER TAREK, « Génération des signaux PWM a l'aide d'un DSP », Mémoire De Master, Université Saad Dahleb De Blida, Algérien, 2011.

Bibliographie

[31] Elearning.univ-Djalfa, « Les différentes Stratégies de modulation », < <https://www.google.com/url?q=http://elearning.univ-djalfa.dz/mod/resource/view.php>> (Consulté le 18/05/2022).

[32] HOUILI Rabiaa, ZROUG Cheima, « Etude Comparative Entre Différentes Techniques de commande Des Onduleur à MLI Associés à Régulation d'une Machine Asynchrone » , Mémoire Master, Université Mohamed Khaider Biskra, Algérie, 2020.