

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire BOUSSOOUF Abdelhafid -Mila

Institut des Sciences et Technologie

Département de Génie Mécanique et Électromécanique



N°Ref :.....

**Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER**

Spécialité : Electromécanique

***Etude, commande et Réalisation
d'ensemble expérimental hacheur-
onduleur***

**Réalisé par :
Amrane Hocine
Torchi Samir
Zelbah Nidal**

Soutenu devant le jury :

**M. Rafik BOUHENNACHE
M. Kamal HIMOUR
Mme. Souhila HADEF**

**Président
Examineur
Promoteur**

Année universitaire : 2024/2025



Dédicace

À mes chers parents,
Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur
soutien permanent tout au long de mon parcours
universitaire.

À mes frères et sœurs,
Pour leur présence réconfortante et leurs
encouragements.

À mes enseignants,
Pour leur dévouement à transmettre le savoir et la
rigueur scientifique.

À mes amis fidèles,
Pour les moments partagés, les échanges d'idées et
l'entraide sincère.

Je vous dédie ce modeste travail avec tout mon respect
et ma reconnaissance.

Amrane Hocine

Dédicace

À celle qui a été le souffle de ma réussite,
ma mère, pour ses prières, son amour infini et ses sacrifices
silencieux.

À mon père, exemple de sagesse et de persévérance,
pour sa confiance, ses encouragements et son soutien constant.

À mes frères et sœurs, merci pour votre affection, vos mots motivants
et votre présence rassurante.

À mon épouse bien-aimée, pour sa patience, sa compréhension, son
amour indéfectible et son soutien dans les moments les plus
exigeants.

À mes enfants chéris, sources de joie et de motivation, que ce travail
soit un exemple de persévérance à vos yeux.

À tous ceux et celles qui ont cru en moi,
amis(es), enseignants(es) et camarades,
je vous dédie ce travail avec gratitude et reconnaissance.

Torchi Samir

Dédicace

À ceux qui m'ont appris que chaque réussite est le fruit de la
foi, de l'effort et de la patience...

À mes chers parents,
Sources de lumière dans mes moments d'ombre,
Je vous dédie ce travail en témoignage d'amour et de gratitude
éternelle.

À mes frères et sœurs,
Pour leur bienveillance et leurs encouragements sincères.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont semé en moi une
étincelle de motivation,

Enseignants, amis et camarades,
cette dédicace vous revient de droit.

Zelbah Nidal

Remerciement

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, Mme **S.HADEF**, pour ses orientations précieuses, sa disponibilité, sa rigueur scientifique et ses conseils avisés tout au long de la réalisation de ce projet.

Je remercie également les membres du jury, **M.R.BOUHANECHÉ. M. K. HIMOUR**, pour l'intérêt porté à ce travail et leurs remarques enrichissantes.

Ma reconnaissance va aussi à tous les enseignants du département de Génie Mécanique et Électromécanique pour la qualité de la formation qu'ils nous ont dispensée.

Je n'oublie pas mes camarades de promotion, pour leur camaraderie, leur aide et les échanges constructifs que nous avons eus.

Enfin, un grand merci à ma famille, pour leur patience, leur encouragement et leur confiance, sans qui ce mémoire n'aurait pas vu le jour.

Sommaire

Introduction générale	1
 <i>Chapitre I : Généralités sur les convertisseurs DC-DC et DC-AC</i>	
I.1 Introduction	4
I.2 Les hacheurs	5
I.2.1 Hacheurs séries	5
I. 2.1.1 Définition	5
I.2 .1.2 Principe de fonctionnement.....	5
I.2.1.3 Quadrants de fonctionnement	6
I.2.2 Hacheurs parallèles	7
I.2.2.1 Définition	7
I.2.2.2 Principe de fonctionnement.....	7
I.2.2.3 Quadrant de fonctionnement	8
I.2.3 Les hacheurs réversibles en courant	9
I.2.3.1 Définition	9
I.2.3.2 Principe de fonctionnement.....	9
I.2.3.3 Quadrant de fonctionnement	10
I.2.4 Les hacheurs réversibles en tension.....	11
I.2.4.1 Définition.....	11
I.2.4.2 Principe de fonctionnement.....	11
I.2.4.3 Quadrant de fonctionnement	12
I.2.5 Les hacheurs réversibles en tension et courant.....	12
I.2.5.1 Définition.....	12
I.2.5.2 Principe de fonctionnement.....	13
I.2.5.3 Quadrant de fonctionnement	14
I.3 Les onduleurs	16
I.3.1 Définition.....	16

I.3.2 Les types de commande des onduleurs.....	16
I.3.2.1 Commande symétrique	16
I.3.2.2 Commande décalée	17
I.3.2.3 Commande MLI.....	17
I.3 Conclusion.....	21
 <i>Chapitre II : Simulation des convertisseurs DC-DC et DC-AC sous MATLAB</i>	
II.1 Introduction.....	23
II.1.2 Simulation du hacheur série	24
II.1.2.2 Description des éléments du schéma.....	24
II.1.2.3 Les ondes de tension et courant.....	24
II.1.3 Simulation du hacheur parallèle	26
II.1.3.2 Les ondes de tension et courant.....	26
II.1.4 Simulation du hacheur Réversible en tension	27
II.1.4.1 Fonctionnement	27
II.1.4.2 Les ondes de tension et courant de la charge	28
II.1.5 Simulation du hacheur réversible en courant	29
II.1.5.1 Fonctionnement simplifié.....	29
II.1.5.2 Les ondes de tension et courant de charge	30
II.1.6 Simulation du hacheur réversible en courant et en tension	30
II.1.6.1 Fonctionnement simplifié.....	31
II.1.6.2 Les ondes de tension et courant de charge	31
II.2 Simulation des onduleurs.....	32
II.2.1 Simulation d'une commande symétrique d'onduleur.....	32
II.2.1.1 Fonctionnement	33
II.2.1.2 Les ondes de tension et courant de charge	33
II.2.2 Simulation de la commande décalée d'onduleur.....	34
II.2.2.1 Fonctionnement	35
II.2.2.2 Les ondes de tension et courant de charge	35
II.2.2.1 Composants principaux du schéma	36

II.2.2.2 Fonctionnement	37
II.2.2.3 Les ondes de tension référence et porteuse et charge.....	37
II.2.4 Simulation d'une commande MLI d'onduleur triphasé.....	39
II.2.4.1 Les ondes de courant et tension de charge	39
II.2.4.2 Interprétation	40
II.3 Conclusion	40

Chapitre III : Simulation sous PROTEUS et réalisation d'un onduleur monophasé

III.1 Introduction	42
III.2 Composantes utilisées	43
III.2.1 Carte Arduino	43
III.2.1.1 Pourquoi Arduino UNO ?	43
III.2.1.2 La constitution de la carte Arduino Uno.....	44
III.2.1.3 Les composantes de la carte Arduino sont.....	45
III.2.1.4 L'environnement de la programmation.....	45
III.2.2 Driver IR2110.....	46
III.2.3 Bloc de puissance	46
III.2.3.1 Interrupteur statique (à semi-conducteur)	46
III.2.4 Autres accessoires.....	47
III.3 Simulation par logiciel Proteus	47
III.3.1 Onduleur en demi-pont.....	47
III.3.1.1 Explication du schéma	48
III.3.1.2. Téléversement du Code dans la Carte Arduino sous Proteus	48
III.3.1.4 Résultats de la Simulation et Analyse des Courbes	49
III.3.2 Onduleur en pont à 4 transistors a commandé décalée.....	50
III.3.2.1 Petite explication de code	51
III.3.2.2. Résultats de la Simulation et Analyse des Courbes	51
III.3.3 Onduleur en pont à 4 transistors a commandé Symétrique	53
III.3.3.1 Les ondes de courant et tension de charge RL.....	53

III.3.3.2 Interprétation des résultats	54
III.3.4 Commande d'un hacheur série monophasé par Arduino	55
III.3.4.1 Les ondes de courant et tension de charge RL.....	55
III.3.5 Commande d'un hacheur réversible en tension par Arduino.....	56
III.4.1 Interprétation des résultats	59
III.4 Conclusion.....	61
Conclusion générale	63
Bibliographie	64

Liste des Abréviations

AC : Courant alternatif

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

GTO : Gate Turn-Off Thyristor

PWM : Pulse Width Modulation

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions

SPWM : Sinusoidal Pulse Width Modulation

SVPWM : Space Vector Pulse Width Modulation

MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

IR2110 : Circuit intégré de commande pour MOSFET ou IGBT

IRF540 : Transistor MOSFET utilisé pour les applications de puissance

R : Résistance

L : Inductance

RL : Charge composée d'une résistance et d'une inductance

Vs : Tension source

Vdc : Tension continue d'entrée

Vac : Tension alternative de sortie

D : Rapport cyclique

f : Fréquence de commutation

T : Période du signal

Vref : Tension de référence

HIN / LIN : High-side Input / Low-side Input

HO / LO : High-side Output / Low-side Output

Arduino : Carte de commande pour signaux PWM

Proteus : Logiciel de simulation électronique

CH1, CH2 : Canaux de l'oscilloscope pour visualiser les signaux

Liste des Figures

Figure. I.1 : Rôle des convertisseurs électronique	4
Figure. I.2 : Schéma d'un hacheur série	5
Figure. I.3 : Formes d'ondes des grandeurs d'un hacheur série [3].....	6
Figure. I.4 : Quadrants de fonctionnement d'un hacheur série.....	6
Figure. I.5 : Schéma de principe du hacheur parallèle	7
Figure. I.6 : Formes d'ondes des grandeurs d'un Hacheur parallèle [4].....	8
Figure. I.7 : Hacheur réversible en courant	9
Figure. I.8 : Principe de fonctionnement d'un hacheur réversible en courant.....	9
Figure. I.9 : Quadrants de fonctionnement d'un hacheur réversible en courant.....	10
Figure. I.10 : Courbe fonctionnement en quadrant 1.....	10
Figure. I.11 : Courbe fonctionnement en quadrant 2.....	11
Figure. I.12 : Hacheur réversible en tension	11
Figure. I.13 : Formes d'ondes d'un hacheur réversible en tension	12
Figure. I.14 : Quadrants de fonctionnement d'un hacheur réversible en tension	12
Figure. I.15 : Hacheur réversible en tension et courant	13
Figure. I.16 : Chronogramme hacheur 4 quadrants.	14
Figure. I.17 : Quadrants de fonctionnement hacheur réversible en tension et courant.....	14
Figure. I.18 : Stratégie de commande des onduleurs	16
Figure. I.19 : Exemple sur les signaux de tension de sortie pour une commande décalée	17
Figure. I.20 : Réalisation du signal MLI [12].	17
Figure. I.21 : MLI d'une simple impulsion [13].	18
Figure. I.22 : La modulation de largeur d'impulsions multiples [13].....	19
Figure. I.23 : MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire [14].	19
Figure. I.24 : La modulation sinusoïdale modifiée	20
Figure. I.25 : La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle [15].	20
Figure. II.1 : Logo de Matlab	23
Figure. II.2 : Schéma sur Simulink de hacheur série.....	24
Figure. II.3 : Les ondes de tension et courant d'un hacheur série	25
Figure. II.4 : Schéma sur Simulink de hacheur parallèle.....	26
Figure. II.5 : Courbe de tension et courant de la charge d'un hacheur parallèle	26
Figure. II.6 : Schéma sur Simulink de hacheur réversible en tension	27
Figure. II.7 : La courbe de tension et courant de charge d'un hacheur réversible en tension.	28
Figure. II.8 : Schéma sur Simulink de hacheur réversible en courant	29

Figure. II.9 : Courbe de tension et courant de la charge d'un hacheur réversible en courant.	30
Figure. II.10 : Schéma sur Simulink de hacheur réversible en courant et tension.....	31
Figure. II.11 : Ondes de tension et courant de charge d'un hacheur R en tension et courant .	31
Figure. II.12: Schéma sur Simulink d'une commande symétrique d'onduleur monophasé....	33
Figure. II.13: Onde de tension et courant de La commande symétrique	33
Figure. II.14: Schéma sur Simulink d'une commande décalée d'onduleur monophasé.....	35
Figure. II.15: Ondes de tension et courant de charge pour $\alpha = 45^\circ$	35
Figure. II.16: Ondes de tension et courant de charge pour $\alpha = 90^\circ$	36
Figure. II.17 : Schéma sur Simulink d'une commande MLI d'onduleur monophasé	36
Figure. II.18 : Les ondes de tension de porteuse et référence et charge en fonction de tempe.	38
Figure. II.19 : Schéma sur Simulink d'une commande MLI d'onduleur triphasé.....	39
Figure. II.20 : Les ondes de courant et tension de charge	39
Figure. III.1 : Proteus Professional.....	42
Figure. III.2 : Carte Arduino UNO.....	43
Figure. III.3 : Constitution de la carte Arduino UNO	45
Figure. III.4 : Façons de communiquer avec Arduino	46
Figure. III.5 : Driver IR2110 sur Isis proteus.....	46
Figure. III.6 : Transistor de type IGBT	47
Figure.III.7 : Montage de l'Onduleur Monophasé (Simulation ISIS).....	48
Figure. III.8 : Téléversement du code Arduino dans Proteus ISIS.....	49
Figure. III.9 : Courbe de tension et courant de charge RL	50
Figure. III.10 : La commande décalée d'un Onduleur en pont à 4 transistors	51
Figure. III.11 : Tension de charge d'un onduleur monophasé en pont complet.....	52
Figure. III.12 : Courant de charge d'un onduleur monophasé en pont complet.....	52
Figure. III.13 : Onde de tension de charge RL a commandé symétrique	53
Figure. III.14 : Onde de courant de charge RL par la commande symétrique	54
Figure. III.15 : Commande d'un hacheur série monophasé par Arduino	55
Figure. III.16 : Les ondes de courant et tension de charge RL d'un hacheur série	56
Figure. III.17 : Les ondes de tension et courant de charge avec $L = 10\text{mh}$	57
Figure. III.18 : Les ondes de tension et courant de charge avec $L = 100\text{mh}$	58
Figure. III.19 : Poste expérimental de commande d'un convertisseur avec Arduino UNO" ..	59
Figure. III.20 : Signal continue d'entrée	60
Figure. III.21 : Signal de commande	60

Liste des Tableaux

Tableau. I.1 : Les avantages de la MLI	21
Tableau. III.1 : les avantages de carte arduino UNO	44
Tableau. III.2 : Autres accessoires utilisés	47

Résumé :

Ce travail présente un dispositif expérimental « hacheur-onduleur » que on peut l'utiliser pour une grande partie de travaux pratiques d'électronique de puissance. Il est composé d'un étage de puissance et d'une carte de commande basée sur un ARDINO. Selon la configuration choisie par l'utilisateur, cet ensemble peut constituer un convertisseur parmi une liste préétablie allant du simple hacheur série non réversible jusqu'à l'onduleur triphasé à modulation de largeur d'impulsion.

Mots clés : Hacheur, Onduleur, MLI, IGBT, commande, puissance, modulation.

Abstract:

This work presents an experimental device called a “chopper-inverter” which can be used for a wide range of power electronics lab experiments. It consists of a power stage and a control board based on an Arduino. Depending on the configuration selected by the user, the setup can act as a converter selected from a predefined list, ranging from a simple non-reversible series chopper to a three-phase inverter with pulse-width modulation.

Keywords: Chopper, Inverter, PWM, IGBT, Control, Power, Modulation.

ملخص

يعرض هذا العمل جهازا تجريبيا يعرف بالمحول العاكس يمكن استخدامه في جزء كبير من الأعمال التطبيقية المتعلقة بالإلكترونيات القدرة يتكون هذا الجهاز من مرحلة قدرة وبطاقة تحكم تعتمد على لوحة أردوينو حسب التهيئة التي يختارها المستخدم، يمكن أن يشكل هذا النظام محوّلًا من بين قائمة مُعدّة مسبقًا تتراوح من محوّل بسيط من النوع التسلسلي غير القابل للعكس إلى عاكس ثلاثي الطور مزوّد بتقنية تعديل عرض النبضة.

الكلمات المفتاحية: محوّل، عاكس، تعديل عرض النبضة، الترانزستور ثنائي القطب ذو البوابة المعزولة، تحكم، قدرة، تضمين.

Introduction générale

Introduction générale

L'électronique de puissance est une subdivision de l'électronique axée sur la transformation, le pilotage et la régulation de l'énergie électrique via des composants semi-conducteurs. Elle est essentielle dans divers secteurs tels que les systèmes de transport, les énergies vertes, les applications industrielles et les réseaux de distribution électrique.

Elle se penche sur les dispositifs qui effectuent la conversion et le contrôle de l'énergie. Ces appareils, connus sous le nom de convertisseurs statiques, facilitent le passage de l'énergie électrique entre un générateur et un récepteur, généralement de nature distincte.

Leur fonction implique l'ajustement de la source d'énergie en fonction des besoins de la charge. Ainsi, il leur faut ajuster les propriétés des grandeurs transmises (tension, fréquence...), voire transformer la nature même de l'énergie (continue, alternative...).

Les dispositifs de transformation d'énergie électrique sont d'une importance capitale dans les infrastructures contemporaines. Ils fournissent des solutions pour la gestion de l'énergie dans diverses applications, comme les énergies renouvelables, les voitures électriques et les appareils électroniques. Les hacheurs et les onduleurs se démarquent parmi ces dispositifs par leur aptitude à transformer et ajuster l'énergie en fonction de critères spécifiques.

Les convertisseurs statiques se composent principalement de deux sortes d'éléments : Les éléments passifs (condensateurs et inductances) qui s'occupent du stockage de l'énergie et du filtrage des ondes de tension et de courant.

Les éléments semi-conducteurs, qui agissent comme des interrupteurs et dont la gestion autorise la régulation du transfert de puissance entre le générateur et l'utilisateur.

Les appareils de transformation d'énergie, comme les hacheurs et les onduleurs, ont un rôle crucial à jouer. Ces dispositifs offrent la possibilité de moduler les niveaux de tension et de courant afin de satisfaire les exigences particulières des applications contemporaines, qui vont des systèmes solaires aux voitures électriques, sans oublier l'alimentation des moteurs industriels. Avec la progression vers des systèmes plus écologiques et interconnectés, leur importance continue de croître.

Cet objectif c'est étude, commande et réalisation d'ensembles expérimentale hacheur onduleur.

La présentation du mémoire est organisée en trois sections, avec la répartition suivante :

- Dans un premier temps, le **Chapitre I** est consacré aux **généralités sur les convertisseurs DC-DC et DC-AC**, où nous présentons les principes de fonctionnement ainsi que les différentes topologies de ces convertisseurs.
- Ensuite, dans le **Chapitre II**, nous réalisons **des simulations des convertisseurs DC-DC et DC-AC sous l'environnement MATLAB**, afin d'analyser leurs comportements et valider les modèles théoriques.
- Enfin, dans le **Chapitre III**, nous abordons **la simulation sous PROTEUS ainsi que La réalisation pratique d'un onduleur monophasé**, ce qui nous permet de passer de la théorie à la pratique et de tester le fonctionnement réel du système.

Chapitre I :
Généralités sur les
convertisseurs DC-DC et
DC-AC

I.1 Introduction :

Les systèmes de conversion de puissance jouent un rôle essentiel dans la gestion et l'utilisation efficace de l'énergie électrique dans divers secteurs.

Ces dispositifs, comprenant les convertisseurs et les onduleurs, facilitent la conversion de l'énergie électrique d'une forme à une autre selon les exigences particulières des applications. Ils se trouvent au centre des technologies contemporaines, en particulier dans les domaines des énergies vertes, de la mobilité électrique et des systèmes industriels.

La croissance continue et sans relâche des demandes en électricité contribuent à l'expansion de l'électronique de puissance, également connue sous le nom d'électronique de conversion d'énergie. Les systèmes de conversion offrent un contrôle sur le transfert d'énergie.

Électrique, accessible en une nature spécifique ou en une autre, pour des applications potentielles telles que l'utilisation par des actionneurs électriques. Ces dispositifs font appel à des commutateurs de puissance basés sur les semi-conducteurs, qui modifient le signal électrique d'entrée par une série d'états ouverts ou fermés, la transition d'un état à l'autre représentant la commutation. Ces appareils de transformation, connus sous le nom de convertisseurs statiques, doivent avoir des rendements de conversion presque à 100%, ce qui nécessite une minimisation des pertes par rapport à l'énergie transformée. Ces semi-conducteurs génèrent des pertes.

Ce chapitre offre un aperçu des systèmes d'hacheur et d'onduleur, en soulignant leurs principes de base, leurs dispositifs technologiques et leurs usages contemporains. Ces appareils sont cruciaux dans les secteurs des énergies renouvelables et des systèmes hybrides, où la gestion et la transformation de l'énergie sont primordiales pour optimiser l'efficacité énergétique et garantir une incorporation sûre dans les réseaux électriques.

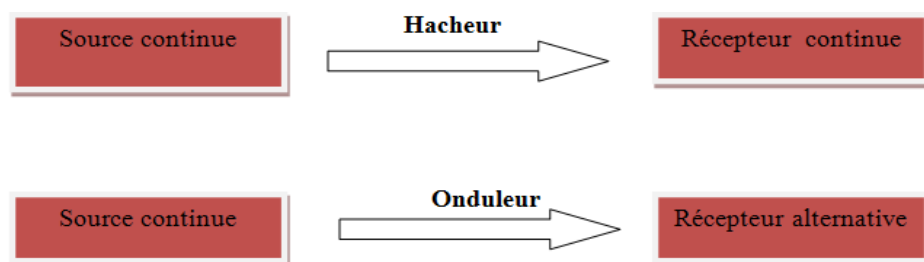


Figure. I.1 : Rôle des convertisseurs électroniques.

I.2 Les hacheurs :

I.2.1 Hacheurs séries :

I.2.1.1 Définition :

Un hacheur série est un dispositif électronique utilisé pour convertir une tension continue en une autre tension continue de valeur différente en interrompant périodiquement le courant.

[1][2]

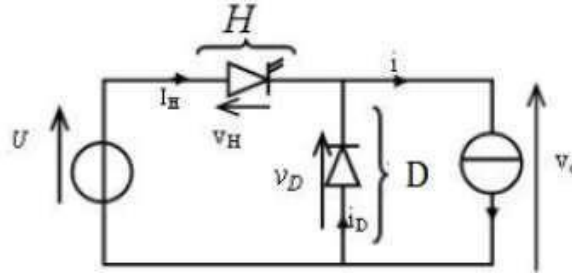


Figure. I.2 : Schéma d'un hacheur série

On définit le rapport cyclique α : la proportion du temps de fermeture de l'interrupteur H par rapport à la période T du hacheur : $\alpha = T_{on} / T$

I.2.1.2 Principe de fonctionnement :

Le schéma représente un convertisseur de type hacheur abaisseur utilisé pour réduire la tension d'entrée U vers une tension de sortie V_c .

Composition du circuit :

- H : Un interrupteur (typiquement un transistor ou un thyristor)
- D : Une diode
- Une inductance et un condensateur (non explicitement visibles mais supposés être présents dans un hacheur Boos)
- Deux sources : U (tensions d'entrée) et v_c (tension de sortie).

Fonctionnement en deux phases :

Phase 1 : Fermeture de H (conduction du transistor) :

- Le transistor H est fermé (conducteur).
- La diode D est bloquée (aucun courant ne passe à travers elle).

- La charge reçoit uniquement l'énergie stockée dans le condensateur.

Phase 2 : Ouverture de H (blocage du transistor) :

- Le transistor H est ouvert (non conducteur).
- L'inductance libère son énergie, ce qui augmente la tension appliquée à la diode D.
- La diode D devient passante et la charge avec une tension U_s plus grande que U

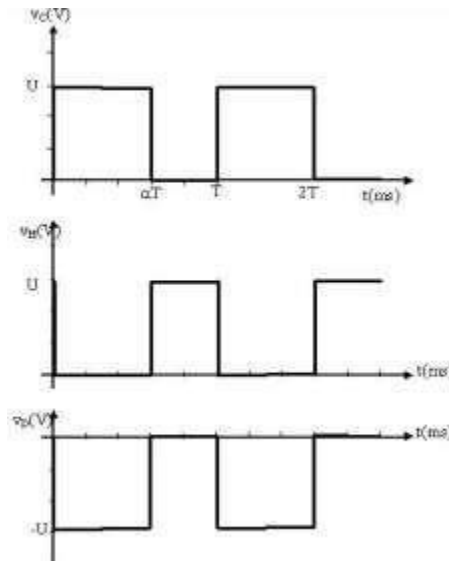


Figure. I.3 : Formes d'ondes des grandeurs d'un hacheur série [3].

I.2.1.3 Quadrants de fonctionnement :

Un quadrant de fonctionnement est une représentation graphique qui montre les différentes combinaisons possibles de la tension (u) et du courant (i) dans un circuit électrique. Cela nous aide à comprendre comment l'énergie circule dans le système.

Ce genre de hacheur permet de gérer la vitesse d'un moteur en modifiant la tension moyenne qui lui est appliquée. Il autorise uniquement un sens de rotation et ne propose pas de freinage par récupération d'énergie.

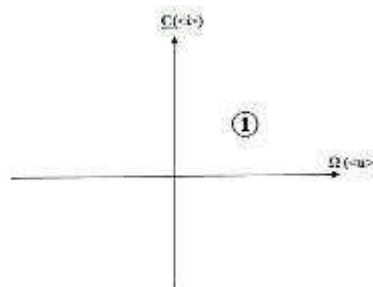


Figure. I.4 : Quadrants de fonctionnement d'un hacheur série.

- Quadrant 1 : Le courant (i) et la tension (u) sont tous les deux positifs. Cela signifie que l'énergie est transférée de la source vers le moteur, ce qui le fait tourner dans un Sens.
- Pas de Quadrant 2, 3 ou 4 : Ce hacheur ne peut pas fonctionner avec un courant ou une tension négative. Il ne peut donc pas inverser le sens de rotation.

I.2.2 Hacheurs parallèles :

I.2.2.1 Définition : Un convertisseur statique de type hacheur parallèle est employé dans les systèmes à courant continu (DC) pour contrôler la tension et le courant fournis à une charge.

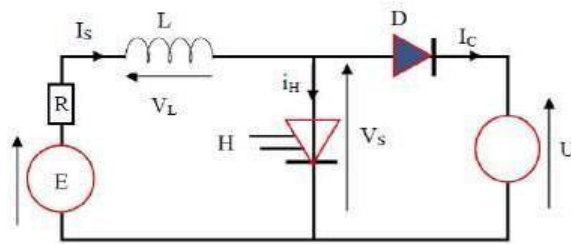


Figure. I.5 : Schéma de principe du hacheur parallèle.

I.2.2.2 Principe de fonctionnement :

- Lorsque l'interrupteur est fermé, une partie du courant est déviée à travers lui, ce qui réduit la tension appliquée à la charge.
- Lorsque l'interrupteur est ouvert, le courant circule normalement à travers la charge, augmentant ainsi la tension appliquée.

Le hacheur parallèle fonctionne en deux modes principaux en fonction de l'état de l'interrupteur T :

$0 < t < \alpha T$: H est fermé, D est bloqué :

- Le courant I circule principalement à travers T, ce qui court-circuite partiellement la charge.
- La tension aux bornes de la charge U diminue.
- Le courant dans la diode D est nul.

$$\begin{aligned} i_s &= i_H \\ i_c &= 0 \\ v_D &= -U \end{aligned} \tag{I.1}$$

$\alpha T < t < T$: H est ouvert, D est passante :

- Le courant ne peut plus passer par H, il est forcé de passer par la diode D.
- La charge reçoit alors toute la tension d'entrée $\underline{U}_e$
- La tension aux bornes de la charge augmente.

$$\begin{aligned} v_D &= 0 \\ v_H &= U \\ i_C &= i_S \end{aligned} \quad (\text{I.2})$$

- Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :

$$V_C = (1 - \alpha)E \quad (\text{I.3})$$

Forme d'ondes des grandeurs d'un Hacheur parallèle :

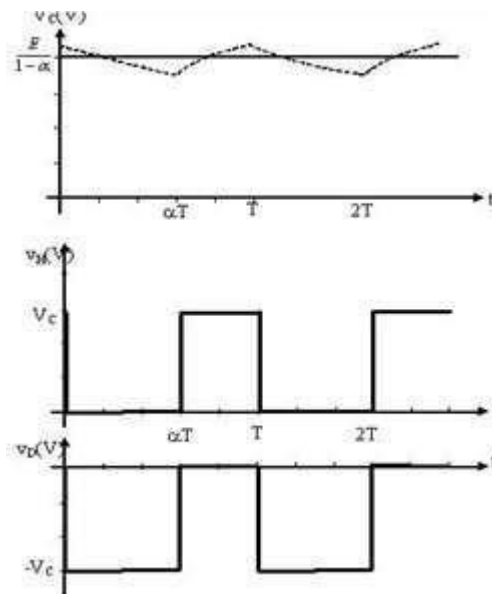


Figure. I.6 : Formes d'ondes des grandeurs d'un Hacheur parallèle [4].

I.2.2.3 Quadrants de fonctionnement :

Ce type de hacheur est utilisé pour augmenter la tension continue. Il fonctionne en stockant de l'énergie dans une inductance pendant une partie du cycle et en la libérant ensuite à une tension plus élevée.

Quadrant 1 : Le courant (i) et la tension (U) présentent tous deux des valeurs positives. Ceci implique que l'énergie est acheminée de la source vers la charge, mais à un niveau de tension supérieur.

Absence des Quadrants 2, 3 ou 4 : Un hacheur parallèle standard ne peut pas opérer avec un courant ou une tension négative. Il n'est donc pas en mesure de changer la direction du courant ou de la tension.

I.2.3 Les hacheurs réversibles en courant :

I.2.3.1 Définition :

Les hacheurs réversibles en courant sont des dispositifs de conversion de puissance statique qui offrent la possibilité de gérer le flux de courant dans les deux directions entre une source d'alimentation à tension continue et une charge. Ils sont employés dans des applications où il est indispensable de pouvoir faire renverser la direction du courant [5].

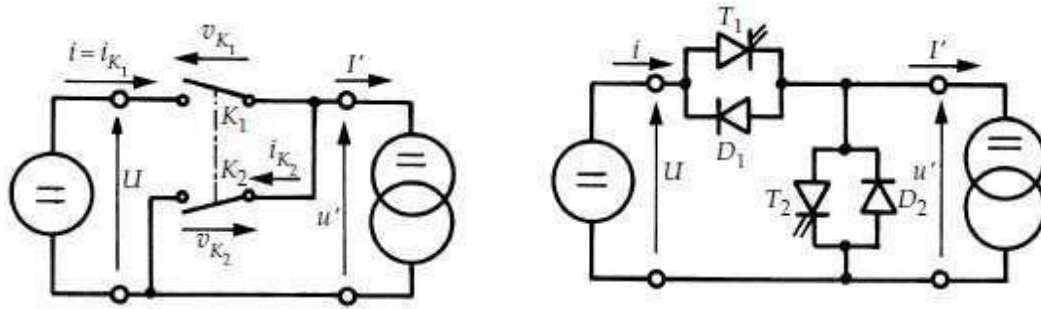


Figure. I.7 : Hacheur réversible en courant.

I.2.3.2 Principe de fonctionnement :

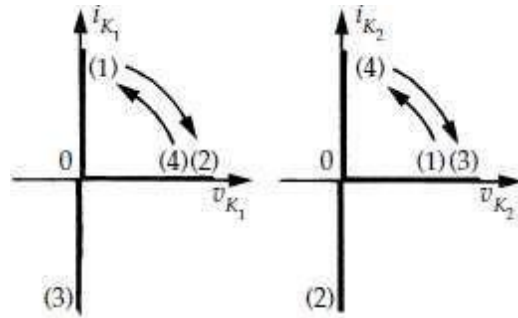


Figure. I.8 : Principe de fonctionnement d'un hacheur réversible en courant.

Pour $\langle I \rangle$ positif, il fonctionne en hacheur série ; le courant $\langle I \rangle$ passant tantôt par T1, tantôt par D2. Si α_1 est la durée relative de la fermeture de T1 pendant chaque période $\langle U \rangle$ a pour valeur moyenne :

$$\langle U \rangle = \alpha_1 U \quad (I.4)$$

Pour le mode négatif, il opère en utilisant un hacheur parallèle : le courant $\langle I \rangle$ traverse alternativement T2 et D1. Si α_2 représente la durée proportionnelle des intervalles de fermeture de T2, $\langle U \rangle$ a une valeur moyenne de :

$$\langle U \rangle = (1 - \alpha_2) U \quad (I.5)$$

I.2.3.3 Quadrants de fonctionnement :

Ce genre de hacheur est plus sophistiqué. Ce dispositif permet de gérer la vitesse du moteur, de modifier son orientation de rotation et d'effectuer un freinage grâce à la récupération d'énergie.

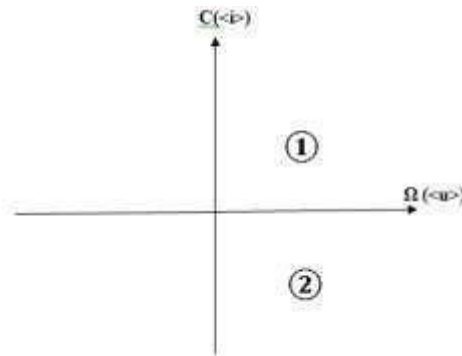


Figure. I.9 : Quadrant de fonctionnement d'un hacheur réversible en courant.

Quadrant 1 : Comme pour le hacheur série, le courant i_{ch} et la tension U_{ch} sont tous les deux positifs. L'énergie est transférée de la source vers le moteur, ce qui le fait tourner dans un sens.

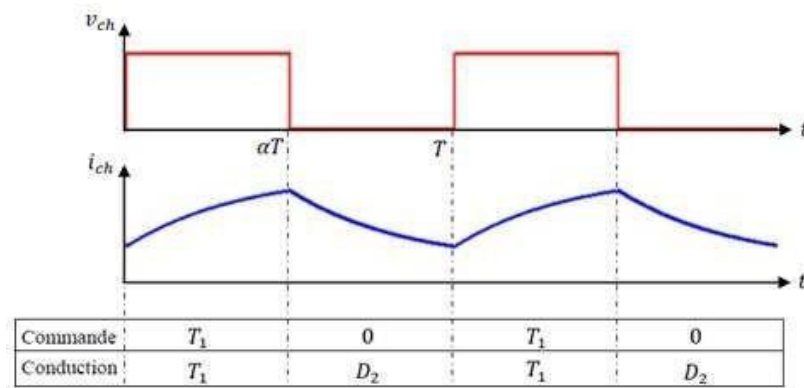


Figure. I.10 : Courbe fonctionnement en quadrant 1.

Quadrant 2 : Le courant i_{ch} est négatif, mais la tension U_{ch} reste positive. Cela signifie que l'énergie est renvoyée du moteur vers la source. C'est le principe du freinage par récupération d'énergie [7].

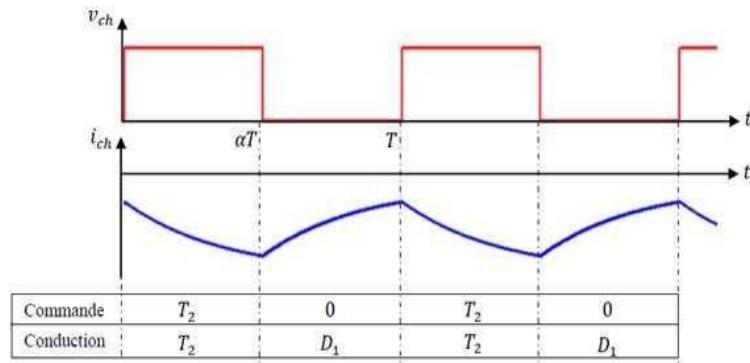


Figure. I.11 : Courbe fonctionnement en quadrant 2.

I.2.4 Les hacheurs réversibles en tension :

I.2.4.1 Définition : Les hacheurs réversibles en tension sont des dispositifs de conversion statique dans le domaine de l'électronique de puissance qui permettent la réversion de la polarité du voltage à la charge.

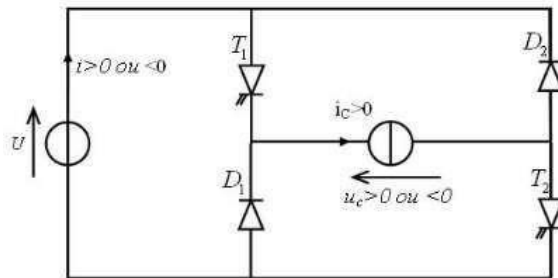


Figure. I.12 : Hacheur réversible en tension.

I.2.4.2 Principe de fonctionnement :

Le hacheur fonctionne en ouvrant et en fermant les transistors T1 et T4 de manière contrôlée. Cela permet de modifier la tension moyenne appliquée au moteur et donc de contrôler sa vitesse.

- $[0 ; \alpha T]$: T1 et T4 passants, D2 et D3 bloquées : les transistors T1 et T4 sont en mode passant (fermés), ce qui autorise le flux de courant de la source V vers le moteur M.
- $[\alpha T ; T]$: T1 et T4 bloqués, D2 et D3 passantes : Les transistors T1 et T4 sont en état de blocage (ouverts). L'énergie stockée dans l'inductance L est alors libérée à travers les diodes D2 et D3, permettant au courant de continuer à circuler dans le moteur.

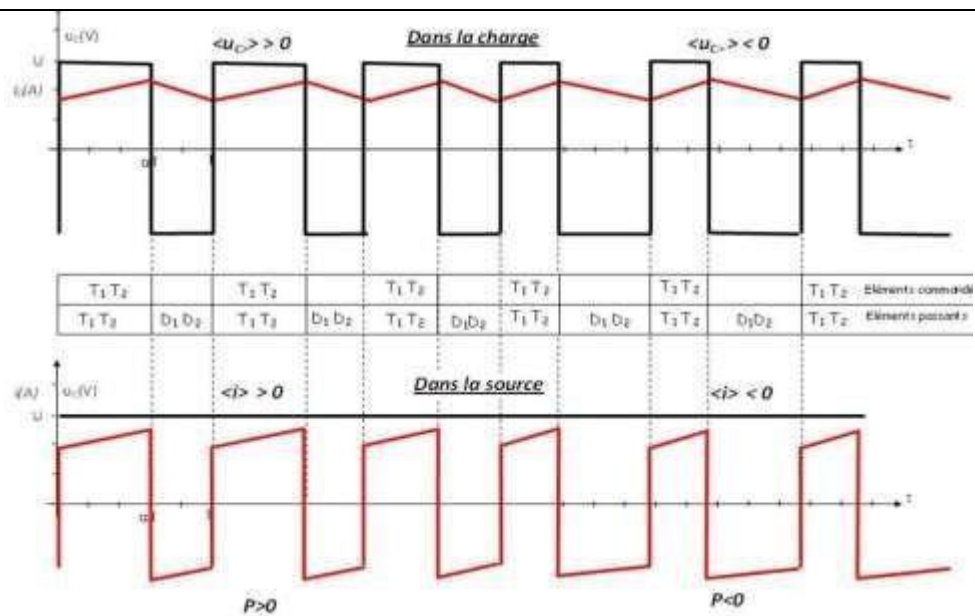


Figure. I.13 : Forme d'ondes d'un hacheur réversible en tension.

I.2.4.3 Quadrants de fonctionnement :

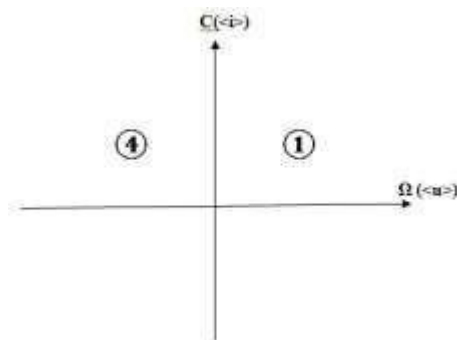


Figure. I. 14 : Quadrants de fonctionnement d'un hacheur réversible en tension.

I.2.5 Les hacheurs réversibles en tension et courant :

I.2.5.1 Définition : Un hacheur réversible en tension et en courant est un convertisseur statique qui permet de contrôler la puissance fournie à une charge.

- Réversibilité en tension : Il a la capacité de fonctionner avec une polarité inversée, Signifiant qu'il peut modifier la polarité aux bornes de la charge.
- Réversibilité en courant : Il permet également d'inverser le sens du courant, ce qui autorise un fonctionnement dans les quatre quadrants.

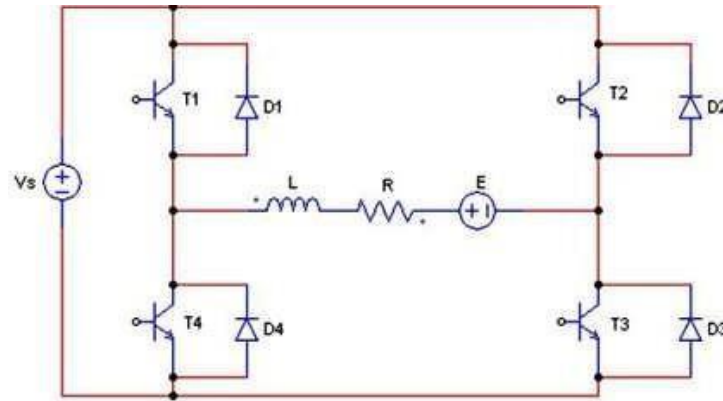


Figure. I.15 : Hacheur réversible en tension et courant.

I.2.5.2 Principe de fonctionnement :

- Quadrant 1 (T1 et T4 activés) : Le courant circule de Vs à travers L, R et E, puis revient par T4. La tension et le courant sont positifs.
- Quadrant 2 (T2 et T3 activés) : Le courant circule de E à travers R et L, puis revient à Vs par T2. La tension est négative, mais le courant est toujours positif.
- Quadrant 3 (T2 et T3 activés) : Le courant circule de Vs à travers L, R et E, mais dans la direction opposée à celle du quadrant 1. La tension et le courant sont négatifs.
- Quadrant 4 (T1 et T4 activés) : Le courant circule de E à travers R et L, mais dans la direction opposée à celle du quadrant 2. La tension est positive, mais le courant est négatif.

Le graphe de la figure I.15 représente le fonctionnement d'un hacheur à quatre quadrants :

Quadrant I : La tension ainsi que le courant sont tous deux positifs. Le hacheur livre de l'énergie à la charge.

Quadrant IV : Le courant est négatif, tandis que la tension demeure positive. Le hacheur capte de l'énergie à partir de la charge.

Quadrant III : Le courant et la tension sont tous deux négatifs. Le hacheur fournit de l'énergie à la charge, mais inversement.

Quadrant II : Le courant est positif tandis que la tension est négative. Le hacheur capte de l'énergie à partir de la charge, mais dans le sens inverse.

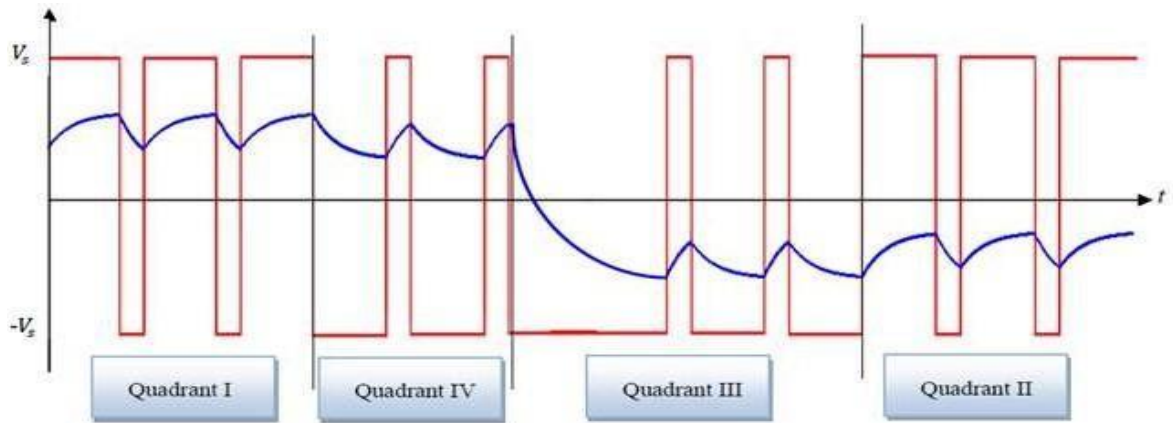


Figure. I.16 : Chronogramme hacheur 4 quadrants.

I.2.5.3 Quadrants de fonctionnement :

Le fonctionnement des machines électriques, en particulier les moteurs, est analysé en fonction de la vitesse Ω et du couple C . Pour cela, on utilise le diagramme de fonctionnement en quatre quadrants, qui illustre les différentes conditions de fonctionnement du moteur, que ce soit en mode moteur (accélération) ou en mode générateur (freinage et récupération d'énergie), et dans les deux sens de rotation.

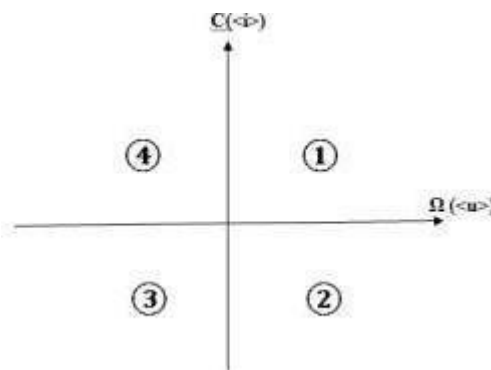


Figure. I. 17 : Quadrants de fonctionnement hacheur réversible en tension et courant.

Quadrant ① : Moteur en marche avant

- $\Omega > 0$ (rotation dans le sens direct).
- $C > 0$ (couple moteur dans le même sens que la vitesse)

La machine fonctionne grâce à un moteur qui lui donne un sens de rotation, c'est la phase d'accélération où l'intensité augmente.

Quadrant ② : Freinage en marche avant (mode génératrice)

- $\Omega > 0$ (rotation dans le sens direct).
- $C < 0$ (couple opposé à la vitesse).

La machine opère en mode générateur lors d'un sens de rotation et est actuellement en phase de freinage.

Quadrant ③ : Moteur en marche arrière

- $\Omega < 0$ (rotation en sens inverse).
- $C < 0$ (couple moteur dans le même sens que la vitesse)

La machine fonctionne en moteur dans le sens de rotation inverse du quadrant 1, la machine est en phase d'accélération.

Quadrant ④ : Freinage en marche arrière (mode génératrice)

- $\Omega < 0$ (rotation en sens inverse).
- $C > 0$ (couple opposé à la vitesse).

La machine opère en mode générateur lorsqu'il tourne dans le sens inverse du quadrant 1. Dans ce contexte, l'appareil est en phase de freinage.

I.3 Les onduleurs :

I.3.1 Définition : Un onduleur est un dispositif électronique qui convertit le courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Il est utilisé pour alimenter des appareils électriques à partir de sources d'énergie comme des batteries ou des panneaux solaires, en transformant le courant continu en courant alternatif compatible avec la plupart des appareils.

I.3.2 Les types de commande des onduleurs :

Il existe plusieurs façons de contrôler un onduleur, et le choix dépend de l'utilisation que l'on souhaite en faire. Voici quelques-uns des types de commande les plus courants, Ces stratégies de commande peuvent être regroupées par le diagramme suivant :

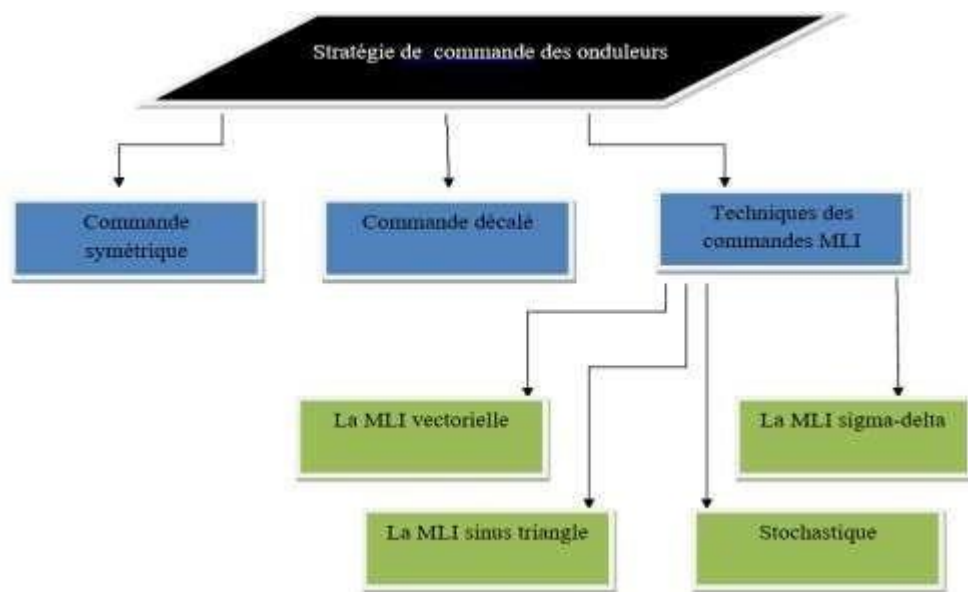


Figure. I.18 : Stratégie de commande des onduleurs.

I.3.2.1 Commande symétrique :

La commande symétrique est une méthode de gestion des interrupteurs (transistors) à l'intérieur de l'onduleur. Ces commutateurs se déclenchent et se coupent très vite pour produire le courant alternatif.

- Onduleur en pont complet : C'est le type d'onduleur le plus courant. Il a quatre interrupteurs.
- Commande symétrique : Pour générer une tension alternative symétrique, on contrôle les interrupteurs par paires. Par exemple, les commutateurs 1 et 4 s'activent et se désactivent conjointement, puis les commutateurs 2 et 3 reproduisent cette action..
- Fréquence : La vitesse à laquelle les interrupteurs s'ouvrent et se ferment détermine la fréquence du courant alternatif (par exemple, 50 Hz ou 60 Hz).

I.3.2.2 Commande décalée :

Est une technique de commande des onduleurs, notamment dans les systèmes monophasés, où les signaux de commande des interrupteurs sont déphasés les uns par rapport aux autres. Cela permet de modifier la forme de l'onde de tension de sortie, souvent pour s'approcher d'une sinusoïde et améliorer la qualité de l'alimentation

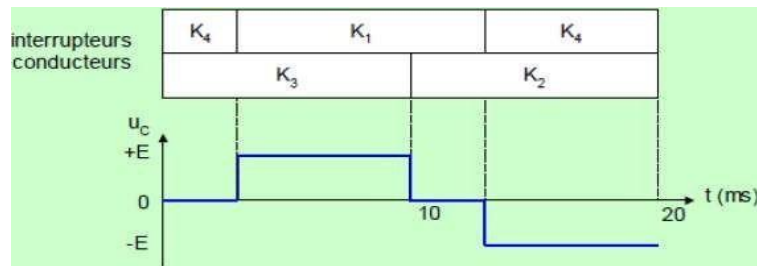


Figure. I.19 : Exemple sur les signaux de tension de sortie pour une commande décalée.

I.3.2.3 Commande MLI :

I.3.2.3.1 Définition : fait référence à la Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM en anglais). C'est une technique utilisée pour synthétiser des signaux pseudo-analogiques avec des circuits numériques (tout ou rien) ou des états discrets.

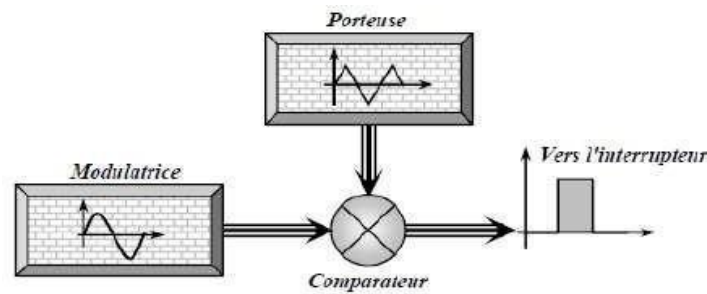


Figure. I. 20 : Réalisation du signal MLI [12].

I.3.2.3.2 Les caractéristiques de MLI :

Les paramètres importants dans la commande MLI sont : La fréquence de modulation f_p .
L'indice de modulation m ; Le coefficient de réglage en tension r ,

- **La fréquence de modulation f_p :** C'est la fréquence à laquelle les impulsions de la MLI sont générées. Plus la fréquence de modulation est élevée, plus les harmoniques sont repoussées vers des fréquences élevées, ce qui facilite leur filtrage.
- **L'indice de modulation m :** L'indice de modulation (m) contrôle la tension de sortie de l'onduleur. Il est défini comme le rapport entre l'amplitude du signal de référence (celui qu'on veut reproduire) et l'amplitude du signal porteur (le signal triangulaire).

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{I.13})$$

- **Coefficient de réglage en tension (r) :** Le facteur de réglage en tension **r** est une Variable qui offre la possibilité de moduler la tension de sortie de l'onduleur. Il est fréquemment employé pour pallier les fluctuations de la tension d'entrée ou afin d'obtenir une tension de sortie exacte.

I.3.2.3.3 Différentes techniques de MLI :

De nombreuses méthodes de contrôle à MLI ont été élaborées. Voici les plus couramment utilisées :

- Modulation MLI simple.
- Modulation MLI multiple.
- Modulation MLI Sinus triangulaire.
- Modulation MLI sinusoïdale modifiée.

I.3.2.3.3.1 Modulation MLI simple :

La modulation MLI simple, aussi connue sous le nom de modulation MLI à deux niveaux, représente la version la plus élémentaire de la modulation de largeur d'impulsion (MLI). Elle est fréquemment employée pour la gestion des onduleurs de tension, facilitant la transformation d'une tension continue en une tension alternative.

Dans cette approche, on fait une comparaison entre un signal de référence ayant une amplitude A_r et un signal d'onde porteuse de forme triangulaire avec une amplitude A_p . L'image ci-dessous démontre la production des signaux de commande et de sortie d'un onduleur monophasé à pont complet utilisant une modulation MLI simple. La fréquence du signal de référence correspond à la fondamentale de la tension de sortie.

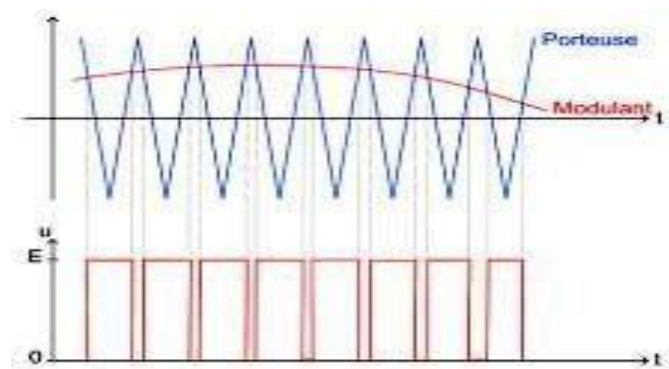


Figure. I.21: MLI d'une simple impulsion [13].

I.3.2.3.2 MLI multiple :

La modulation MLI multiple, aussi appelée modulation MLI à plusieurs niveaux, représente une technique sophistiquée de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui autorise la production d'une tension de sortie supérieure en qualité comparativement à la MLI simple. Il est fréquent de recourir à la méthode de modulation par impulsions multiples (MLI) dans ce contexte. Les impulsions de commande pour les interrupteurs se génèrent de manière comparable à la méthode précédente.

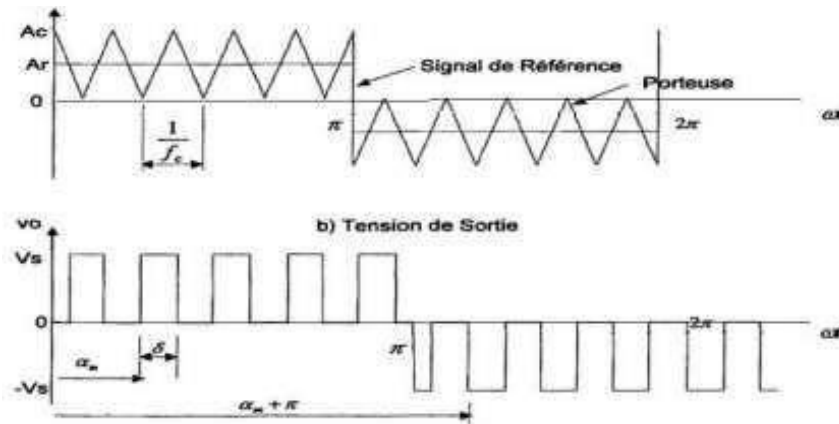


Figure. I.22: La modulation de largeur d'impulsions multiples [13].

I.3.2.3.3 La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire :

Dans cette méthode, le signal de référence utilisé est un signal de type sinusoïdal. L'onde produite par l'onduleur est constituée d'une série d'impulsions de largeur variable. Les moments de commutation sont fixés par les points où la porteuse et la modulante se croisent. Le nombre d'impulsions par demi-cycle est déterminé par la fréquence du signal porteur. Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles.

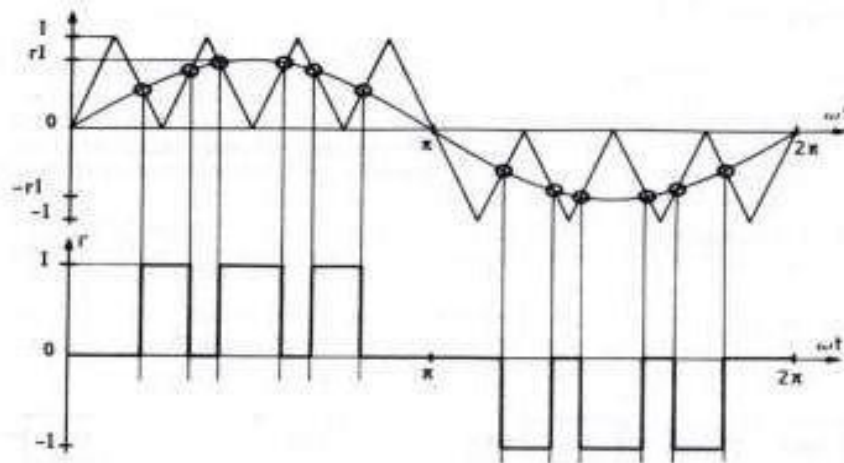


Figure. I.23: MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire [14].

I.3.2.3.4 La modulation sinusoïdale modifiée (MSPWM) :

La modulation sinusoïdale modifiée (MSPWM) est une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui a pour but d'améliorer les performances des onduleurs de tension. Dans cette méthode, le signal de référence demeure sinusoïdal, à l'exception du fait que la porteuse n'est pas imposée au centre des alternances de la sinusoïde.

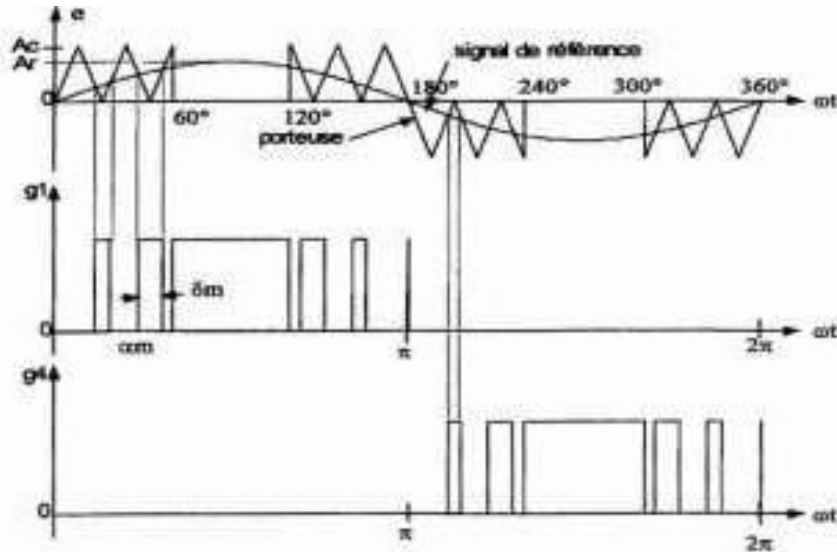


Figure. I. 24: La modulation sinusoïdale modifiée.

I.3.2.3.5 La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle :

C'est une méthode employée dans l'électronique de puissance pour réguler la tension de sortie d'un convertisseur.

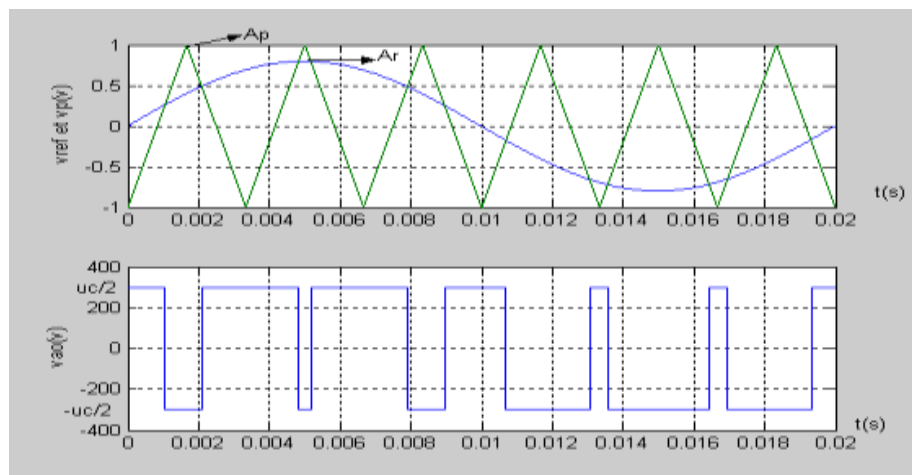


Figure. I. 25: La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle [15].

I.3.2.3.5 Les avantages de la MLI :

La Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) est une technique très utilisée en électronique de puissance pour contrôler la tension et le courant dans divers appareils.

Tableau. I. 1: Les avantages de la MLI.

Avantage	Description
Contrôle précis de la tension et du courant	La MLI permet de contrôler la largeur des impulsions électriques, ce qui permet de réguler très précisément la quantité d'énergie fournie à un appareil.
Réduction des pertes d'énergie	En utilisant des impulsions de largeur variable, la MLI permet de minimiser les pertes d'énergie par rapport à d'autres méthodes de contrôle.
Amélioration de l'efficacité	Grâce à un contrôle plus précis et à une réduction des pertes d'énergie, la MLI permet d'optimiser le rendement des appareils électriques.
Réduction des harmoniques	La MLI permet de diminuer les harmoniques, qui sont des perturbations électriques pouvant causer des problèmes.

I.3 Conclusion :

Ce premier chapitre a permis de poser les bases essentielles sur les convertisseurs statiques, notamment les **hacheurs** et les **onduleurs**, en détaillant leurs rôles, structures et principes de fonctionnement. Les hacheurs permettent la conversion de la tension continue en une autre valeur continue, tandis que les onduleurs assurent la conversion de la tension continue en tension alternative. Ces deux dispositifs sont fondamentaux dans les systèmes d'électronique de puissance, notamment pour le contrôle des machines électriques, la conversion d'énergie renouvelable et les alimentations industrielles. Cette introduction prépare ainsi le terrain pour une étude plus approfondie de leurs différents types, techniques de commande et domaines d'application.

Chapitre II :
Simulation des
convertisseurs DC-DC et
DC-AC sous MATLAB

II.1 Introduction :

Les hacheurs et les onduleurs sont des convertisseurs statiques de puissance essentiels dans de nombreuses applications industrielles et domestiques. Ils permettent de transformer l'énergie électrique d'une forme à une autre, en adaptant la tension, le courant ou la fréquence.

La simulation de ces convertisseurs est devenue un outil indispensable pour les ingénieurs et les chercheurs. Elle permet de :

- Comprendre le fonctionnement : La simulation facilite l'observation des formes d'onde relatives aux tensions et aux courants, ainsi que l'analyse du comportement du convertisseur dans diverses conditions d'opération.
- Optimiser les performances : Cela permet d'expérimenter diverses configurations et stratégies de commande pour optimiser l'efficacité, la stabilité et la qualité de l'énergie générée.
- Valider les conceptions : La simulation offre la possibilité de contrôler la pertinence des décisions concernant les composants et le dimensionnement avant l'élaboration d'un prototype, tout en permettant d'identifier toute anomalie potentielle lors de la conception.
- Réduire les coûts et les délais : L'utilisation de la simulation offre la possibilité d'examiner virtuellement diverses solutions, minimisant ainsi les dépenses et les retards associés à l'élaboration et aux essais de prototypes matériels.

Matlab :(abréviation de Matrix Laboratory) est un logiciel développé par MathWorks, largement utilisé dans les domaines scientifiques et techniques, notamment en traitement du signal, contrôle des systèmes, intelligence artificielle et simulation.

MATLAB est utilisé dans plein de domaines différents :

- Les scientifiques l'utilisent pour analyser des données et faire des simulations.
- Les ingénieurs l'utilisent pour concevoir des voitures, des avions ou des ponts.

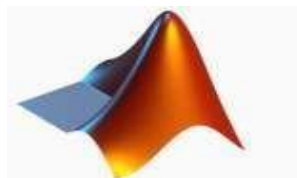


Figure. II. 1 : Logo de Matlab

II.1.2 Simulation du hacheur série :

Ce schéma représente une simulation d'un hacheur, un convertisseur électronique de puissance qui permet de modifier la tension continue. Il est réalisé sous Simulink, un environnement de simulation graphique intégré à MATLAB.

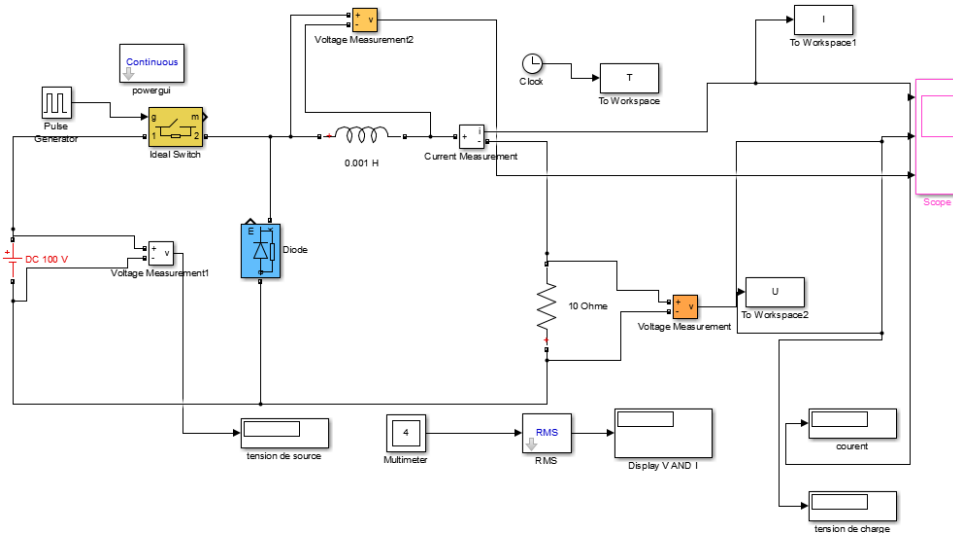
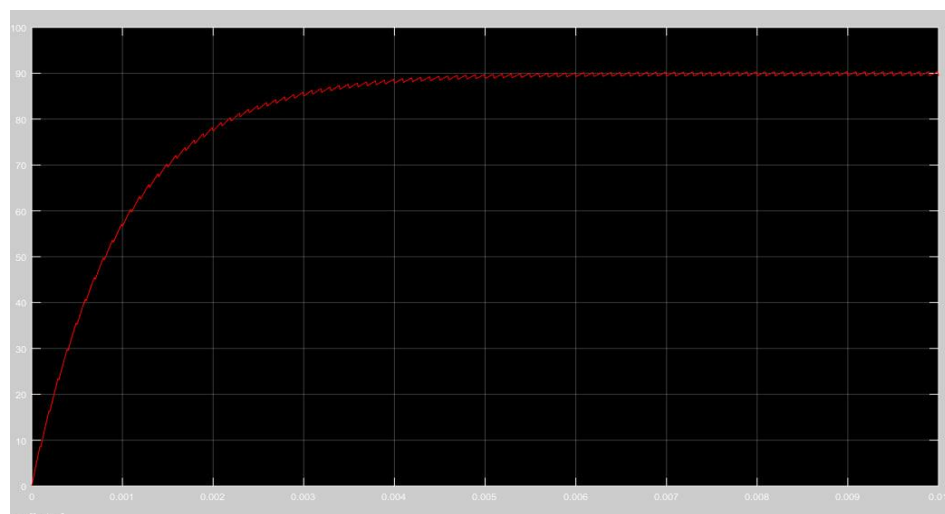


Figure. II. 2:Schéma sur Simulink de hacheur série.

II.1.2.2 Description des éléments du schéma :

- Source de tension continue (DC Voltage Source) : Fournit la tension d'entrée du hacheur.
- Résistance de charge (Sériés RL Branche) : Représente la charge alimentée par le hacheur.
- (Voltage Measurement) : Permettent de visualiser les tensions à différents points du circuit.
- (Current Measurement) : Permet de visualiser le courant dans le circuit.

II.1.2.3 Les ondes de tension et courant :



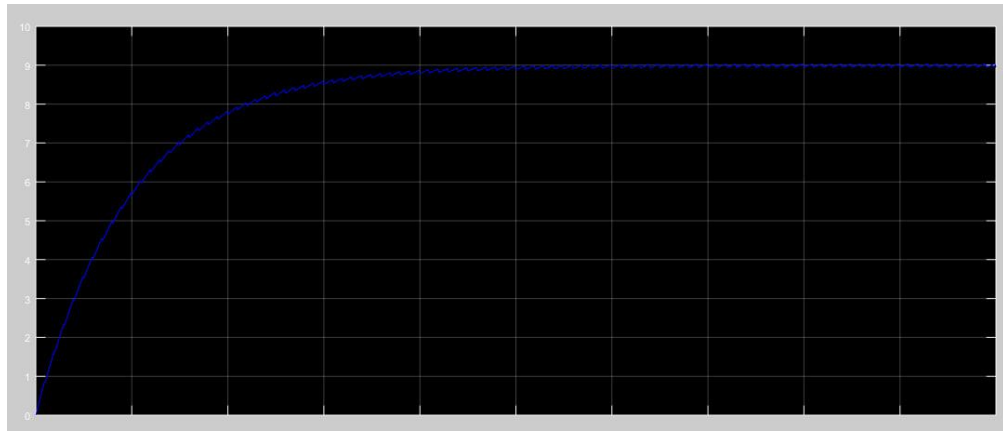


Figure. II.3 : Les ondes de tension et courant d'un hacheur série.

II.1.2.3.1 Interprétation :

II.1.2.3.1.1 Courbe de tension :

- La courbe montre une montée progressive de la tension depuis 0V jusqu'à environ 90V. Cette montée n'est pas instantanée, mais prend un certain temps.
- Une fois que la tension atteint environ 90V, elle se stabilise et reste à peu près constante jusqu'à la fin de la période affichée. On observe cependant de légères oscillations autour de cette valeur.

Cette courbe illustre le comportement standard de la tension de sortie d'un convertisseur de puissance, présentant une ascension graduelle suivie d'une phase stable avec une légère fluctuation.

II.1.2.3.1.2 Courbe de courant :

- La courbe montre une montée rapide du courant depuis 0 A jusqu'à une valeur proche de 10 A. Cette montée est abrupte, ce qui suggère une charge rapide de l'inductance dans le circuit.
- Une fois que le courant atteint sa valeur maximale, il se stabilise et reste à peu près constant jusqu'à la fin de la période affichée. On observe cependant une ondulation significative autour de cette valeur, ce qui est typique du courant dans un hacheur.

Ce graphique représente typiquement le courant dans l'inductance d'un hacheur. La montée rapide du courant correspond à la période où l'interrupteur du hacheur est fermé et l'inductance se charge.

II.1.3 Simulation de hacheur parallèle :

Ce schéma représente une simulation d'un circuit électrique (hacheur parallèle) sous Simulink, un logiciel de simulation graphique.

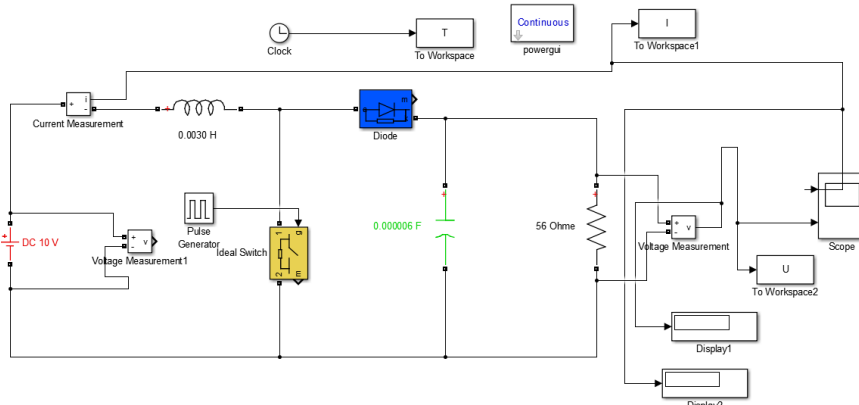


Figure. II.4 : Schéma sur Simulink de hacheur parallèle.

II.1.3.2 Les ondes de tension et courant :

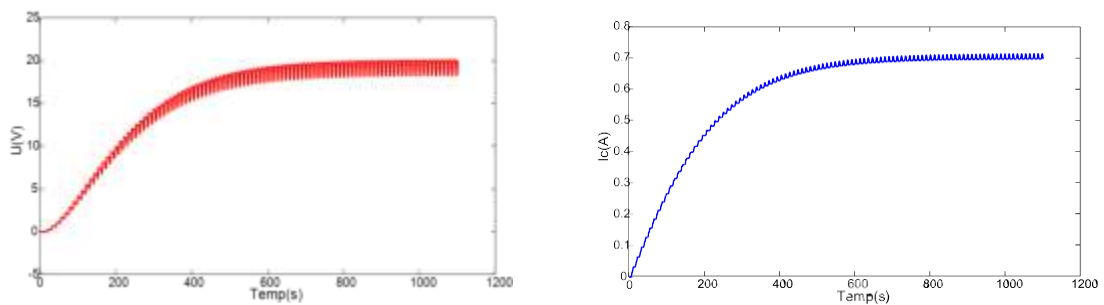


Figure. II.5 : Courbe de tension et courant de la charge d'un hacheur parallèle.

II.1.3.2.1 Interprétation :

II.1.3.2.1.1 Courbe de tension :

- Au début La tension s'accroît de façon constante, ce qui pourrait suggérer un processus de chargement d'un condensateur ou une réaction transitoire d'un circuit.
- Des oscillations superposées à la courbe principale sont visibles, ce qui pourrait être attribué à un phénomène d'ondulation,
- Après un certain temps, la tension tend vers une valeur quasi-stable avec des oscillations réduites, ce qui peut indiquer un état d'équilibre du système après un régime transitoire.

- Des marqueurs sont visibles sur certains points, ce qui peut indiquer des échantillons spécifiques sélectionnés pour analyse.

II.1.3.2.1.2 Courbe de courant :

- Montée progressive : La courbe montre une montée progressive du courant depuis 0A jusqu'à environ 0,7A. Cette montée n'est pas instantanée, mais prend un certain temps (environ 0,005 secondes).
- Palier avec ondulation : Une fois que le courant atteint sa valeur maximale, il se stabilise et reste à peu près constant jusqu'à la fin de la période affichée. On observe cependant une légère ondulation autour de cette valeur.

II.1.4 Simulation de hacheur Réversible en tension :

Ce schéma représente un convertisseur DC-DC boost, un type de circuit électronique qui augmente la tension continue d'une source d'alimentation.

- Lancer simulation avec : $R=1\Omega$, $L=0.001H$, $U=100V$.

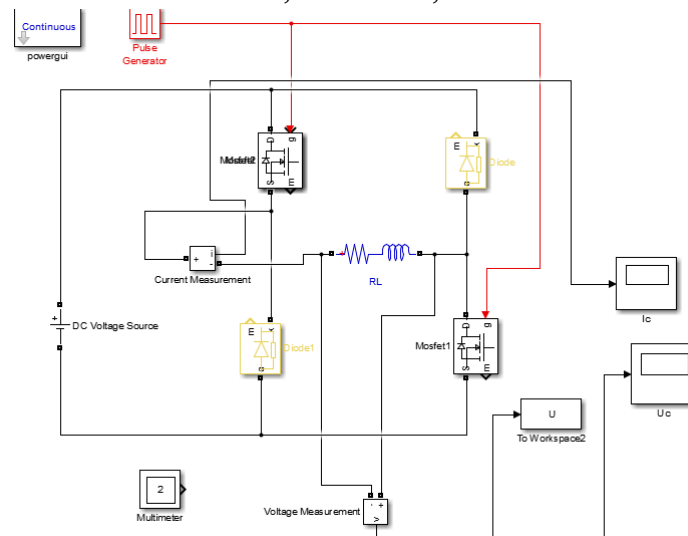


Figure. II.6: Schéma sur Simulink de hacheur réversible en tension.

II.1.4.1 Fonctionnement :

- Quand le MOSFET est enclenché, le courant passe à travers l'inductance, emmagasinant de l'énergie dans son champ magnétique.
- Lorsque le MOSFET est désactivé, le champ magnétique de l'inductance s'effondre, libérant l'énergie stockée. Cette énergie est ajoutée à la tension de la source d'entrée, ce qui augmente la tension de sortie.

- La diode autorise le passage du courant vers la sortie lorsque le MOSFET n'est pas activé, et le condensateur régularise la tension de sortie.
- Le générateur d'impulsions contrôle la fréquence et la durée des cycles d'activation/désactivation du MOSFET, ce qui permet de réguler la tension de sortie.

II.1.4.2 Les ondes de tension et courant de la charge :

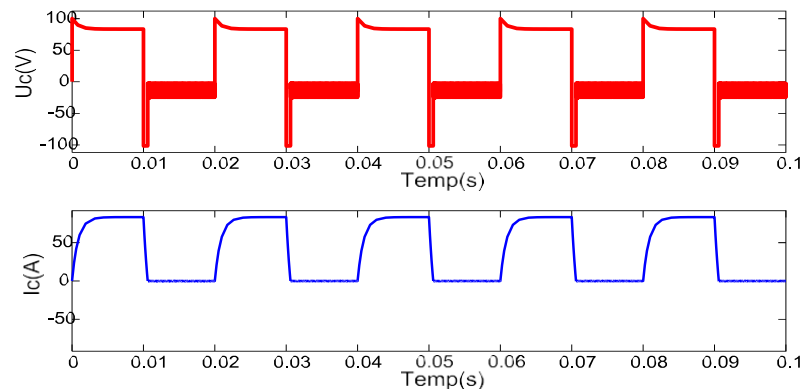


Figure. II.7: La courbe de tension et courant de charge d'un hacheur réversible en tension.

II.1.4.2.1 Interprétation avec la tension de charge :

- Ondulations : Les ondulations sont définies comme les sommets et les creux visibles sur la courbe. Ils signalent que la tension de la charge n'est pas totalement stable, mais qu'elle fluctue légèrement avec le temps.
- Fréquence des ondulations : La fréquence à laquelle ces ondulations se produisent est liée à la fréquence de commutation du MOSFET dans le convertisseur DC-DC.
- Amplitude des ondulations : L'amplitude des ondulations (L'écart entre les valeurs maximales et minimales) est influencée par plusieurs éléments, comme la valeur d'inductance, celle du condensateur et la charge appliquée.
- Tension moyenne : La valeur moyenne de la tension de la charge est la tension continue que le convertisseur fournit à la charge.

II.1.4.2.2 Interprétation avec courant de charge :

- Cette onde confirme que le hacheur opère en mode de commutation, produisant un courant pulsé dans la charge.
- L'amplitude et la forme du courant donnent des informations sur la puissance délivrée à la charge et sur les pertes dans le circuit.

- Les fluctuations pourraient signaler le besoin d'améliorer les éléments du circuit, comme l'inductance ou le condensateur, afin de diminuer les pertes et d'améliorer la qualité de l'électricité.

Cette courbe de courant de charge est une représentation visuelle du fonctionnement d'un hacheur réversible en tension.

II.1.5 Simulation hacheur réversible en courant :

Ce schéma représente un hacheur réversible en courant, un type de convertisseur DC-DC qui permet de contrôler le courant entre deux sources de tension continue.

- Lancer simulation avec : $U=24\text{ V}$, $L=0.001\text{ H}$.

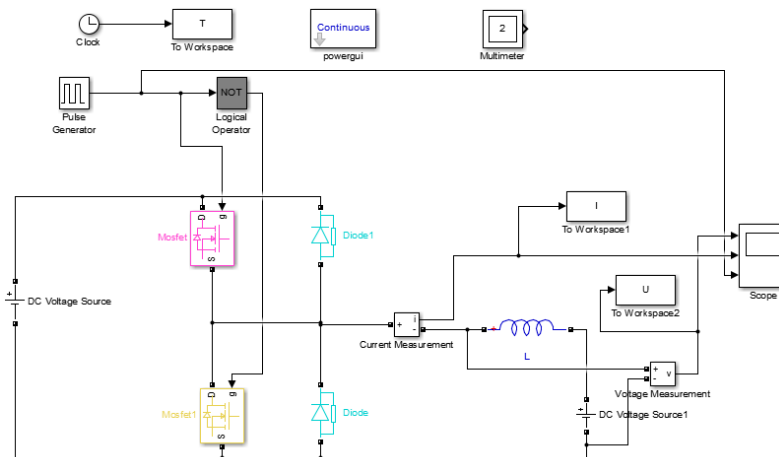


Figure. II.8 : Schéma sur Simulink de hacheur réversible en courant.

II.1.5.1 Fonctionnement simplifié :

- Les MOSFETs sont activés et désactivés rapidement par le générateur d'impulsions, créant des impulsions de courant.
- L'inductance adoucit le courant, tandis que les diodes autorisent son passage dans la direction voulue.
- En modifiant le rapport cyclique (la durée pendant laquelle les MOSFETs sont en marche par rapport à la durée totale), il est possible de réguler l'intensité du courant.
- La réversibilité est obtenue en contrôlant les MOSFETs de manière à permettre au courant de circuler dans les deux sens.

Ce circuit permet de contrôler le courant entre deux sources de tension continue, tout en permettant à ce courant de circuler dans les deux sens.

II.1.5.2 Les ondes de tension et courant de charge :

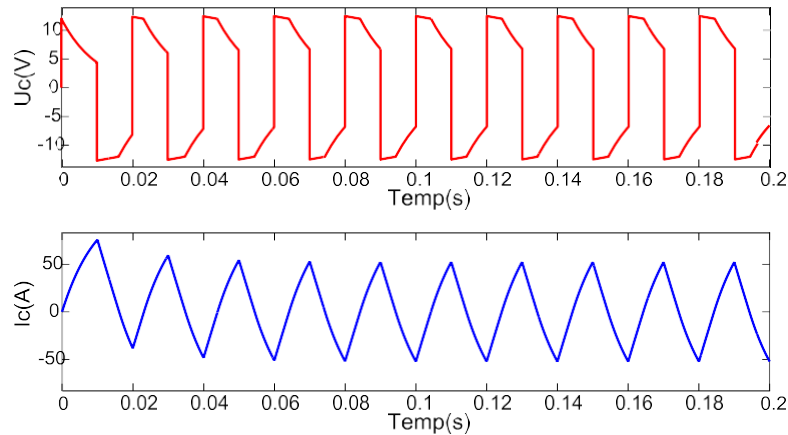


Figure. II.9 : Courbe de tension et courant de la charge d'un hacheur réversible en courant.

II.1 .5.2.1 Interprétation de courbe de tension :

- La tension présente une forme en escalier avec des alternances entre des valeurs positives et négatives, ce qui montre que le hacheur fonctionne dans les deux sens (quadrants).
- Cette variation contrôlée indique un hachage régulier permettant d'inverser la polarité de la tension appliquée à la charge selon le mode de fonctionnement.

1.5.2.2 Interprétation de courant de charge :

- Le profil de la courbe est caractéristique du courant de charge d'un hacheur réversible en courant. Les changements brusques entre les sommets et les creux sont attribuables à l'alternance des interrupteurs du hacheur.
- Le fait que le courant oscille entre des valeurs positives et négatives confirme que le hacheur est réversible en courant. Il peut transférer de l'énergie dans les deux sens.
- On désigne les oscillations par le terme ondulations. Ces dernières sont attribuables à l'inductance de la charge et aux transitions du hacheur.

II.1.6 Simulation hacheur réversible en courant et en tension :

Ce schéma représente un hacheur réversible en tension et en courant, également appelé convertisseur quatre quadrants (avec $U=24V$).

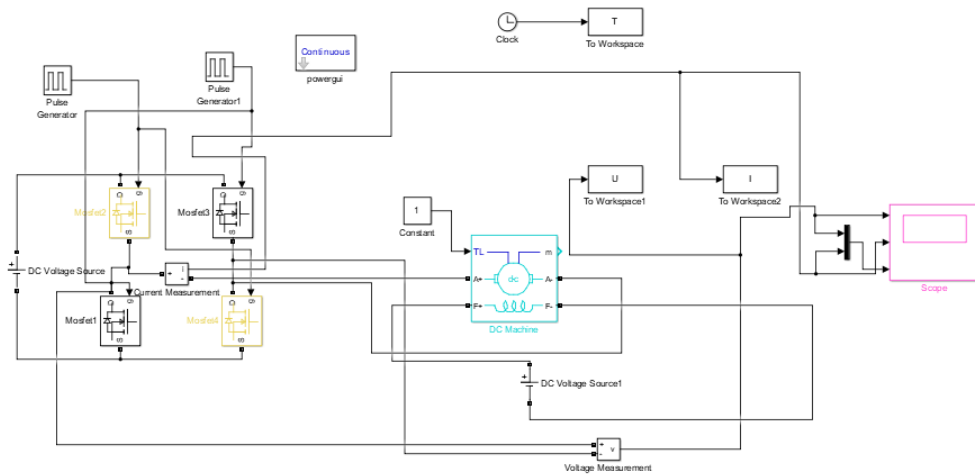


Figure. II.10 : Schéma sur Simulink de hacheur réversible en courant et tension.

II.1.6.1 Fonctionnement simplifié :

- Le pont en H et les quatre quadrants :
- Quadrant 1 : Tension et courant positifs (moteur en marche avant).
- Quadrant 2 : Tension positive et courant négatif (freinage régénératif).
- Quadrant 3 : Tension et courant négatifs (moteur en marche arrière).
- Quadrant 4 : Tension négative et courant positif (en marche arrière).

II.1.6.2 Les ondes de tension et courant de charge :

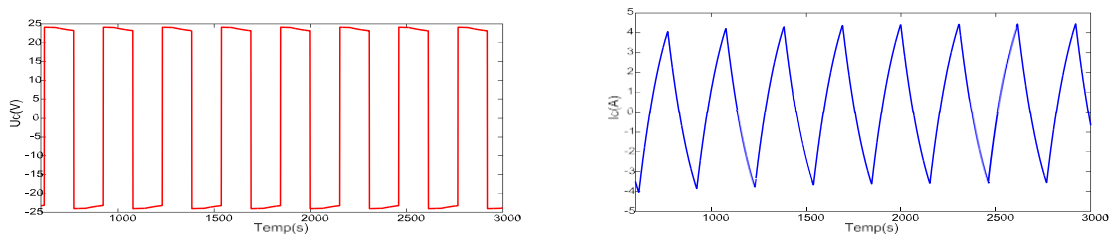


Figure. II.11 : Ondes de tension et courant de charge d'un hacheur R en tension et courant.

II.1.6.2.1 Interprétation :

II.1.6.2.1.1 Courbe de tension :

- La présence de tensions positives et négatives confirme que le hacheur est réversible en tension.
- Bien que la courbe ne montre que la tension, la réversibilité en tension est généralement associée à la réversibilité en courant.
- La forme des ondes carrées est typique d'une modulation de largeur d'impulsion (PWM).

- La fréquence élevée des oscillations indique la vitesse à laquelle les transistors MOSFET du pont H sont actionnés et désactionnés.
- Cette courbe de tension de charge atteste du fonctionnement d'un hacheur réversible en termes de tension et de courant. Elle illustre comment la pression exercée sur la charge est régulée par PWM, ce qui permet de gérer la vitesse et le sens de rotation du moteur.

II.1.6.2.1.2 Courbe de courant :

- Les ondulations visibles sont dues à la fréquence élevée de découpage du hacheur.
- Le hacheur est susceptible de fonctionner en mode quatre quadrants, ce qui permet un transfert d'énergie bidirectionnel (alimentation du charge et récupération d'énergie).
- La présence de courants positifs et négatifs confirme que le hacheur est réversible en courant
- Même si la courbe ne représente que le courant, on associe généralement la réversibilité du courant à celle de la tension. Cela implique que le contrôleur peut aussi inverser la polarité de la tension fournie à la charge.
- La fréquence élevée des oscillations indique la fréquence à laquelle les transistors MOSFET du pont en H sont activés et désactivés.
- Cette courbe de courant de charge confirme le fonctionnement d'un hacheur réversible en tension et en courant. Elle montre comment le courant qui traverse la charge est contrôlé par PWM

II.2 Simulation des onduleurs :

II.2.1 Simulation d'une commande symétrique d'ondeur :

Ce schéma représente un onduleur en pont complet utilisé pour convertir une tension continue (DC) en tension alternative (AC). Il est composé de plusieurs éléments clés :

Lancer la simulation avec $U=100$, $R=100\text{ ohm}$, $L=0.5\text{ H}$.

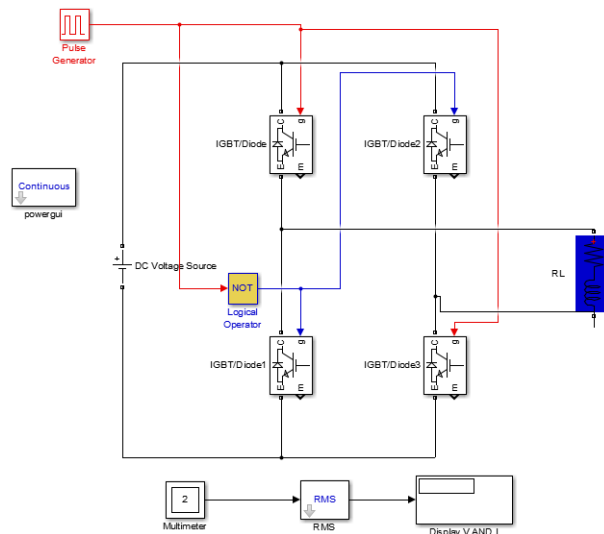


Figure. II.12 : Schéma sur Simulink d'une commande symétrique d'onduleur monophasé.

II.2.1.1 Fonctionnement :

- L'onduleur fonctionne avec une commande symétrique, c'est-à-dire que les interrupteurs sont activés de manière alternée pour générer une tension alternative de fréquence et d'amplitude contrôlées.
- La tension de sortie est symétrique par rapport à l'axe du temps.
- En PWM, la modulation ajuste le rapport cyclique pour réguler l'amplitude et la fréquence de la tension alternative.

II.2.1.2 Les ondes de tension et courant de charge :

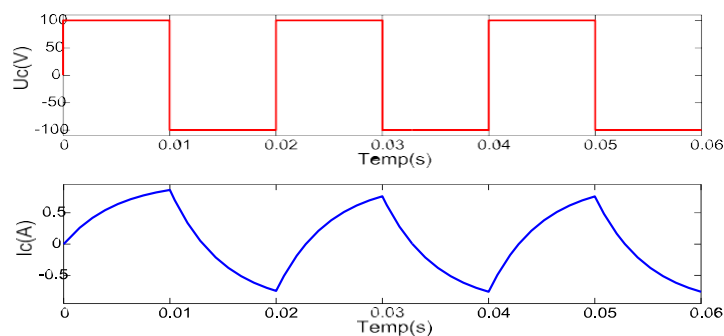


Figure. II.13 : Onde de tension et courant de La commande symétrique.

II.2.1.2.1 Interprétation :

II.2.1.2.1.1 Onde de tension (U_b) :

- La forme de l'onde de tension U_b est carrée, oscillant entre un niveau constant positif (100V) et un niveau constant négatif (-100V). Il s'agit d'un onduleur à

commande symétrique typique, où les interrupteurs sont commutés pour générer une tension alternative en forme de carré.

- L'onde se répète régulièrement, indiquant une fréquence constante de la tension alternative produite par l'onduleur.
- L'amplitude de l'onde est de 100V en positif et -100V en négatif, ce qui détermine la valeur crête de la tension alternative.

II.2.1.2.1.2 Onde de courant (I_b) :

- La forme de l'onde de courant I_b se présente comme un mélange de triangles et de trapèzes. Elle n'est pas de forme sinusoïdale, ce qui est fréquent dans les onduleurs à contrôle symétrique, particulièrement en présence d'une charge inductive (tel qu'un moteur).
- On constate un décalage entre l'onde de tension U_b et l'onde de courant I_b . Le courant ne parvient pas à son pic simultanément avec la tension, une situation attribuée à l'existence d'inductance au sein de la charge.
- La forme non sinusoïdale du courant indique la présence de distorsion harmonique. Cela signifie que le courant contient des fréquences autres que la fréquence fondamentale, ce qui peut entraîner des pertes et des problèmes de fonctionnement.

II.2.2 Simulation de la commande décalée d'onduleur :

La commande décalée permet de contrôler la tension et la fréquence du courant alternatif produit par l'onduleur. Pour ça, on utilise des interrupteurs électroniques.

- Lancer la simulation avec $U=100$ V, $R=100$, $L=0.02$ H.

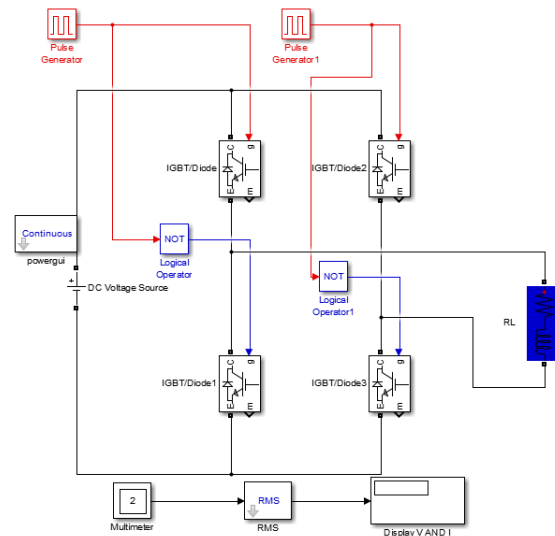


Figure. II.14: Schéma sur Simulink d'une commande décalée d'onduleur monophasé.

II.2.2.1 Fonctionnement :

- Le générateur d'impulsions produit des signaux carrés qui alternent entre l'état haut (1) et l'état bas (0).
- Les signaux du générateur d'impulsions contrôlent l'ouverture et la fermeture des IGBT. Par exemple, lorsque le signal est haut, l'IGBT/Diode1 et l'IGBT/Diode4 sont fermés, et l'IGBT/Diode2 et l'IGBT/Diode3 sont ouverts.
- L'opérateur logique NON inverse les signaux pour contrôler les IGBT opposés.
- En ouvrant et fermant les IGBT de manière alternée, le circuit produit une tension alternative à ses bornes de sortie. La fréquence de cette tension dépend de la fréquence des signaux du générateur d'impulsions.

II.2.2.2 Les ondes de tension et courant de charge :

Décalage pour $\alpha = 45^\circ$:

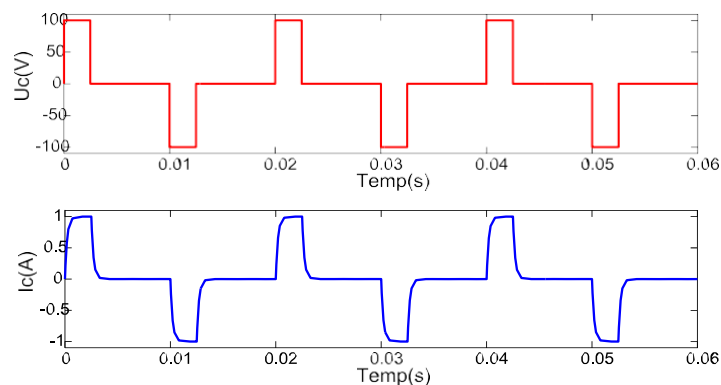


Figure. II.15: Ondes de tension et courant de charge pour $\alpha = 45^\circ$.

Décalage pour $\alpha = 90^\circ$:

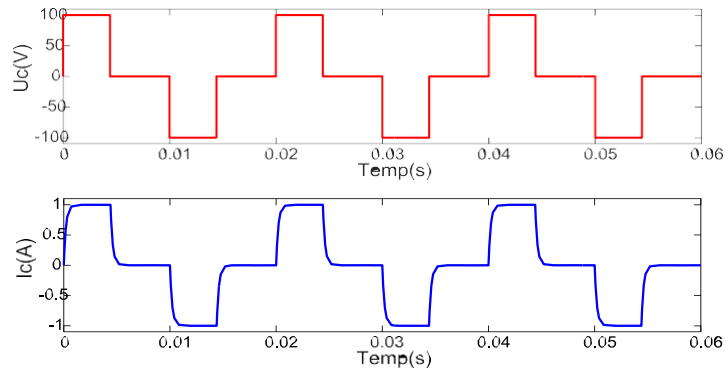
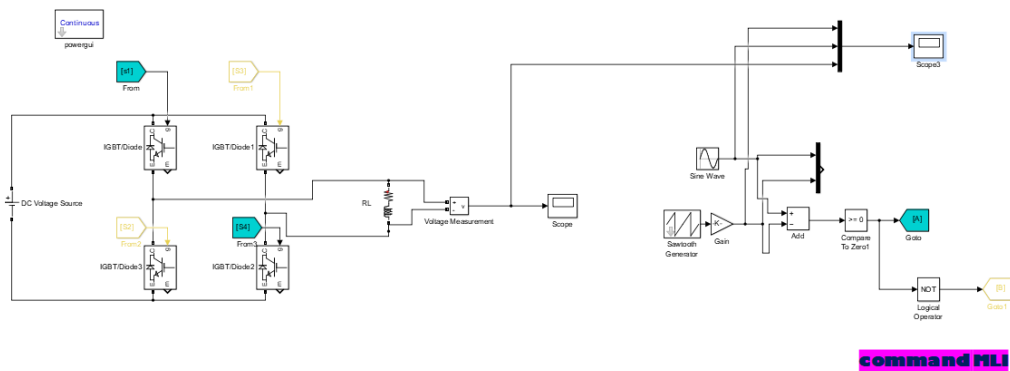


Figure. II.16: Ondes de tension et courant de charge pour $\alpha = 90^\circ$.

II.2.3. Simulation d'une commande MLI d'onduleur monophasé :



Ce schéma illustre la manière de commander un dispositif électrique à l'aide d'une méthode connue sous le nom de Modulation par Largeur d'Impulsion, ou MLI. C'est une méthode astucieuse pour moduler la puissance qu'on transmet à cet équipement.

Figure. II.17: Schéma sur Simulink d'une commande MLI d'onduleur monophasé.

II.2.2.1 Composants principaux du schéma :

- Source DC : Fournit une tension continue pour alimenter le circuit.
- IGBT avec diodes : Ce sont des interrupteurs électroniques utilisés pour créer le signal alternatif en Sortie.
- Commande MLI (PWM) :
 - Générateur de dent de scie (SawtoothGenerator) : produit une onde en dent de scie
 - Onde sinusoïdale (Sine Wave) : représente le signal de référence qu'on veut obtenir en sortie

- Comparateurs : comparent les deux signaux (sinus et dent de scie) pour générer le signal MLI
- Opérateurs logiques (LogicalOperator, Compare To Zero, etc.) : transforment les signaux de comparaison en commandes pour les IGBT
- Scopes : instruments de visualisation pour observer les formes d'ondes (tension et commande).

II.2.2.2 Fonctionnement :

- Une onde sinusoïdale est produite afin d'illustrer la forme de tension alternative désirée.
- Un signal en dent de scie est généré avec une fréquence plus élevée.
- Le signal sinusoïdal est comparé au signal dent de scie.
- Cette comparaison produit une onde MLI (PWM) :
 - Si le sinus > dent de scie → sortie = 1 (impulsion active)
 - Sinon → sortie = 0 (impulsion inactive)
- Des impulsions PWM sont transmises aux IGBT.
- Ces interrupteurs s'ouvrent et se ferment en fonction des impulsions pour créer un courant alternatif.
- Grâce à la coordination des IGBT, un signal alternatif est produit à la sortie.
- Le signal PWM traverse une charge RLC (composée d'une résistance, d'une inductance et d'une capacité) qui purifie le signal afin de produire une forme sinusoïdale adoucie.

II.2.2.3 Les ondes de tension référence et porteuse et charge :

- Tension Référence : On pourrait le comparer à un modèle de la tension électrique que l'on cherche à obtenir. On s'efforce de reproduire la forme idéale.
- Porteuse : C'est une tension électrique qui change très rapidement. Elle sert de "messenger" pour aider à créer la tension qu'on veut.
- Tension Charge : C'est la tension électrique qui arrive finalement à l'appareil pour le faire fonctionner.

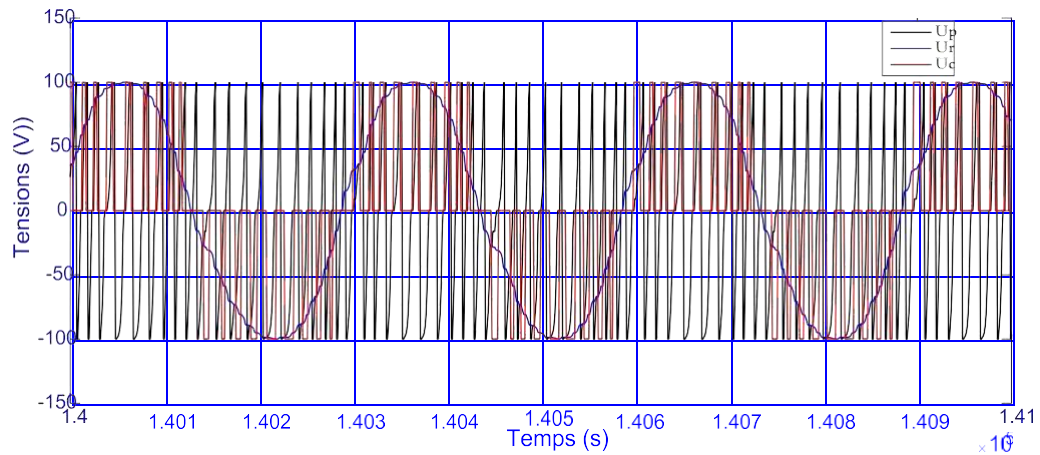


Figure. II.18 : Les ondes de tension de porteuse et référence et charge en fonction de temps.

II.2.2.3.1 Interprétation :

Il représente trois signaux électriques en fonction du temps :

- Noire (porteuse) : Il s'agit d'un signal en forme de triangle ou de créneaux à fréquence élevée. Il sert de référence pour effectuer des comparaisons avec le signal de référence. On la désigne comme « porteuse » car elle véhicule l'information dans les procédés de modulation.
 - Bleu (tension de référence) : Il s'agit d'un signal sinusoïdal à basse fréquence qui illustre l'onde souhaitée à appliquer à la charge. Il fluctue doucement entre des chiffres positifs et négatifs.
 - Rouge (tension charge) : C'est un signal PWM (modulation de largeur d'impulsion). Il change entre deux niveaux (souvent 0 et +V ou -V). Il est le résultat de la comparaison entre la porteuse et la tension de référence. Quand la tension de référence est supérieure à la porteuse → le signal est actif ("ON"). Sinon, il est "OFF".
 - Le but ici est de reproduire un signal sinusoïdal (bleu) à la sortie (appliqué à la charge), mais à travers une commande tout ou rien (0 ou 1) représentée par la PWM (noir).
- La porteuse (rouge) est simplement un outil intermédiaire pour générer cette modulation.
- Avec un filtrage passif (bobine + condensateur) à la sortie, on peut reconstituer un signal presque sinusoïdal à partir du PWM.

II.2.4.2 Interprétation :

Uc1, Uc2, Uc3 (en rouge) : Les tensions de commande MLI appliquées aux différentes phases de l'onduleur. Elles sont de forme pseudo-sinusoïdale, constituées d'impulsions de largeur variable.

Ic1, Ic2, Ic3 (en bleu) : Les courants résultants dans les différentes phases de la charge. Ils présentent une forme plus lisse, filtrée par l'inductance de la charge, s'approchant d'une sinusoïde.

Les formes d'onde des tensions de contrôle (Uc1, Uc2, Uc3) démontrent le concept de la Modulation en Largeur d'Impulsion. La largeur de chaque impulsion est ajustée pour que la valeur moyenne de la tension sur un cycle spécifique corresponde à une onde sinusoïdale. Le filtrage des harmoniques non souhaitées est ensuite réalisé par l'inductance de la charge grâce à la fréquence élevée de commutation des impulsions.

Les formes d'onde des courants (Ic1, Ic2, Ic3) illustrent l'issue de cette procédure. Il est évident que malgré leur non-sinusoïdale parfaite, une réduction considérable des harmoniques par rapport aux tensions de commande est observée. La fréquence de commutation limitée et les caractéristiques de la charge sont à l'origine des ondulations résiduelles dans les courants.

II.3 Conclusion :

Ce chapitre a approfondi l'étude des **différents types de hacheurs** (série, Parallèle, réversible, etc.) à travers leur modélisation et leur **simulation sur MATLAB/Simulink**. Les résultats obtenus ont permis d'analyser les formes d'ondes de tension et de courant selon le type de montage, ainsi que l'impact du rapport cyclique sur les performances du système. En parallèle, une attention particulière a été portée aux **techniques de commande des onduleurs**, notamment la **modulation sinusoïdale (PWM)** et ses variantes, qui assurent une régulation efficace de la tension et une meilleure qualité du signal de sortie. Ces simulations confirment la pertinence de MATLAB comme outil de validation et d'optimisation dans la conception des convertisseurs statiques.

Chapitre III :
Simulation sous
PROTEUS et
Réalisation d'un
Onduleur monophasé

III.1 Introduction :

Dans le domaine de l'électronique de puissance, les hacheurs et les onduleurs jouent un rôle essentiel dans la conversion et la gestion de l'énergie électrique. Les hacheurs permettent de modifier la tension continue, tandis que les onduleurs transforment une tension continue en tension alternative. Aujourd'hui, avec l'évolution des technologies, l'utilisation de cartes électroniques programmables comme l'Arduino facilite grandement la réalisation et le contrôle de ces dispositifs. Grâce à Arduino, il est possible de générer des signaux de commande précis, de régler des paramètres en temps réel et de simplifier la conception des circuits de hachage et d'onduleur pour diverses applications industrielles ou domestiques. En utilisant Arduino, il devient également possible de tester différentes méthodes de contrôle comme la modulation de largeur d'impulsion (PWM), offrant ainsi plus de flexibilité et de fiabilité. Ce projet vise donc à explorer la mise en œuvre pratique des hacheurs et onduleurs en combinant l'électronique de puissance et la programmation embarquée.

Pour la simulation et la validation du fonctionnement des hacheurs et onduleurs avant la réalisation pratique, nous avons utilisé le logiciel ISIS Proteus. Ce dernier permet de créer des schémas électroniques détaillés, d'intégrer la carte Arduino ainsi que d'autres composants nécessaires comme les transistors, diodes, moteurs, etc. Grâce à Proteus, il est possible de simuler le comportement du circuit en temps réel et de vérifier la génération correcte des signaux de commande (PWM) sans risquer d'endommager le matériel. Cette étape de simulation est cruciale pour détecter et corriger d'éventuelles erreurs de conception avant le passage à la phase pratique.

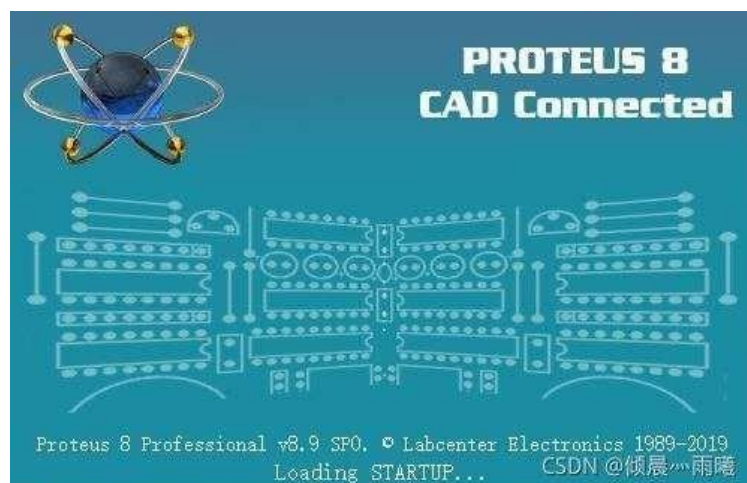


Figure. III.1 : Proteus Professional.

III.2 Composantes utilisées :

III.2.1 Carte Arduino :

Une carte Arduino, c'est une petite plateforme électronique open source très pratique pour réaliser des projets interactifs. Imagine un mini-ordinateur facile à programmer et à connecter à des composants électroniques comme des capteurs, des moteurs, des lumières, etc. En gros, c'est une carte avec un microcontrôleur (le cerveau), des entrées/sorties pour brancher des choses, et une connexion USB pour la programmer avec un langage simple. C'est super pour les débutants en électronique et pour prototyper rapidement des idées.

III.2.1.1 Pourquoi Arduino UNO ? :

Il y a de nombreuses cartes électroniques qui possèdent des plateformes basées sur des microcontrôleurs disponibles pour l'électronique programmée. Tous ces outils prennent en charge les détails compliqués de la programmation et les intègrent dans une présentation facile à utiliser. De la même façon, le système Arduino simplifie la façon de travailler avec les microcontrôleurs.



Figure. III.2 : Carte arduino UNO.

Arduino UNO est une plateforme électronique open source basée sur du matériel et un logiciel faciles à utiliser. Elle permet aux débutants comme aux experts de créer des projets interactifs à moindre coût et avec une grande flexibilité.

Tableau. III. 1 : les avantages de carte arduino UNO

Avantage	Description
Le prix (réduits)	Comparativement à d'autres plateformes, les cartes Arduino sont assez abordables. La version la moins onéreuse du module Arduino peut être montée manuellement, (les cartes Arduino déjà assemblées coûtent moins de 2500 Dinars).
Multi plateforme	Le logiciel Arduino, écrit en JAVA, tourne sous les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.
Un environnement de programmation clair et simple	L'environnement de développement Arduino (le logiciel Arduino IDE) est simple à manipuler pour les novices, tout en étant suffisamment adaptable pour que les utilisateurs expérimentés puissent également l'apprécier.
Logiciel Open Source et extensible :	Le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous licence open source disponible pour être complété par des programmeurs expérimentés.
Matériel Open source et extensible :	Les cartes Arduino reposent sur les microcontrôleurs Atmel ATMEGA8, ATMEGA168 et ATMEGA328. Les schémas des modules sont diffusés sous une licence Creative Commons, permettant aux concepteurs de circuits expérimentés de créer leur propre version des cartes Arduino.

III.2.1.2 La constitution de la carte Arduino Uno :

En général, un module Arduino est élaboré autour d'un microcontrôleur ATMEL AVR, accompagné de pièces supplémentaires qui simplifient la programmation et l'interconnexion avec d'autres circuits. Chaque module est équipé d'au moins un régulateur linéaire de 5V et d'un oscillateur à quartz de 16 MHz (ou, dans certains cas, d'un résonateur en céramique). Le

microcontrôleur est configuré avec un chargeur d'amorçage, éliminant ainsi le besoin d'un programmeur spécial [16].



Figure. III.3 : Constitution de la carte Arduino UNO.

III.2.1.3 Les composantes de la carte Arduino sont :

- Prise jack : Permet de brancher une alimentation externe (pile, batterie, adaptateur secteur).
- Connexion USB : Sert à alimenter la carte en énergie électrique (5V) et Sert à téléverser (envoyer) le programme vers la carte.
- Microcontrôleur : Stocke le programme et Exécute les instructions du programme.
- 6 entrées analogiques : Permettent de connecter des capteurs et détecteurs analogiques et Chaque entrée peut lire 1024 valeurs différentes entre 0 et 5 Volts.
- 14 entrées/sorties numériques : Utilisées pour brancher des actionneurs (comme LED, moteurs, etc.) et Permettent l'envoi ou la réception de signaux numériques
- Pins ICSP : pour programmer le microcontrôleur directement.
- Crystal oscillateur : pour gérer la vitesse du microcontrôleur.

III.2.1.4 L'environnement de la programmation :

III.2.1.4.1 Le logiciel Arduino :

L'éditeur de code pour la carte Arduino fonctionne comme un logiciel de programmation, utilisant un langage similaire au C. Après avoir été saisi ou modifié, le programme sera transféré et stocké sur la carte via la connexion USB. Le câble USB assure simultanément la fourniture d'énergie à la carte et le transfert d'informations. Ce logiciel est connu sous le nom d'IDE Arduino[17].

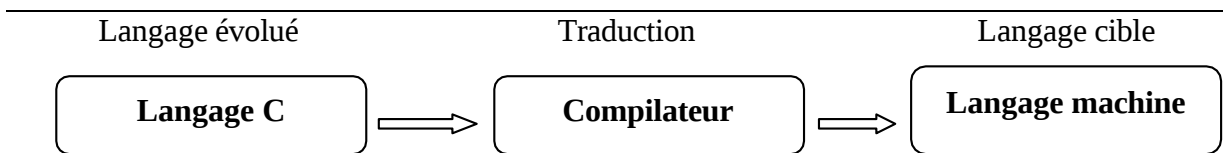


Figure. III.4 : Façons de communiquer avec Arduino.

III.2.1.4.2 Les étapes de téléchargement du programme :

- On développe ou on exécute un programme existant en utilisant le logiciel IDE Arduino.
- On vérifie ce programme avec le logiciel Arduino.
- En cas d'erreurs signalées, on procède à une modification du programme..
- On charge le programme sur la carte.
- On procède au câblage de l'assemblage électronique..
- L'exécution du programme est automatique après quelques secondes.
- La carte peut être approvisionnée soit par le biais du port USB, soit via une source d'alimentation indépendante.
- On vérifie que notre montage fonctionne.

III.2.2 Driver IR2110 :

Le driver IR2110 est un circuit intégré (CI) de puissance haute tension et haute vitesse. Il est spécialement conçu pour commander des transistors MOSFET ou IGBT dans des configurations de demi-pont ou de pont complet.

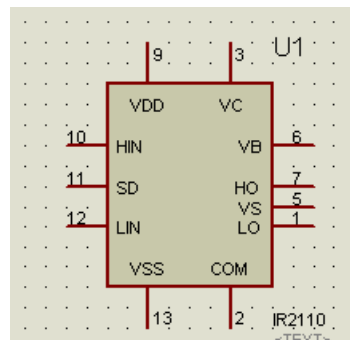


Figure. III.5 : Driver IR2110 sur Isis Proteus.

III.2.3 Bloc de puissance :

Le circuit de puissance se compose principalement de deux composants : les six interrupteurs choisis sont IGBT et la charge.

III.2.3.1 Interrupteur statique (à semi-conducteur) :

On utilise un MOSFET IRF540 à cause de sa simplicité d'utilisation, sa fréquence de commutation relativement élevée, ses caractéristiques électriques suffisantes pour notre application, ainsi que sa large disponibilité sur le marché industriel.

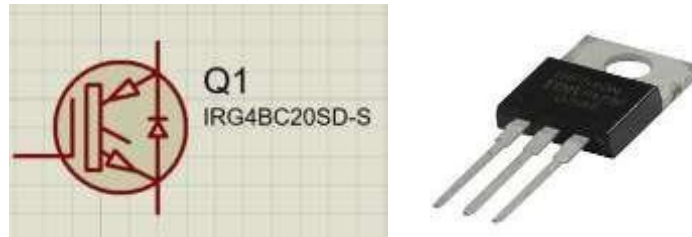


Figure. III.6 : Transistor de type IGBT.

III.2.4 Autres accessoires :

Pour réaliser les cartes de commande et de puissance, on utilise les éléments suivants :

Tableau. III. 2 : Autres accessoires utilisés.

Résistances de tirage vers le bas	Elles sont souvent utilisées comme résistances de tirage vers le bas.
Source d'alimentation	Elle fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement du circuit et à l'alimentation des bobines.
Inductances	jouent un rôle dans le stockage de l'énergie
Résistances de charge	Elles représentent probablement des charges dans le circuit
Capacité	stocker de l'énergie électrique sous forme de charge électrique
Oscilloscope	Pour observer les signaux PWM et les sorties triphasées.
Éléments de limitation de courant	résistances de limitation de courant pour protéger des MOSFETs.

III.3 Simulation par logiciel Proteus :

III.3.1 Onduleur en demi-pont :

Dans cette partie, nous avons réalisé le schéma de la commande de l'onduleur monophasé sur le logiciel Proteus ISIS. Le circuit représente un demi-pont (Half-Bridge) composé de deux transistors MOSFET de type IRF540, commandés par le driver IR2110. La commande est assurée par une carte Arduino UNO, qui génère des signaux PWM à partir des broches numériques D9 et D10 :

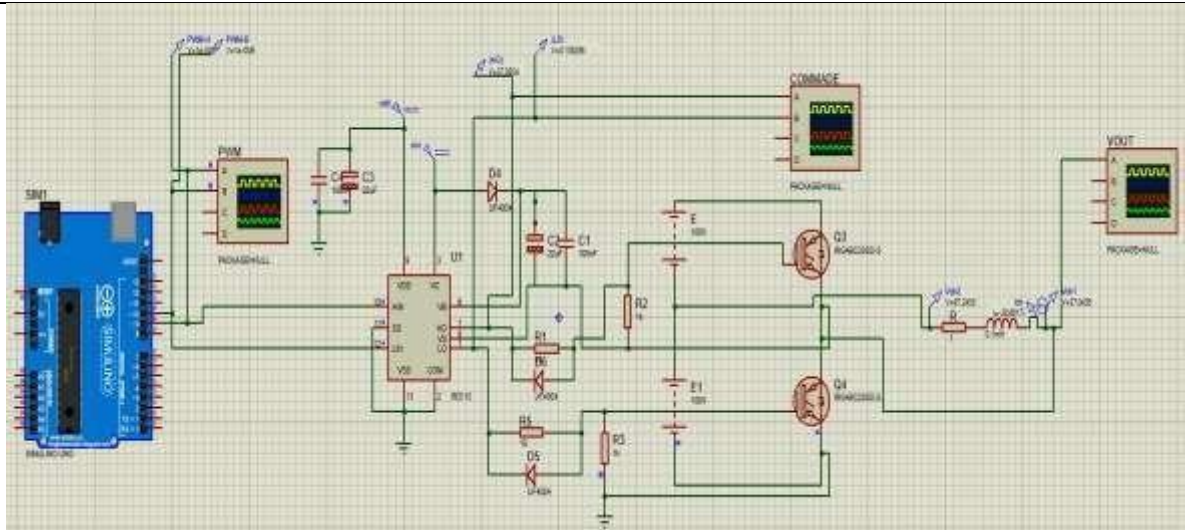


Figure.III.7 : Montage de l'Onduleur Monophasé (Simulation ISIS).

III.3.1.1 Explication du schéma :

- Arduino UNO : génère les signaux PWM pour commander les MOSFET via le driver
- IR2110 : reçoit les signaux de l'Arduino et les amplifie pour activer les MOSFETs.
 - HO : pour commander le MOSFET du haut (High Side).
 - LO : pour le MOSFET du bas (Low Side).
- MOSFETs IRF540 : jouent le rôle d'interrupteurs électroniques de puissance. Ils s'ouvrent et se ferment alternativement pour appliquer la tension continue (+100V) sur la charge de manière alterné
- Charge RL : représente une charge réelle (moteur, résistance...).
- Alimentations : 5V pour Arduino, 15V pour IR2110, 100V comme source DC principale.

III.3.1.2. Téléversement du Code dans la Carte Arduino sous Proteus :

Une fois le code écrit dans l'environnement Arduino IDE, il faut l'intégrer dans la carte Arduino UNO du schéma sous Proteus pour que la simulation fonctionne correctement.

- Ouvrir l'IDE Arduino et coller le code dans l'éditeur
- Cliquer sur Vérifier (✓) pour compiler le code
- Une fois la compilation terminée :
 - Un dossier s'ouvrira, contenant un fichier avec l'extension .hex.

- ❑ Ouvrir le projet Proteus ISIS contenant la carte Arduino UNO.
- ❑ Double-cliquer sur la carte Arduino pour ouvrir ses propriétés.
- ❑ Dans le champ "Program File", cliquer sur le dossier à droite et importer le fichier .hex récupéré.
- ❑ Cliquer sur OK, puis démarrer la simulation.

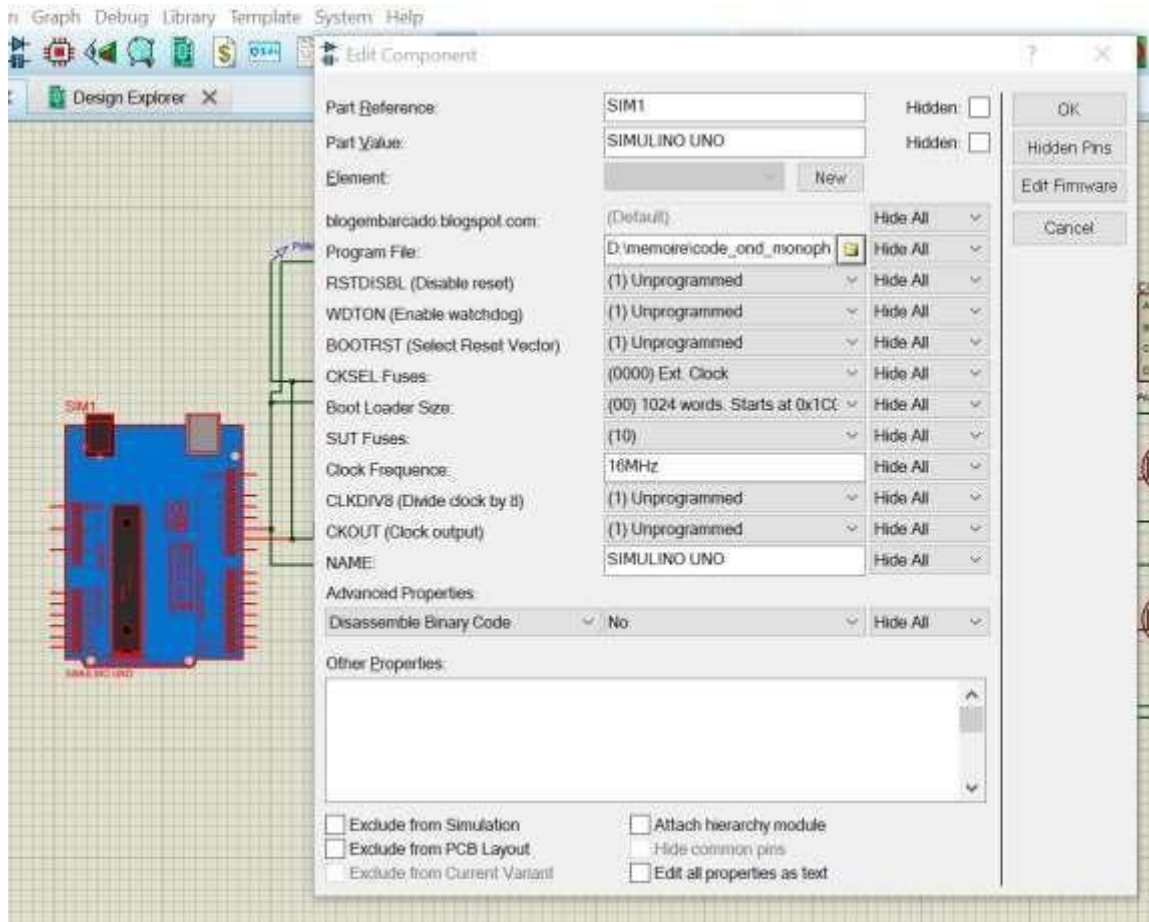


Figure. III.8 : Téléversement du code Arduino dans Proteus ISIS.

III.3.1.4 Résultats de la Simulation et Analyse des Courbes :

Une fois la simulation lancée sous Proteus, on peut observer les signaux générés au niveau des broches de commande ainsi que la tension aux bornes de la charge.

Le graphe montre la tension (U_{ch}) et le courant (I_{ch}) appliqués à une charge RL dans un onduleur commande en PWM.

L'analyse met en évidence le comportement inductif de la charge, avec un courant déphasé et de forme triangulaire, ainsi que l'effet du filtre LC sur le lissage du signal.

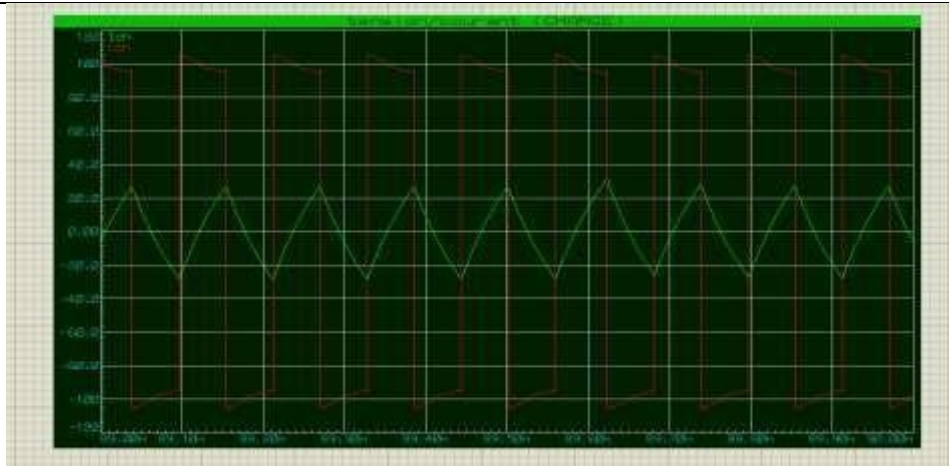


Figure. III.9 : Courbe de tension et courant de charge RL.

III.3.1.4.1 Forme des signaux :

U_{ch} (tension - en rouge) : C'est une onde quasi carrée avec une amplitude d'environ ± 110 V. Cela montre que tu utilises une commande PWM (modulation de largeur d'impulsion) pour contrôler les MOSFETs, probablement depuis l'Arduino.

I_{ch} (courant - en vert) : C'est une onde triangulaire, typique lorsque la charge contient un filtre LC (bobine + condensateur), ce qui indique une filtration correcte du signal.

III.3.1.4.2 Relation entre tension et courant :

On remarque que le courant est en décalage de phase avec la tension, ce qui est normal dans un circuit inductif.

Quand la tension U_{ch} est constante (positive ou négative), le courant augmente ou diminue.

III.3.2 Onduleur en pont à 4 transistors a commandé décalée :

Dans le cadre de notre projet, nous avons réalisé un montage d'un onduleur monophasé en pont complet (H-Bridge), commandé par une carte Arduino Uno. Ce montage permet de convertir une tension continue (DC) en une tension alternative (AC), à l'aide de quatre transistors MOSFET IRF540 pilotés par deux drivers IR2110. La commande est réalisée en mode décalé afin de générer une onde alternative approximative, tout en assurant la protection des composants contre le court-circuit (par un temps mort entre les commutations).

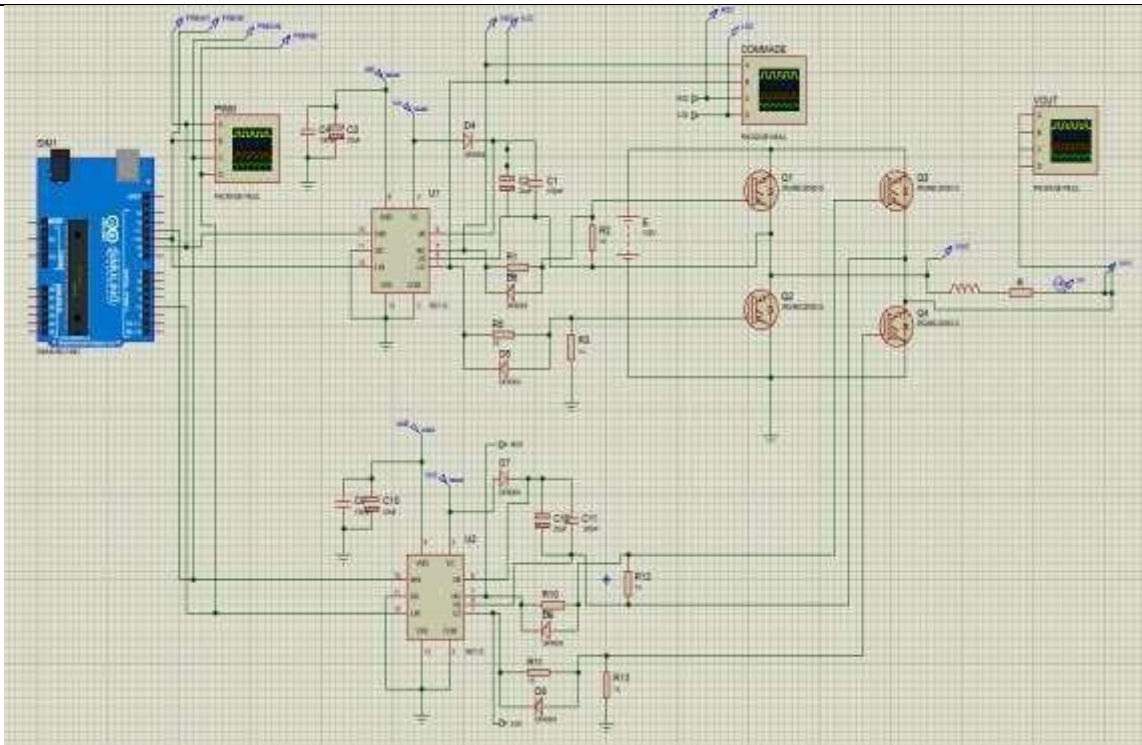


Figure. III.10 : La commande décalée d'un Onduleur en pont à 4 transistors.

III.3.2.1 Petite explication de code :

Ce programme Arduino permet de commander un onduleur monophasé en pont complet en générant des signaux PWM décalés. Il active les transistors MOSFET deux par deux suivant une séquence bien définie (Q1-Q4 puis Q2-Q3), avec un temps mort (β) inséré entre les phases pour éviter les courts-circuits.

- Ce programme Arduino commande un onduleur en pont à 4 transistors
- Il active les transistors en paires opposées (Q1-Q4 puis Q2-Q3) pour créer une tension alternative.
- Un temps mort (β) est ajouté entre les phases pour éviter les courts-circuits.
- La commutation se fait toutes les 20 ms, soit une fréquence de 50 Hz.

III.3.2.2. Résultats de la Simulation et Analyse des Courbes :

III.3.2.2.1. La courbe de tension de charge :

La courbe représente la tension aux bornes de la charge d'un onduleur monophasé en pont complet commandé par un Arduino. Elle montre la variation de la tension de sortie alternative obtenue à partir d'une source continue, grâce à une commande décalée des transistors. La

tension oscille entre des valeurs positives et négatives, ce qui permet d'alimenter une charge AC.

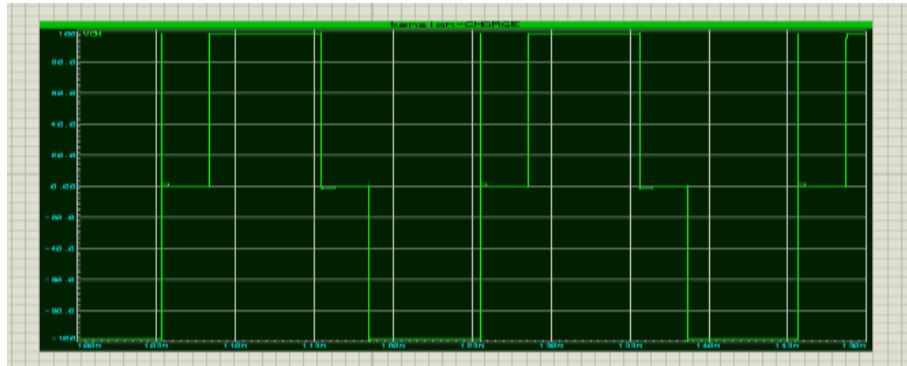


Figure. III.11 : Tension de charge d'un onduleur monophasé en pont complet.

III.3.2.2.1 Interprétation :

On observe une tension alternative en forme d'onde carrée, générée par la commutation des transistors IGBT deux par deux.

La tension passe de +100 V à -100 V, ce qui indique un fonctionnement correct de l'onduleur en mode pont complet.

Chaque demi-cycle dure environ 10 ms, ce qui correspond à une fréquence de 50 Hz.

Le passage par zéro entre les alternances est dû à l'introduction d'un temps mort (β) pour éviter les courts-circuits entre les transistors.

Cela confirme que le système de commande décalée fonctionne efficacement et que la charge est bien alimentée en AC.

III.3.2.2.2 La courbe de courant de charge :

Le graphique que nous examinons représente la forme d'onde du courant électrique en fonction du temps. Il est spécifiquement intitulé "courant-charge", ce qui indique qu'il s'agit du courant circulant dans la charge.

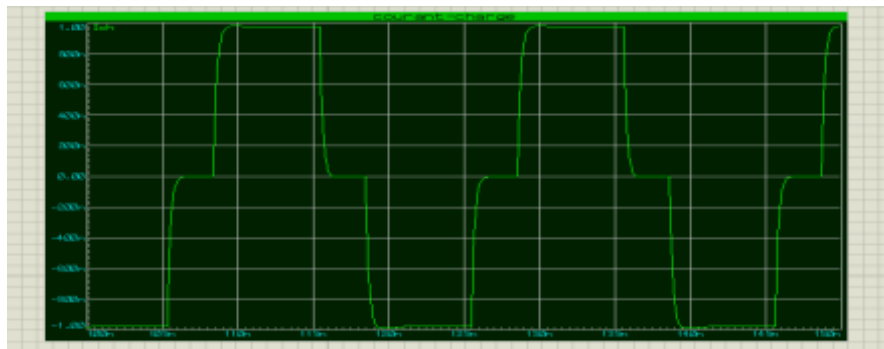


Figure. III.12 : Courant de charge d'un onduleur monophasé en pont complet.

III.3.2.2.1 Interprétation :

Le courant présente une forme d'onde quasi-carrée, alternant régulièrement entre des valeurs positives et négatives. C'est un comportement typique du courant de sortie d'un onduleur en pont complet

C'est la caractéristique la plus révélatrice. Au lieu de transitions verticales abruptes, nous observons des pentes et des courbures nettes aux fronts montants et descendants de chaque impulsion : Cette forme est la signature d'une charge inductive connectée à la sortie de l'onduleur. Une inductance s'oppose à tout changement brusque de courant Par conséquent, lorsque l'onduleur inverse la polarité de la tension appliquée, le courant dans l'inductance ne peut pas changer instantanément.

Ces périodes sont ce qu'on appelle le "temps mort" (Dead Time). C'est une caractéristique de conception essentielle dans les onduleurs en pont. Le temps mort est intentionnellement inséré pour éviter les "court-circuit».

III.3.3 Onduleur en pont à 4 transistors a commandé Symétrique :

Dans cette partie, nous avons utilisé le même schéma que celui de la commande décalée, Le câblage des composants reste inchangé, mais nous avons modifié le code dans la carte Arduino. Cette fois-ci, la commande utilisée est symétrique.

III.3.3.1 Les ondes de courant et tension de charge RL :

- La courbe représente la variation de la tension de sortie alternative obtenue à partir d'une source continue, grâce à une commande symétrique des transistors.

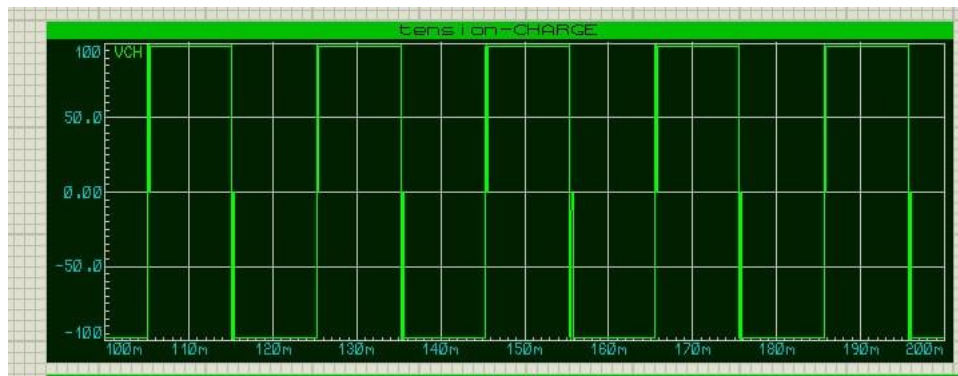


Figure. III.13 : Onde de tension de charge RL a commandé symétrique.

- La courbe représente la variation du courant de sortie alternative obtenue à partir d'une source continue, grâce à une commande symétrique des transistors.

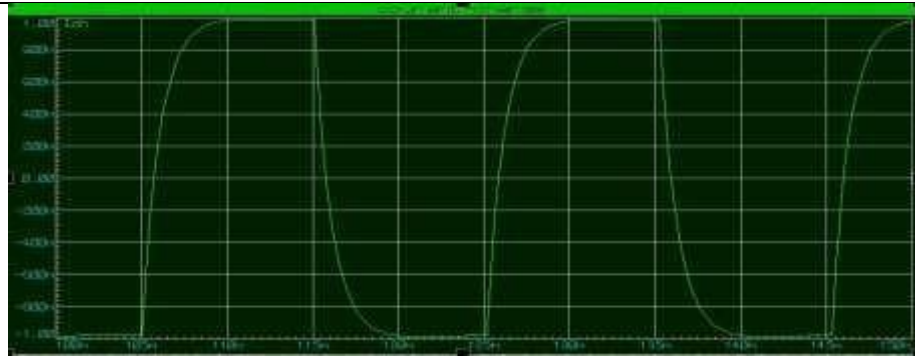


Figure. III.14 : Onde de courant de charge RL par la commande symétrique.

III.3.3.2 Interprétation des résultats :

Nous observons que les deux courbes ont une nature carrée (square-wave like). C'est typique des systèmes de contrôle qui utilisent la commutation rapide. La "Commande Symétrique" indique que les moitiés positives et négatives du cycle sont symétriques, ce qui est clairement visible dans les deux courbes.

- Pour courbe "tension-charge" (Tension aux bornes de la charge) :
 - Phase Positive : Une tension positive est appliquée à la charge pendant une certaine période.
 - Phase Zéro : La tension chute à zéro pendant une courte période. Cela peut indiquer un "temps mort" (dead time) ou une méthode de contrôle spécifique.
 - Phase Négative : Une tension négative est appliquée à la charge pendant une période similaire à la phase positive (en raison de la "Commande Symétrique").
 - Phase Zéro à nouveau : La tension revient à zéro.

Cette tension intermittente et à polarité alternée indique que la charge est alimentée par une source commutée comme un onduleur qui convertit un courant continu en un courant alternatif carré, ou un circuit de commande bidirectionnel.

- Pour Courbe "courant-charge" (Courant à travers la charge) :
 - Temps de Montée Rapide (Rise Time) : Nous observons que le courant monte et descend très rapidement, ce qui suggère que la charge n'est pas purement inductive de manière excessive, sinon la montée et la descente seraient plus lentes et plus lisses.
 - Décroissance (Decay) : Lorsque la tension est retirée (c'est-à-dire quand elle devient nulle), le courant présente une chute abrupte mais pas instantanée à zéro, ce qui suggère la présence d'une composante inductive dans la charge, qui tente de maintenir le courant.
 - Valeurs de Crête : Le courant atteint son pic d'environ 1A dans les directions positive et négative.

Ces courbes montrent clairement que vous avez un système de commande symétrique qui alimente une charge principalement résistive-inductive (Charge RL) avec une tension de forme carrée et à polarité alternée.

La différence subtile est que la commande symétrique génère des tensions plus équilibrées et stables, tandis que la commande décalée peut créer de légers décalages temporels affectant la symétrie des signaux de sortie.

III.3.4 Commande d'un hacheur série monophasé par Arduino:

Dans cette partie, nous avons utilisé le même schéma que précédemment, avec un léger changement dans le code Arduino. Cette fois, seul le transistor Q1 est commandé, afin de tester le fonctionnement simple du hacheur série.

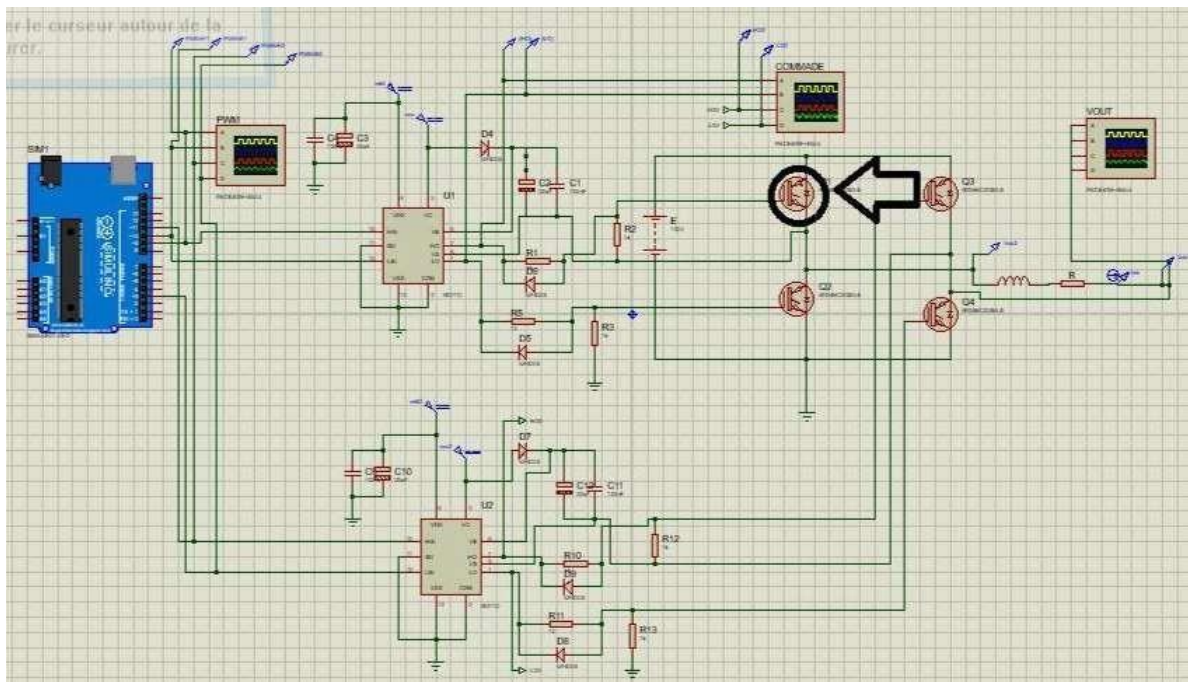


Figure. III.15 : Commande d'un hacheur série monophasé par Arduino

III.3.4.1 Les ondes de courant et tension de charge RL :

- La courbe représente la variation de la tension et courant appliquée à la charge RL, obtenue à partir d'une source continue, grâce à la commutation du transistor Q1 par un Signal PWM dans un hacheur série.

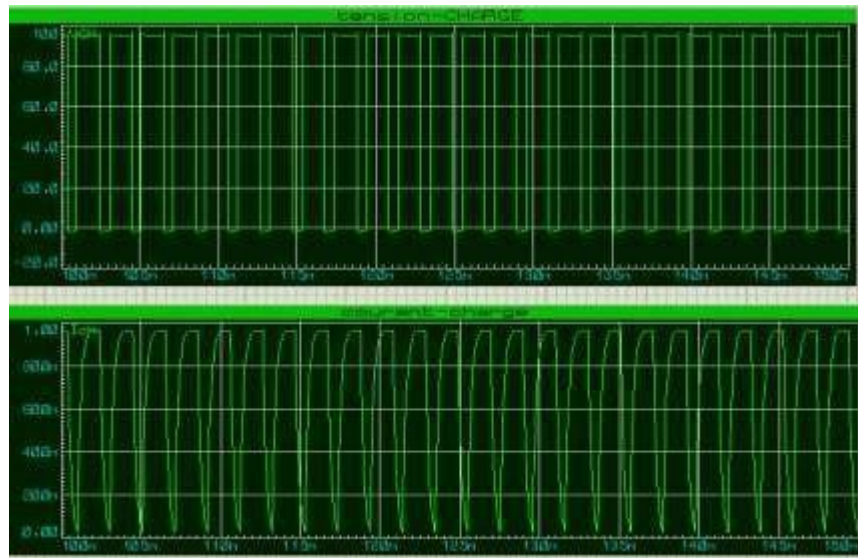


Figure. III.16 : Les ondes de courant et tension de charge RL d'un hacheur série.

III.3.4.1.1 Interprétation les résultats :

□ **Pour la tension de charge :**

- On remarque que la tension de charge présente une forme de **créneaux périodiques**. Elle alterne entre une valeur positive (lorsque l'interrupteur est fermé et que la source alimente la charge) et zéro (lorsque l'interrupteur est ouvert).
- Cela correspond bien au fonctionnement typique d'un **hacheur série**, où la commande de IGBT permet de découper la tension d'entrée et de l'appliquer par impulsions sur la charge.

□ **Pour le courant de charge :**

La forme du courant est **progressive** typique pour une **charge inductive RL**. En raison de la présence de l'inductance (L), le courant ne peut pas varier brutalement.

- Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant augmente progressivement.
- Lorsqu'il est ouvert, le courant diminue lentement, grâce à la continuité assurée par la self.

On observe donc un **courant continu avec une ondulation (ripple)**, mais sans coupures brutales.

III.3.5 Commande d'un hacheur réversible en tension par Arduino:

Dans cette partie, nous avons utilisé le même schéma que précédemment, avec un léger changement dans le code Arduino. Afin de tester le fonctionnement simple du hacheur réversible en tension. Suite à la simulation réalisée, nous avons obtenu les résultats suivants, que nous allons présenter et analyser à l'aide des courbes ci-après :

- On va simuler pour pour $L=10\text{mH}$.
- Nous obtenons les résultats suivants de la tension de charge et du courant de charge :

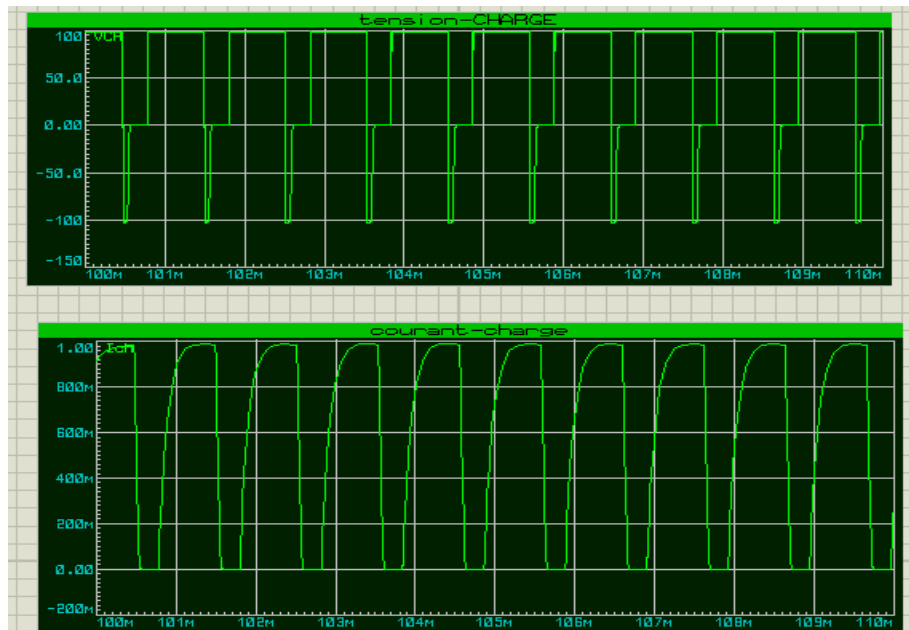


Figure. III. 17 : Les ondes de tension et courant de charge avec $L= 10\text{mh}$.

- Interprétation pour la tension de charge :

On remarque que la tension de charge est de type **pulsé** avec des alternances Entre des valeurs positives et négatives. Cela montre clairement le comportement typique d'un **hacheur réversible en tension**, où la polarité de la tension peut s'inverser suivant l'état de conduction des interrupteurs.

La charge reçoit une tension positive pendant une période, puis une tension négative, ce qui permet un contrôle bidirectionnel de la tension.

- Interprétation pour le courant de charge :

On observe que le courant de charge est présente une forme en **rampes montantes et Descendantes**, typique d'un circuit avec **inductance importante ($L=10\text{mH}$)**.

Grâce à l'inductance, le courant n'a pas de variations brusques malgré les changements rapides de la tension. Il monte progressivement quand la tension appliquée est positive et descend progressivement quand la tension devient négative.

Les résultats obtenus sont cohérents avec le fonctionnement théorique d'un **hacheur réversible en tension** alimentant une charge inductive.

- On va simuler pour Pour $L=100\text{mh}$.
- Nous obtenons les résultats suivants de la tension de charge et du courant de charge :

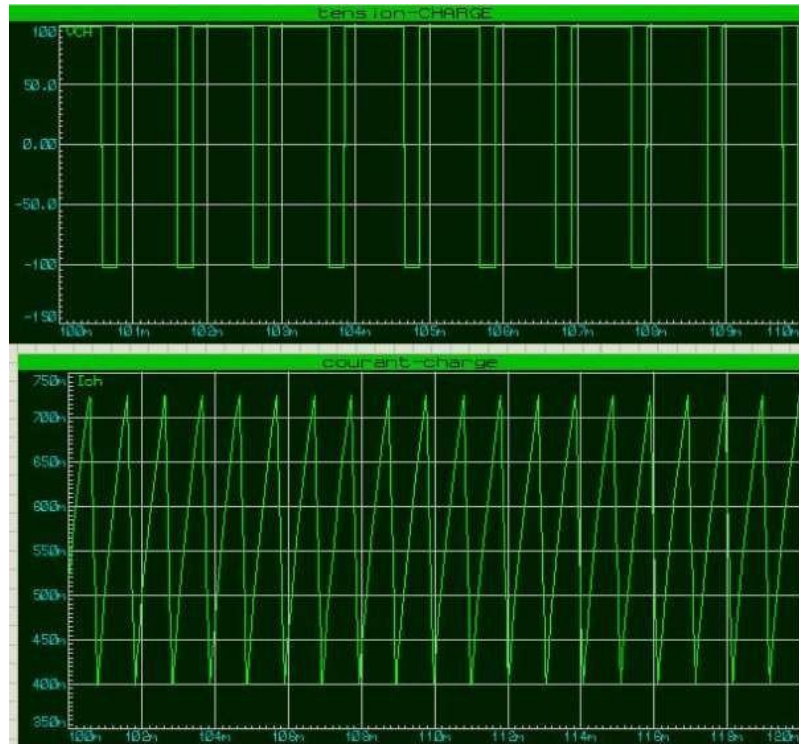


Figure. III. 18 : Les ondes de tension et courant de charge avec $L = 100\text{mH}$.

□ Interprétation pour la tension de charge :

On remarque que la forme de la tension reste **pulsée** avec un régime similaire à celui observé précédemment avec $L = 10\text{mH}$. Cela est normal puisque la forme de la tension dépend principalement de la commande des interrupteurs (transistors) et non directement de la valeur de l'inductance.

□ Interprétation pour le courant de charge :

En comparaison avec le cas où $L = 10\text{mH}$, on observe que le **courant de charge devient plus lisse et** présente beaucoup moins de variations (moins de rappel).

L'augmentation de la valeur de l'inductance (**à 100mH**) entraîne une plus grande opposition aux variations rapides du courant. Par conséquent, le courant évolue de manière plus progressive, avec une ondulation réduite.

L'augmentation de l'inductance de la charge a un effet bénéfique sur la qualité du courant, en réduisant les variations rapides et en améliorant la continuité du courant.

- **La tension reste sous forme de créneaux.**
- Le courant devient plus stable et mieux filtré.

III.4 Réalisation et expérimentation des montages :

Dans cette partie, nous présentons les différentes réalisations pratiques effectuées au laboratoire afin de valider les résultats théoriques et de simulation (on va choisir hacheur série). Chaque montage est testé et analysé expérimentalement.

Dans le graphique III.19 Une alimentation continue est branchée pour délivrer un voltage de 12V à l'équipement. Un logiciel de gestion pour l'arduino UNO est installé sur le système principal, facilitant l'interaction avec l'équipement et la supervision de ses activités. En outre, un oscilloscope et un multimètre sont raccordés pour observer la configuration des ondes électriques à la sortie, facilitant ainsi l'évaluation, l'examen et l'analyse précise du rendement du système.

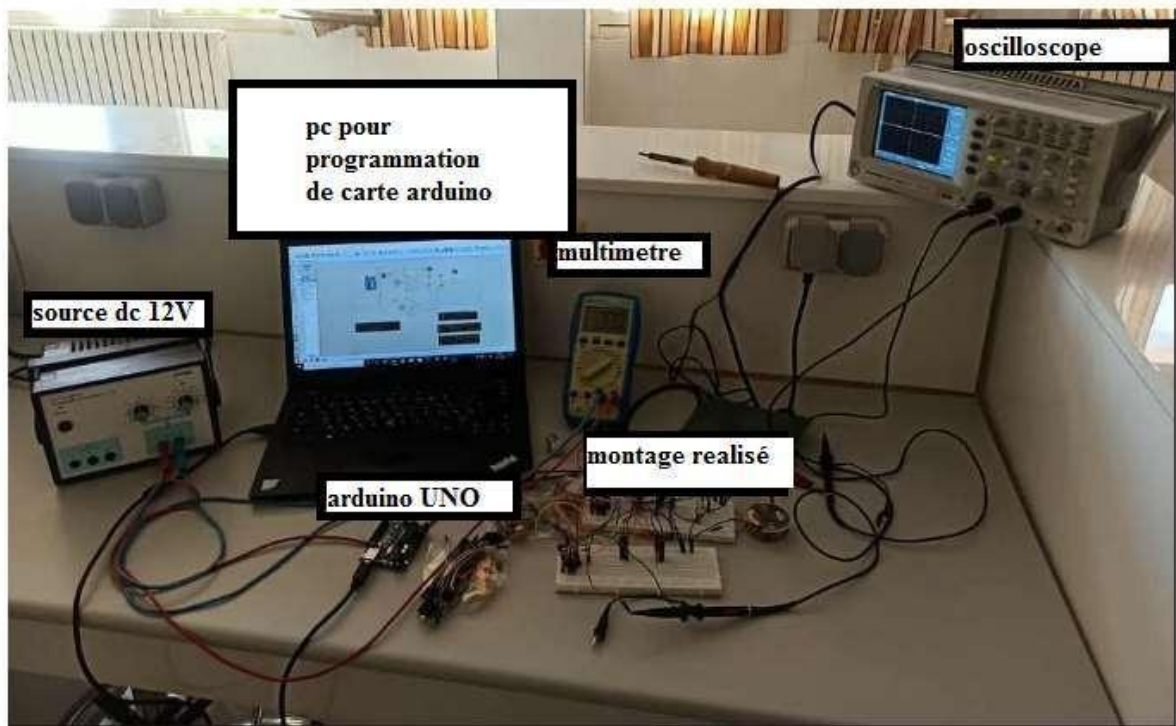


Figure. III.19 : Poste expérimental de commande d'un convertisseur avec Arduino UNO"

III.4.1 Interprétation des résultats :

III.4.1.1 Signal d'entrée :

Le signal d'entrée est continu 12v est visualisé à l'aide de l'oscilloscope et illustré sur la figure.III.20.

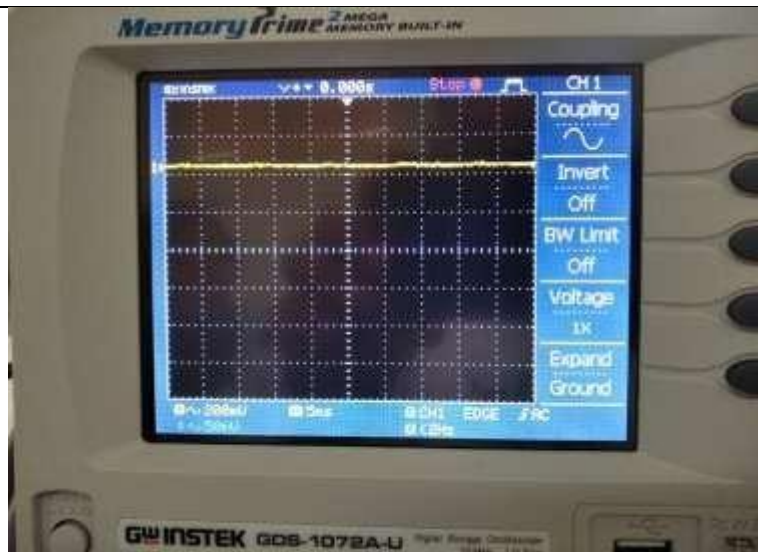


Figure. III.20 : Signal continue d'entrée.

III.4.1.2 Signal de commande :

La commande du hacheur est assurée par un signal PWM généré par l'Arduino. Ce signal permet de contrôler l'état de l'interrupteur de puissance (MOSFET ou IGBT). La figure III.21 suivante illustre la forme de :

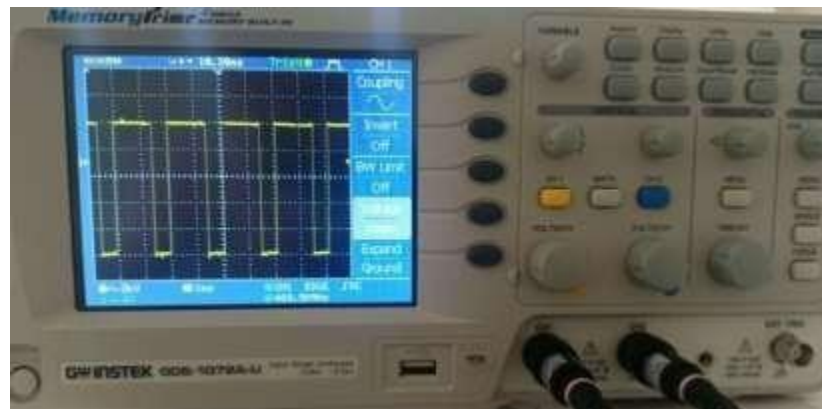


Figure. III.21: Signal de commande.

III.4.1.3 Tension de sortie :

L'interrupteur de puissance est en état de conduction (ON), la charge reçoit une tension égale à la tension d'alimentation (V_{in}). Lorsque l'interrupteur est ouvert (OFF), la tension aux bornes de la charge chute pratiquement à zéro.

Ce comportement est caractéristique du fonctionnement d'un hacheur série avec charge résistive, sans Influence d'inductance. Les transitions entre les états ON et OFF sont presque instantanées et sans déformation."

La figure III. 22 représente le signal carré de fréquence d'amplitude maximale qui vaut 5V affiché sur l'oscilloscope :



Fig.III.22 : Tension à la sortie du circuit vue sur l'oscilloscope.

Lors de la réalisation des expériences pratiques, nous avons constaté que les résultats obtenus ne correspondaient pas exactement aux attentes théoriques et aux résultats de la simulation. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces écarts, notamment :

- La qualité des composants électroniques utilisés,
- D'éventuelles erreurs de câblage,
- La présence de parasites et de perturbations électriques dans le montage,
- Les limitations liées aux équipements de mesure disponibles au laboratoire

III.4 Conclusion :

Ce chapitre a marqué la transition vers l'aspect expérimental, en combinant la simulation via ISIS Proteus et le pilotage à l'aide de la carte Arduino, notamment grâce à la génération de signaux PWM pour commander les hacheurs et les onduleurs. Cette phase a permis de valider, par simulation, le comportement des circuits étudiés.

Des essais pratiques ont également été réalisés, afin d'évaluer la faisabilité réelle du système conçu. Si les résultats de simulation ont été globalement satisfaisants, les résultats expérimentaux ont révélé certaines limitations, dues à des contraintes matérielles, des interférences ou des instabilités dans l'alimentation.

Malgré ces difficultés, cette étape a permis de mieux appréhender les enjeux techniques liés à la mise en œuvre réelle de ces convertisseurs, tout en consolidant les acquis théoriques.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Ce travail de fin d'études intitulé « *Étude, commande et réalisation d'un ensemble expérimental hacheur-onduleur* » nous a permis d'aborder et de maîtriser plusieurs aspects fondamentaux de l'électronique de puissance.

Dans un premier temps, nous avons effectué une étude théorique approfondie afin de comprendre le fonctionnement des hacheurs et des onduleurs, leurs différentes structures et leurs domaines d'application industrielle.

Ensuite, nous avons développé la commande appropriée en utilisant des techniques de modulation adaptées, avec une implémentation via Arduino pour la génération des signaux de commande nécessaires. L'utilisation de Matlab/Simulink nous a également permis de simuler le comportement dynamique de l'ensemble afin de valider les choix effectués au niveau de la commande.

La dernière étape de notre projet a concerné la réalisation pratique de l'ensemble expérimental en laboratoire, à l'aide de la plateforme Arduino et du logiciel de simulation ISIS Proteus. Malgré certaines difficultés rencontrées au cours de l'implémentation expérimentale, notamment des écarts entre la simulation et les résultats réels, nous avons pu identifier et analyser les principales sources d'erreurs potentielles, telles que la qualité des composants, le parasitage et les limitations matérielles.

Ce projet nous a permis de développer des compétences transversales en conception de circuits de puissance, en commande de dispositifs électroniques, en programmation embarquée et en interprétation de résultats expérimentaux.

Pour les perspectives futures, nous envisageons d'améliorer la qualité des montages réalisés, d'utiliser des drivers de commande plus performants, et de poursuivre l'optimisation des algorithmes de modulation pour obtenir un meilleur rendement et une meilleure qualité de signal de sortie.

En conclusion, ce projet a été pour nous une expérience formatrice et enrichissante, combinant théorie, simulation et expérimentation, tout en renforçant notre capacité d'analyse et notre esprit critique dans le domaine de l'électronique de puissance.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Source non précisée. Définition technique classique d'un hacheur série, trouvée dans plusieurs cours ou manuels d'électronique de puissance.
- [2] : TS Génie Électrique. (s.d.). *Hacheur série*. Consulté le 25 juin 2025, sur <http://sa.ge.sts.free.fr/Wiki/pmwiki>
- [3] : TS Génie Électrique. (s.d.). *Hacheur série*. Consulté le 25 juin 2025, <http://sa.ge.sts.free.fr/Wiki/pmwiki.php?n=SA.HacheurParall%c3%a8le>
- [5] : Université Abdelhafid Boussouf de Mila, Chapitre 1 les hacheur , consulté le 25 juin 2025, sur <https://share.google/VT2udwPBTnvT12PL7>
- [8] : TS Génie Électrique. (s.d.). *Hacheur série*. Consulté le 25 juin 2025, <http://sa.ge.sts.free.fr/Wiki/pmwiki.php?n=SA.Hacheur2QReversibleTension>
- [10] : Nadia, Adjimi, and Belaidi Wahiba. "Modélisation et commande d'un onduleur MLI." Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi (2009).
- [11] : <http://sa.ge.sts.free.fr/Wiki/pmwiki.php?n=SA.OnduleurPontDecaleCourbes> .
- [12] : GHORZI Zoulikha Mimouni Amina <<Stratégies de commande des onduleurs>> Mémoire Master école supérieure en sciences appliquée Tlemcen.2019
- [13] : MERHOUM Amina. Optimisation Des Techniques De MLI Pour Les Equipements FACTS A Base D'onduleur. Mémoire de magister. Université d'Oran.2013
- [15] : Dib, D. (s.d.). *Single phase Sine-Triangle Modulation* [Figure]. ResearchGate Consulté sur <https://www.researchgate.net>
- [16] : Jean- Noël, « livret Arduino en français », centre de ressources art sensitive.2006