



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغزور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :

Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques

Présenté par
Tamrabet Oussama
&
Djermoune Mousaab

THEME

**Réalisation d'un Onduleur Triphasé dédié à la
commande de la Machine Asynchrone à cage**

Soutenu le : ... / 06 / 2023 devant la commission d'examen composée de :

<i>Dr. Chaiba Azzedine</i>	<i>Professeur</i>	<i>à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela</i>	<i>Président</i>
<i>Dr. Beddiaf Yassine</i>	<i>MCA</i>	<i>à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela</i>	<i>Encadrant</i>
<i>Dr. Benhadda Nabil</i>	<i>MCA</i>	<i>à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela</i>	<i>Examineur</i>

Promotion 2022/2023



Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur : Monsieur **BEDDIAF YASSINE***

Ou on a eu l'honneur d'être parmi vos élèves et de bénéficier de votre riche enseignement. Vos qualités pédagogiques et humaines sont pour nous un modèle. Votre gentillesse, et votre disponibilité permanente ont toujours suscitée notre admiration.

Votre compétence, votre encadrement ont toujours suscité notre profond respect.

On vous remercie pour votre accueil et vos conseils.

Tous nos respect et nos remerciements vont vers les membres du jury qui vont pleinement consacrer leur temps et leur attention afin d'évaluer nos travail, qui espérons le sera à la hauteur de leur attente.

Enfin, nos remerciements les plus sincères sont adressés à toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste mémoire.



Dédicace

*Tout d'abord, je tiens à remercier **D.F.E.U** De m'avoir
Donné la force et le courage de mener à bien ce modeste
travail.*

Je tiens à dédier cet humble travail à :

A ma tendre mère et mon très cher père

*Et tous mes frères et leurs enfants **Anas, Djenane,
Mohamed***

Sans oublier tous ses professeurs d'électrotechnique

Et toute ma famille et tous mes amis ...

Et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

*A mon encadreur **Mr Beddiaf Yassine***





Dédicace

*Tout d'abord, je tiens à remercier **D.F.E.U** De m'avoir
Donné la force et le courage de mener à bien ce modeste
travail.*

Je tiens à dédier cet humble travail à :

A ma tendre mère et mon très cher père

*Et tous mes frères et leurs enfants **MAYSEM***

Sans oublier tous ses professeurs d'électrotechnique

Et toute ma famille et tous mes amis ...

Et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

*A mon encadreur **Mr Beddiaf Yassine***



D.MOUSAAB



Table de matières



Promotion 2023

Table de Matière

- ✚ Remerciements
- ✚ Dédicaces
- ✚ Sommaire
- ✚ Liste des figures

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Modélisation DE l'onduleur de tension triphasé

I.1 INTRODUCTION	2
I.2 CLASSIFICATION DES ONDULEURS	2
I.2.1 Onduleurs non autonomes	2
I.2.2 Onduleurs autonomes	2
I.2.3 Onduleurs à résonance	3
I.3 TYPES D'ONDULEURS AUTONOMES DE TENSION	3
I.3.1 Les onduleurs monophasés	3
I.3.2 Les onduleurs triphasés	4
I.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'ONDULEUR TRIPHASE.....	5
I.5 MODELE MATHEMATIQUE DE L'ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE.....	5
I.6 DOMAINES D'APPLICATION.....	7
I.7 CONCLUSION	8

CHAPITRE II : TECHNIQUES DE COMMANDE DE L'ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE

II.1 INTRODUCTION.....	8
II.2 COMMANDE 180°.....	8
II.2.1 Schéma de bloc de simulation	11
II.2.2 Résultats de simulation	12
II.2.3 Interprétation	13
II.3 LA COMMANDE MLI	13
II.3.1 Différentes techniques de modulation de longueur d'impulsions (MLI).....	13
II.3.2 Caractéristiques de la modulation.....	16
II.3.3 Principe de base.....	17
II.3.4 Le schéma de bloc	17
II.3.5 Résultats de simulation.....	18

II.4 Conclusion.....	19
CHAPITRE III : Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone	
III.1 INTRODUCTION	19
III.2. TYPES DE LA COMMANDE VECTORIELLE	24
III.2.1. Commande vectorielle directe	24
III.2.2. Commande vectorielle indirecte	25
III.3. STRUCTURE DE LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA MAS ALIMENTEE EN TENSION ...	26
III.3.1 Expression générale du moteur	26
III.3.2. Système d'équations liées au flux rotorique	26
III.3.3 Découplage entré-sortie	28
III.4 REGULATION.....	29
III.4.1 Régulation de Courant	30
III.4.2 Régulation De Vitesse	32
III.5 MODE DEFLUXAGE.....	32
III.6 SIMULATION NUMERIQUE.....	33
III.7 PRESENTATION DES RESULTANTS DE SIMULATION.....	34
III.7.1 Simulation avec variation de la charge	34
III.8 CONCLUSION.....	36
CHAPITRE IV : La réalisation pratique de l'onduleur commandé par Arduino	
IV.1 INTRODUCTION	37
IV.2 DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI REALISE	37
IV.3 GENERALITES SUR L'ARDUINO	38
IV.3.1 Le choix de la carte Arduino :	38
IV.3.2 Caractéristiques de la carte Arduino Uno :	41
IV.3.3 Alimentation de la carte ARDUINO :	41
IV.3.4 Les entrées & sorties.....	42
IV.4 PROGRAMMATION DE LA CARTE ARDUINO :.....	43
IV.5 STRUCTURE DU PROGRAMME.....	44
IV.6 SCHEMA DE SIMULATION DE L'ONDULEUR TRIPHASE SOUS (PROTEUS)	46
IV.6.1 Résultats de Simulation	47
IV.7 PROGRAMME DE REALISATION DE LA PWM PAR ARDUINO	48
IV.8 REALISATION PRATIQUE DE L'ONDULEUR	49

IV.9 CONCLUSION.....	51
CONCLUSION GENERALE	51
BIBLIOGRAPHIES	52
ANNEXES	55



Liste des figures



Promotion 2023

Liste des figures

Figure (I.1) : Schéma de principe de l'onduleur.

Figure (I.2) : Schéma de principe de l'onduleur monophasé.

Figure (I.3) : Schéma d'onduleur de tension triphasé.

Figure (II.1) : Schéma de principe de l'onduleur triphasé commandé à 180° .

Figure (II.2) : Schéma synoptique des signaux de commande à 180° .

Figure (II.3) : Schéma fonctionnel de la commande pleine onde.

Figure (II.4) : Les tensions triphasées à la sortie de l'onduleur.

Figure (II.5) : Les courants de lignes.

Figure (II.6) : La modulation de largeur d'impulsions multiples.

Figure (II.7) : MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire.

Figure (II.8) : La modulation sinusoïdale modifiée.

Figure (II.9) : MLI avec l'injection de l'harmonique 3.

Figure (II.10) : Schéma de base MLI.

Figure (II.11) : Schéma fonctionnel de la commande MLI.

Figure (II.12) : Allure de tensions des signaux de commande.

Figure (II.13) : Signaux de la commande MLI.

Figure (III.1) : Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer).

Figure (III.2) : Analogie de la machine asynchrone avec le moteur à courant continu [20].

Figure (III.3) : Description des couplages [24].

Figure (III.4) : structure de la commande par orientation du flux rotorique.

Figure (III.5) : Reconstitution des tensions.

Figure (III.6) : Commande par orientation du flux avec découplage entrée sortie [18].

Figure (III.7) : Caractéristiques de la réponse des systèmes.

Figure (III.8) : Boucle de courant après découplage.

Figure (III.9) : Boucle de régulation de vitesse à structure PI.

Figure (III.10) : Boucle de régulation de vitesse structure IP.

Figure (III.11) : Opération en mode défluxé.

Figure (III.12) : Schéma d'une commande vectorielle indirecte du flux d'une MAS alimentée en tension

Figure (III.13) : Le couple.

Figure (III.14) : Vitesse de rotation.

Figure (III.15) : Le flux.

Figure (III.16) : Courant statorique.

Figure (III.17) : Erreur de la vitesse.

Figure (III.18) : Tensions.

Figure (III.19) : Le flux quadratique (Wb).

Figure (III.20) : Le flux direct (Wb).

Figure (IV.1) : Schéma bloc du banc d'essai.

Figure (IV.2) : Carte Arduino UNO Basique.

Figure (IV.3) : Structure de la carte ARDUINO-UNO [13].

Figure (IV.4) : Le connecteur de la carte.

Figure (IV.5) : Description de la carte Arduino (entrées / sorties).

Figure (IV.6) : Environnement de programmation.

Figure (IV.7) : Schéma de simulation de la commande de l'onduleur.

Figure (IV.8) : Forme de l'onde des tensions à la sortie de l'onduleur.

Figure (IV.9) : Circuit imprimé de l'onduleur à six interrupteurs IRF.

Figure (IV.10) : Photo du Banc d'essai.

Figure (IV.11) : Forme des signaux de commande (PWM).

Figure (IV.12) : Forme d'onde des tensions issues de l'onduleur commandé à pleine onde avec filtrage.

Figure (IV.13) : Forme d'onde des tensions issues de l'onduleur commandé à fréquence élevée sans filtrage



Introduction générale



Promotion 2023

Introduction Générale

Les entraînements des machines électriques asynchrones à vitesse variable exigent de plus en plus de hautes performances, une fiabilité accrue, et un coût réduit.

Plusieurs chercheurs dans le domaine de la commande ont orienté leur recherches vers l'amélioration des performances de la commande des machines asynchrones car celles-ci ont en effet de nombreux avantages : coût de fabrication réduit, construction relativement simple, support des surcharges, vitesse de rotation plus élevée et n'exigent pas d'entretien permanent. L'inconvénient de cette catégorie de machines réside dans la complexité de leur fonctionnement, car elles se comportent comme des systèmes multi variables, non linéaires et fortement couplés, d'où la difficulté de leur commande.

L'électronique de puissance et de la micro-informatique, permet de réaliser des convertisseurs qui sont associés à une électronique numérique de commande permettant l'implantation de puissants algorithmes de contrôle en temps réel.

Parmi les solutions envisagées ; l'insertion à la machine un convertisseur (onduleur) à M.L.I (Modulation à Largeur d'Impulsions) ; dans notre projet on a implémenté la commande vectorielle d'un moteur asynchrone triphasé à cage sous l'environnement Matlab/Simulink.

Notre travail est réalisé selon le plan suivant :

- **Le premier chapitre** s'articule sur la Modélisation de l'onduleur triphasé.
- **Le deuxième chapitre** présente la Techniques de commande de l'onduleur de tension triphasé.
- **Le troisième chapitre** est consacré à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone. une simulation d'association de la M.A.S avec onduleur à MLI alimenté par une source d'alimentation de fréquence variable sous l'environnement Matlab/Simulink.
- **Le quatrième chapitre** est consacré à la simulation sous le logiciel Proteus de la commande de l'onduleur en premier lieux puis en deuxième lieu à la réalisation pratique de l'onduleur commandé par Arduino-UNO R3.A la fin de ce travail, une conclusion générale résumera l'ensemble des résultats obtenus, des recommandations et des suggestions sur les travaux futurs de ce domaine.



Chapitre I



CHAPITRE I :
Modélisation DE l'onduleur de tension triphasé



Promotion 2023

I.1 Introduction

Un onduleur triphasé est un convertisseur statique qui convertit une source d'alimentation continue en une alimentation alternative alimentant une source triphasée.

Dans ce chapitre ; on va présenter la modélisation mathématique d'un onduleur de tension triphasé ; ceci dans le but de bien comprendre son fonctionnement. La représentation symbolique d'un onduleur est illustrée par la figure (I.1).

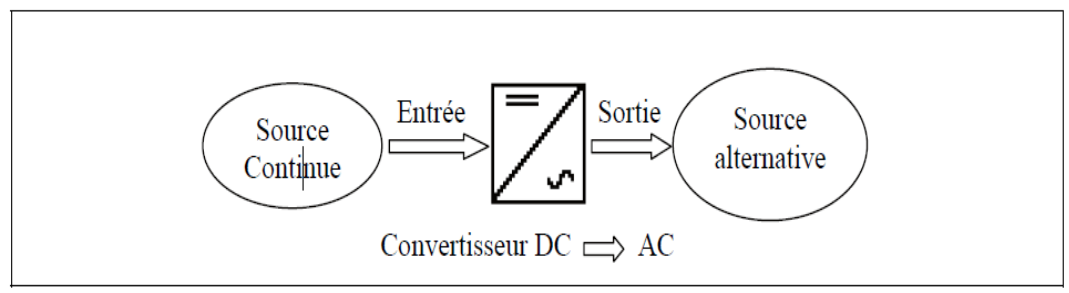


Figure (I.1) : Schéma de principe de l'onduleur.

I.2 Classification des onduleurs

Une première classification peut être faite en distinguant : l'onduleur non autonome et l'onduleur autonome. Entre ces deux types d'onduleurs, il existe un type intermédiaire d'onduleur appelé onduleur à commutation par la charge « ou encore onduleur à résonance ».

I.2.1 Onduleurs non autonomes

Un onduleur est dit non autonome si l'énergie nécessaire pour la commutation des thyristors est fournie par le réseau alternatif qui est donc un réseau actif. C'est le cas du fonctionnement en onduleur des redresseurs. La fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau alternatif.

I.2.2 Onduleurs autonomes

Un onduleur autonome est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie.

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer :

I.2.2.1 Onduleurs (autonomes) de tension

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension « u » n'est pas affecté par les variations du courant « i » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

Le courant à la sortie « i' » et donc le courant à l'entrée « i » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f.e.m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie.

I.2.2.2 Onduleurs (autonomes) du courant

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

I.2.3 Onduleurs à résonance

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle- ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome [1].

I.3 Types d'onduleurs autonomes de tension

I.3.1 Les onduleurs monophasés

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue, cela correspond à :

L'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push- pull. La figure (I.2) illustre un onduleur monophasé en pont à quatre interrupteurs.

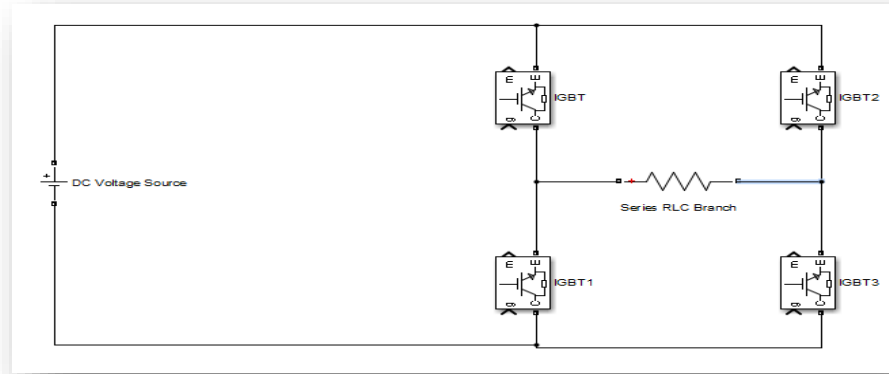


Figure (I.2) : Schéma de principe de l'onduleur monophasé.

I.3.2 Les onduleurs triphasés

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

Chaque bras comprend deux thyristors (ou transistors) et une diode. La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur ou autre comme une batterie.

Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b , I_c et d'éviter le court-circuit des phases, les interrupteurs S_1 , $S'1$ et S_2 , $S'2$, S_3 et $S'3$ doivent être complémentaires deux à deux.

On définit $S_i = (T_i, D_i)$ [4].

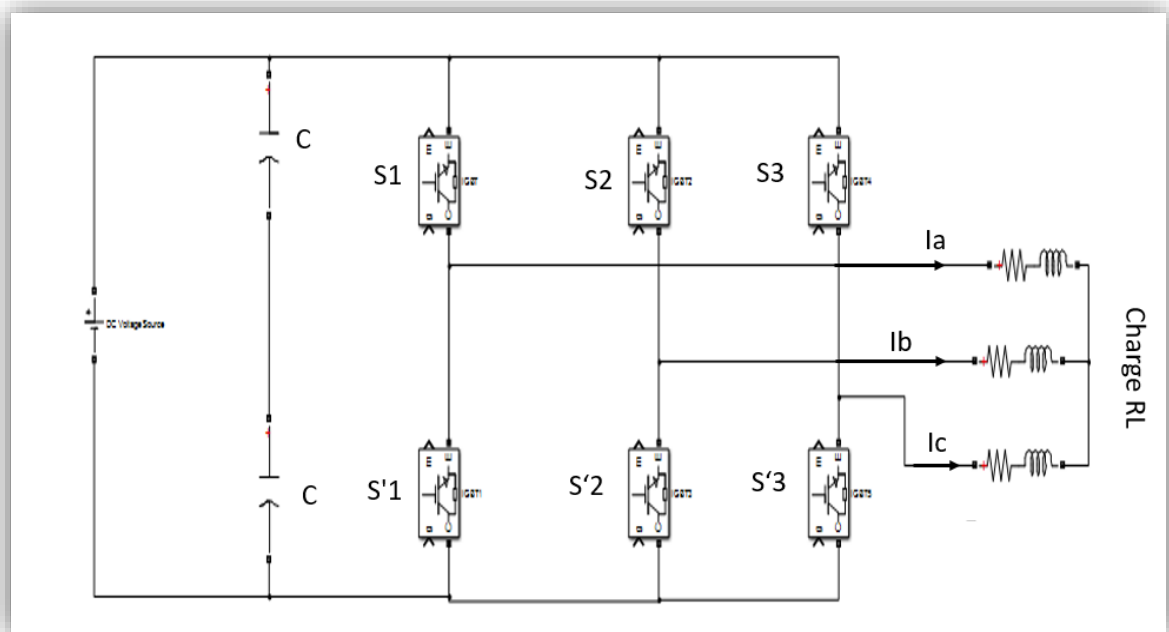


Figure (I.3) : Schéma d'onduleur de tension triphasé.

I.4 Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé

La représentation schématique de l'onduleur est fournie par la (figure I.3) Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b et I_c , les interrupteur $S1$ et $S1'$, $S2$ et $S2'$, $S3$ et $S3'$ doivent être complémentaire deux à deux, et pour que les tensions de sortie V_a , V_b et V_c soient identiques à un tiers de la période T de leur fondamental prés, il faut commander chaque demi pont avec un retard de $T/3$ sur le précédent. En commande pleine onde on ferme donc :

$$S1 \text{ pour } \omega t = 0 \text{ et } S1' \text{ pour } \omega t = \pi.$$

$$S2 \text{ pour } \omega t = 2\pi/3 \text{ et } S2' \text{ pour } \omega t = \pi + 2\pi/3$$

$$S3 \text{ pour } \omega t = 4\pi/3 \text{ et } S3' \text{ pour } \omega t = \pi + 4\pi/3$$

La présence du neutre relié à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibré et tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre. Si le récepteur triphasé est équilibré (moteur triphasé par exemple) on peut supprimer la liaison entre le point neutre « N » et le point milieu « 0 » de la source, Donc supprimer celui-ci, on obtient alors l'onduleur triphasé proprement dit [5].

I.5 Modèle mathématique de l'onduleur de tension triphasé

Les interrupteurs $S1$ et $S1'$, $S2$ et $S2'$, $S3$ et $S3'$ doivent être complémentaires deux à deux, quel que soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons pour la commande MLI ; quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A, B, C et le point milieu (fictif) 'O' de la source de tension.

$$\left\{ \begin{array}{ll} V_a - V_0 = \frac{V_{dc}}{2}; S1 \text{ fermé} & \text{Et} \quad V_a - V_0 = -\frac{V_{dc}}{2} S1 \text{ ouvert} \\ V_a - V_0 = \frac{V_{dc}}{2}; S2 \text{ fermé} & \text{Et} \quad V_b - V_0 = -\frac{V_{dc}}{2} S2 \text{ ouvert} \\ V_a - V_0 = \frac{V_{dc}}{2}; S3 \text{ fermé} & \text{Et} \quad V_c - V_0 = -\frac{V_{dc}}{2} S3 \text{ ouvert} \end{array} \right. \quad (\text{I.1})$$

Les interrupteurs imposent donc les tensions composées à la sortie de l'onduleur ainsi pour la première de ces tensions.

$$\begin{cases} V_a - V_b = (V_a - V_0) - (V_a - V_0) = V_{dc} \text{ Si S1 est fermé et S2 est ouvert} \\ V_a - V_b = (V_a - V_0) - (V_b - V_0) = 0 \text{ Si S1 et S2 sont fermés} \\ V_a - V_b = (V_a - V_0) - (V_b - V_0) = 0 \text{ Si S1 et S2 sont ouverts} \\ V_a - V_b = (V_a - V_0) - (V_b - V_0) = -V_{dc} \text{ Si S1 est ouvert et S2 est fermé} \end{cases} \quad (\text{I.2})$$

Son point neutre étant isolé, si le récepteur est équilibré on peut passer des tensions composées aux tensions simples V_a, V_b, V_c à la sortie de l'onduleur.

Pour que, quelle que soit leurs formes d'ondes, les trois courants I_A, I_B, I_C aient une somme nulle, il faut que leurs trois fondamentaux aient une somme nulle et qu'il en soit de même pour les divers harmoniques.

Si le récepteur est équilibré, ces trois phases présentent la même impédance pour le fondamental ainsi que pour les divers harmoniques, les produits impédances 'Z'- courants, c'est à- dire les tensions ont une somme nulle pour les fondamentaux ainsi que les systèmes harmoniques successifs, en ajoutant toutes ces sommes on obtient la somme nulle des trois tensions [4].

A l'équilibre on peut écrire:

$$\begin{cases} I_A + I_B + I_C = 0 \\ V_a + V_b + V_c = 0 \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

Donc :

$$\begin{cases} U_{ab} - U_{ca} = (V_a - V_b) - (V_c - V_a) = 2V_a - V_b - V_c \\ U_{bc} - U_{ab} = (V_b - V_c) - (V_a - V_b) = -V_a \pm 2V_b - V_c \\ U_{ca} - U_{bc} = (V_c - V_a) - (V_b - V_c) = 2V_c - V_b - V_a \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Et on a :

$$\begin{cases} V_a = -V_b - V_c \\ V_b = -V_a - V_c \\ V_c = -V_a - V_b \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

Donc :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) = \frac{1}{3}[(V_a - V_b) - (V_c - V_a)] \\ V_b = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) = \frac{1}{3}[(V_b - V_c) - (V_a - V_b)] \\ V_c = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) = \frac{1}{3}[(V_c - V_a) - (V_b - V_c)] \end{cases} \quad (\text{I.6})$$

On obtient finalement :

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3}[2(V_a - V_0) - (V_b - V_0) - (V_c - V_0)] \\ V_b = \frac{1}{3}[-(V_a - V_0) + 2(V_b - V_0) - (V_c - V_0)] \\ V_c = \frac{1}{3}[-(V_a - V_0) - (V_b - V_0) + 2(V_c - V_0)] \end{cases} \quad (\text{I.7})$$

Si VAO, VBO et VCO sont les tensions d'entrée de l'onduleur (valeur continues), alors VA, VB et VC sont les tensions de sorties de cet onduleur (valeurs alternatives), par conséquent, L'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu - alternatif (DC-AC).

$$[\mathbf{T}] = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad (\text{I.8})$$

On aura alors :

$$[\text{VAC}] = [\mathbf{T}] \cdot [\text{VDC}]$$

Avec : $[\text{VAC}] = [V_A \ V_B \ V_C]^T$: Tension alternative équilibrée. (I.9)

Et $[\text{VDC}] = [V_{AO} \ V_{BO} \ V_{CO}]^T$: Tension continue.

I.6 Domaines d'application

Les onduleurs ont été conçus essentiellement pour fonctionner dans les domaines d'applications suivants :

- a) Les alimentations sans interruption (ASI) : Certaines applications sensibles (secteur pétrolier, hôpitaux, serveurs informatiques...) ne peuvent supporter la moindre panne d'alimentation.

Pour réaliser une alimentation sécurisée, on a la même structure que précédemment avec de batteries sur le bus continue, ce qui permet de continuer à fournir de l'énergie et donc une tension sinusoïdale le temps qu'un groupe électrogène prenne le relais. (Rq : onduleurs plus souvent en monophasé).

Les onduleurs de contrôle des actionneurs sont pilotés par des algorithmes plus ou moins compliqués (contrôle vectorieletc).

- b) La variation de la vitesse : Comme les machines asynchrones et les machines synchrones, le réglage de la vitesse de ces machines nécessite la variation de la fréquence de leur tension d'alimentation. Pour répondre à ce besoin, on réalise donc un onduleur dont les tensions de sortie présentent une fréquence variable.

I.7 Conclusion

L'objectif de ce premier chapitre est la modélisation mathématique de l'onduleur de tension triphasé, nous avons présenté au premier lieu des généralités sur les onduleurs (définition, leurs classifications, et leur domaines d'application). Puis nous avons donné le principe de fonctionnement de l'onduleur avec son schéma de puissance. Et finalement, nous avons obtenu le modèle mathématique de l'onduleur qu'est, tout simplement, une matrice carrée dite matrice de transfert. Après cette modélisation, nous étudierons les différentes techniques de commande dans le prochain chapitre.



Chapitre II



CHAPITRE II :
*Techniques de commande de l'onduleur de
tension triphasé*



Promotion 2023

II.1 Introduction

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. A faibles fréquences, ils sont pilotés à pleine onde, le signal de commande sera à la fréquence de la tension désirée à la sortie, et la source continue peut être réglable (à l'aide d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur).

A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet de régler la fréquence.

Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande seront présentés [36] :

1. Commande pleine onde ou 180° .
2. Commande MLI.

II.2 Commande 180°

Dans les variateurs de vitesse, l'onduleur de tension fonctionne presque toujours en MLI dans toute la plage des vitesses. L'onduleur fait varier la fréquence des tensions de sortie.

Dans ce type de commande, la génération des signaux de commande de l'onduleur est effectuée en transformant un signal sinusoïdal en un signal carré pour chaque phase selon l'algorithme suivant :

$$\text{Si } \sin(\omega.t) > 0 \rightarrow S(t)=1 \quad \text{Si } \sin(\omega.t) < 0 \rightarrow S(t)=0 \quad \text{Où :}$$

$\sin(\omega.t)$: est le signal sinusoïdal ; $S(t)$: est le signal carré résultant de la commande.

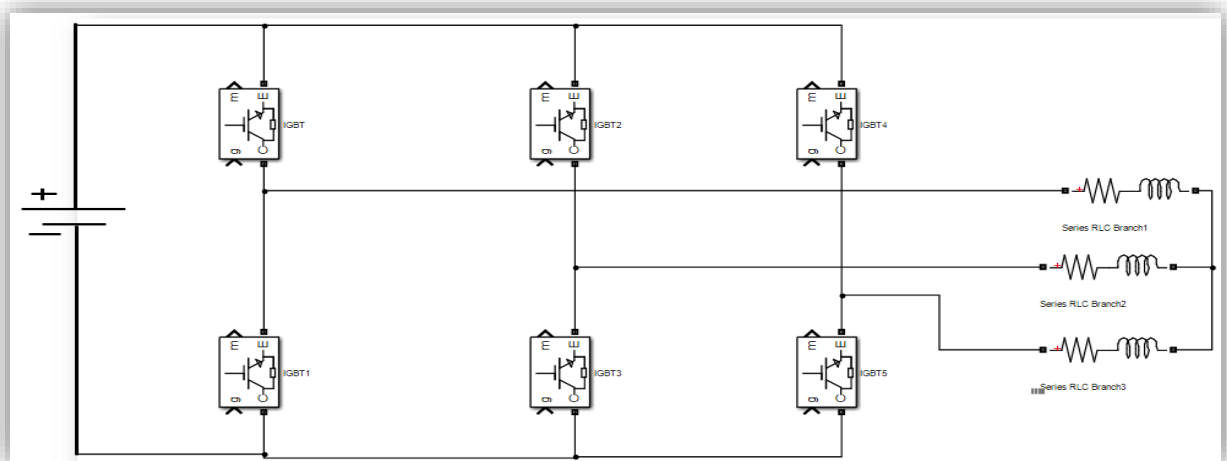


Figure (II .1) : Schéma de principe de l'onduleur triphasé commandé à 180° .

Les signaux de commande à 180° sont illustrés par la figure (II.2) suivante :

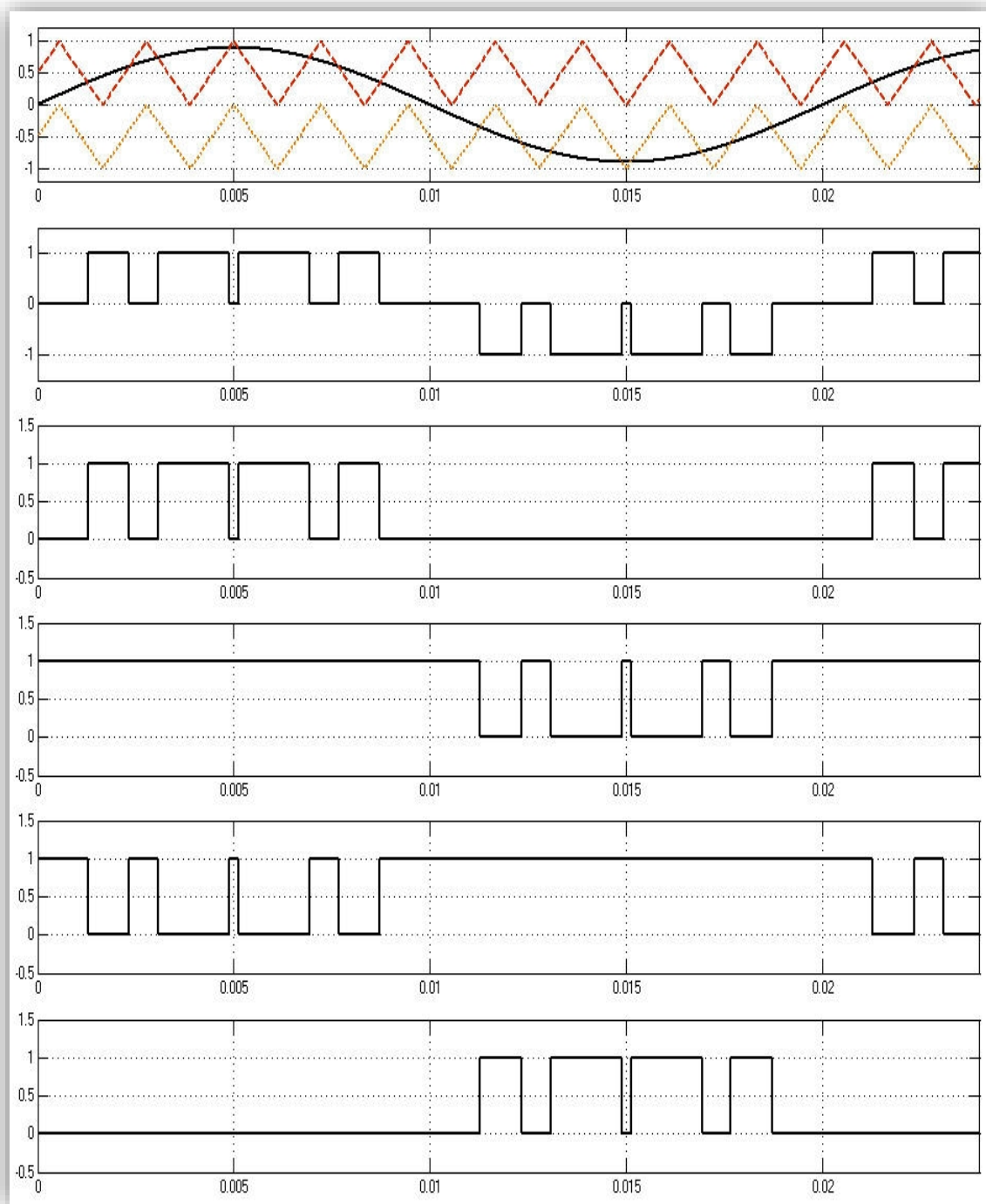


Figure (II.2) : Schéma synoptique des signaux de commande à 180° .

Les interrupteurs sont commandés pendant une durée correspondant à une demi période, mais avec des séquences décalées de 120° d'un bras par rapport aux autres d'où :

- A tout instant deux interrupteurs sont en état de conduire et les quatre autres sont bloqués.
- Deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandés de façon à ne pas court-circuiter la source de tension. On obtient donc six séquences de conduction par période.

II.2.1 Schéma de bloc de simulation

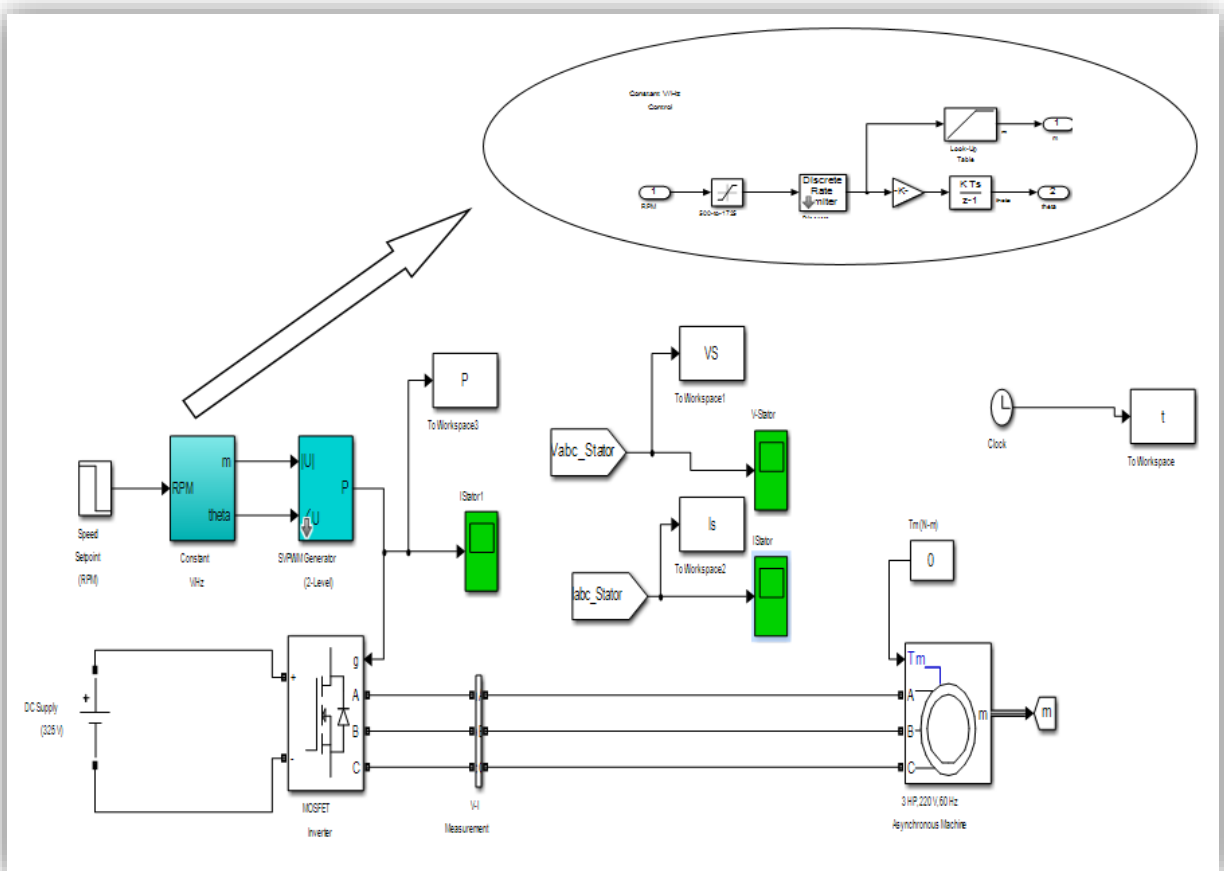


Figure (II.3) : Schéma fonctionnel de la commande pleine onde.

II.2.2 Résultats de simulation

Nous avons fait la simulation de la commande en plein onde ou la commande 180° sur notre onduleur dans l'environnement Matlab, et dont sa charge est inductive RL couplé en étoile et permettant de mesurer la tension simple, avec une fréquence imposée de 50Hz, et un bus dc de 100V. Les résultats de simulation sont donnés par les figures (II.4, II.5, II.6).

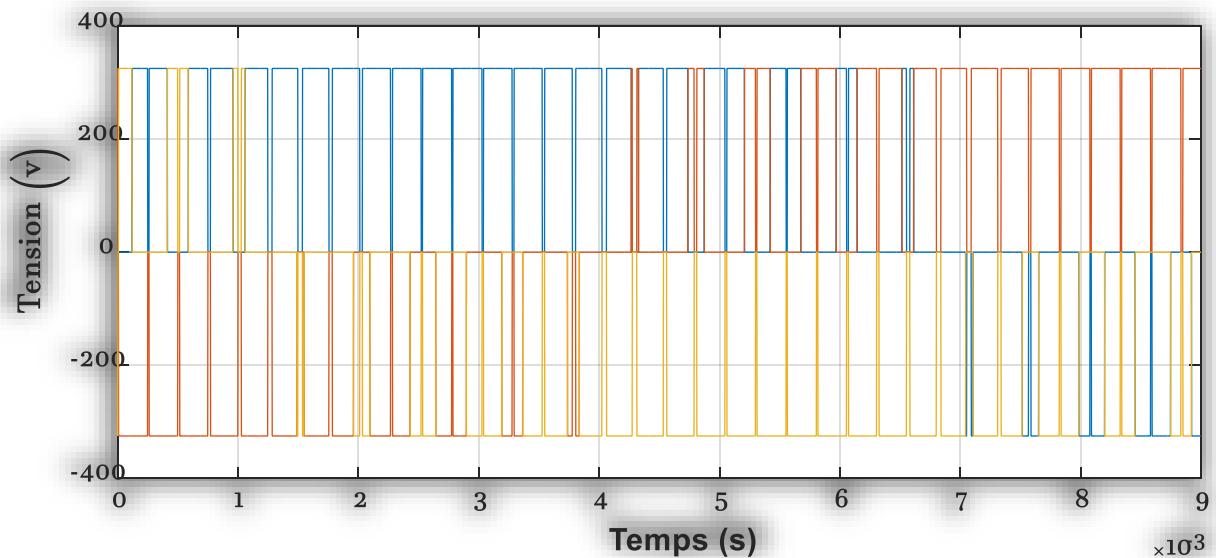


Figure (II.4) : Les tensions triphasées à la sortie de l'onduleur.

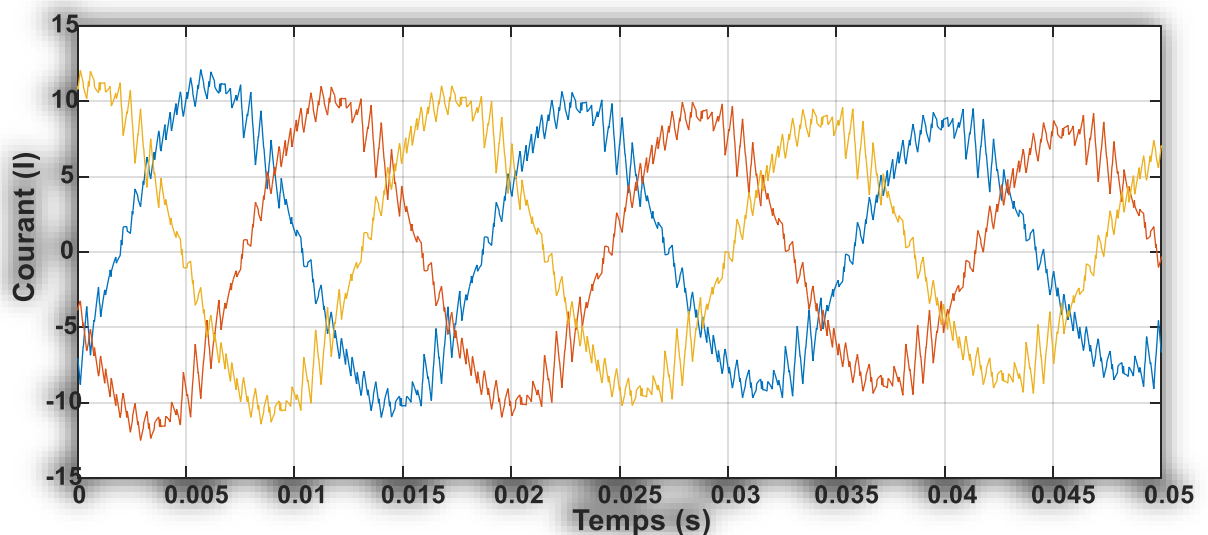


Figure (II.5) : Les courants de lignes.

II.2.3 Interprétation

La figure (II.6) montre que les impulsions de commande ont été égales à 1 pendant une demi-période de 0.01s et ont été décalées avec 120° .

La tension composée V_{ab} a alterné entre $+V_{dc}$ et $-V_{dc}$, tandis que la tension simple a alterné entre $2V_{dc}/3$, $V_{dc}/3$ d'une part, et $-V_{dc}/3$, $-2V_{dc}/3$ d'autre part.

II.3 La Commande MLI

II.3.1 Différentes techniques de modulation de largeur d'impulsions (MLI)

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

II.3.1.1 La modulation linéaire multiple (UPWM)

Dans cette technique on compare une porteuse triangulaire avec un signal de référence linéaire.

L'onde de sortie est sous la forme d'un train d'impulsion en créneaux de largeurs égales (Figure II.6). Si l'indice de modulation est égal à un, on obtient la modulation singulière, dans laquelle le signal de sortie est formé d'une seule impulsion par demi-période.

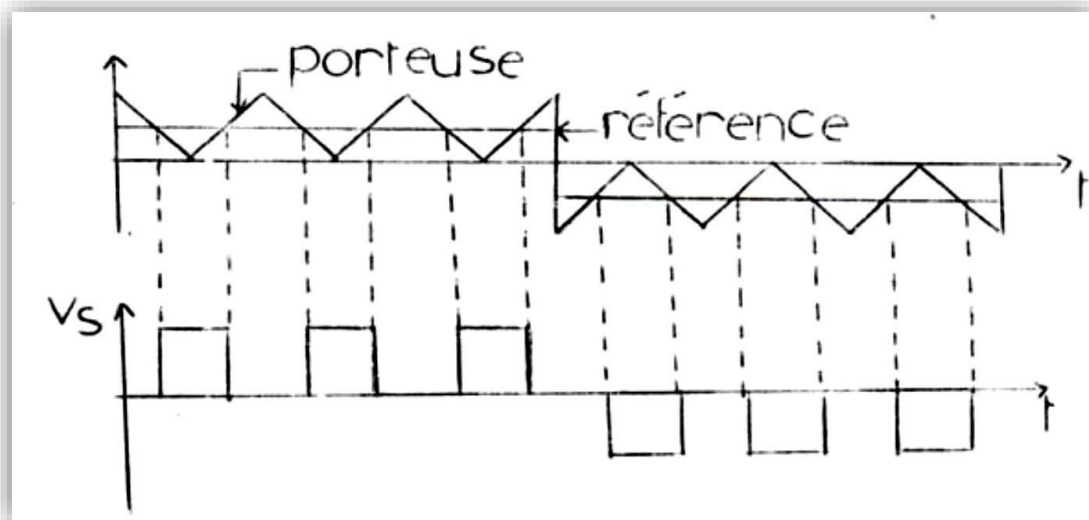


Figure (II.6) : La modulation de largeur d'impulsions multiples.

II.3.1.2 La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM)

Dans ce cas, le signal de référence est sinusoïdal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable (figure II.7). Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle s'est avéré la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques.

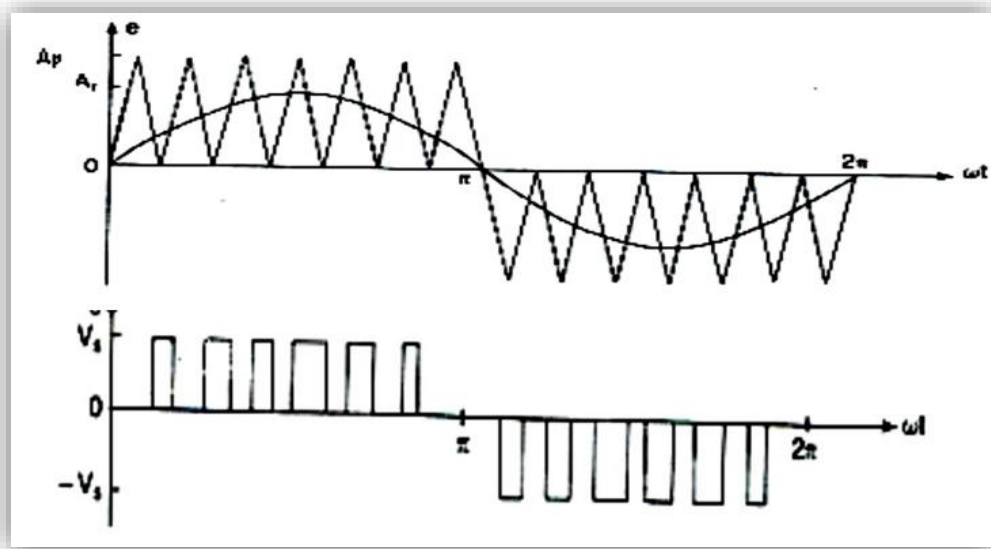


Figure (II.7) : MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire.

II.3.1.3 La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) (MSPWM)

Le signale référence est toujours sinusoïdal, sauf que dans cette technique la porteuse n'est pas appliquée au milieu des alternances de la sinusoïde (Figure II.8).

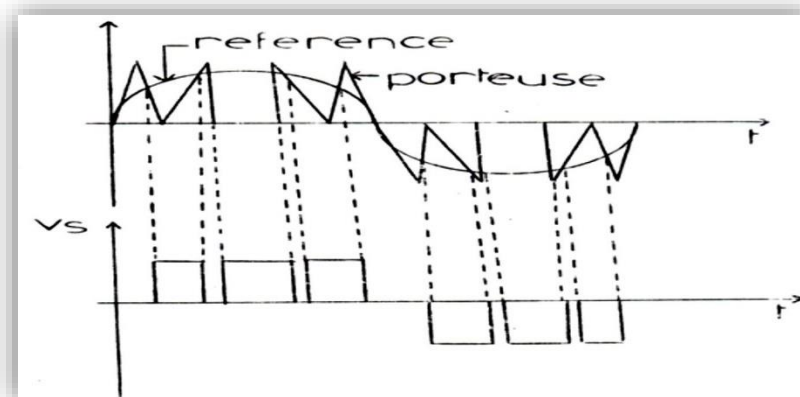


Figure (II.8) : La modulation sinusoïdale modifiée.

II.3.1.4 L'injection d'une harmonique 3 dans la référence

En triphasé, on peut améliorer les performances de la modulation en utilisant cette technique qui consiste à ajouter l'harmonique 3 à la sinusoïde de fréquence « f » pour former l'onde de référence (Figure II.9). [37]

L'addition d'harmonique permet d'augmenter l'amplitude maximale du fondamental dans la référence, et par là dans les tensions de sortie.

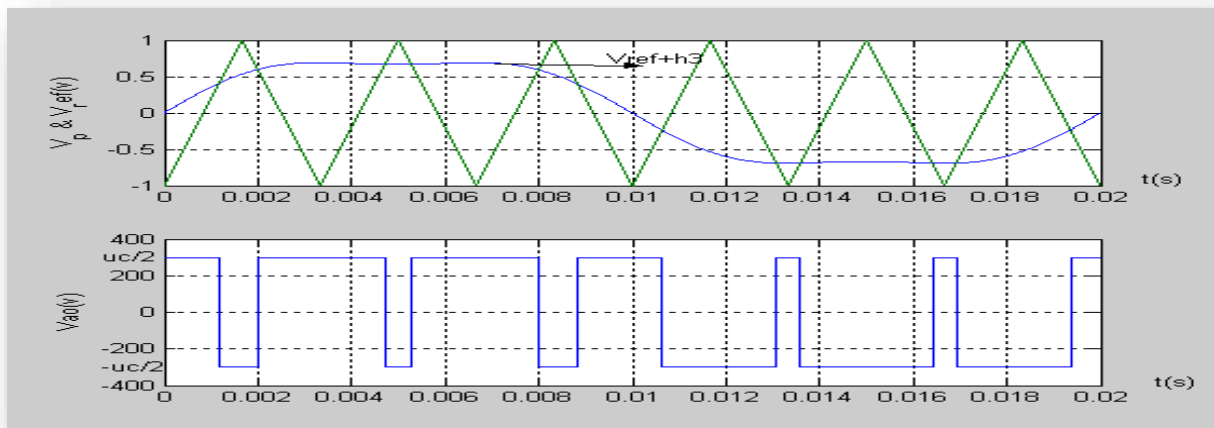


Figure (II.9) : MLI avec l'injection de l'harmonique 3.

II.3.1.5 La modulation calculée

Cette technique de MLI consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs de manière à répondre à certains critères portant sur le spectre fréquentiel de l'onde délivrée par l'onduleur. Les critères usuellement retenus sont :

- élimination d'harmoniques de rangs spécifiés,
- élimination d'harmoniques dans une bande spécifiée,
- minimisation d'un critère harmonique global.

II.3.1.6 La Modulation vectorielle

La MLI vectorielle est la méthode récemment la mieux adaptée au contrôle des moteurs asynchrones. Contrairement à d'autres méthodes, la MLI vectorielle ne s'appuie pas sur des calculs séparés des modulations pour chacun des bras de l'onduleur.

II.3.1.7 Commande MLI triangle- sinusoïdales

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueil à la sortie de l'onduleur, figure (II.10).

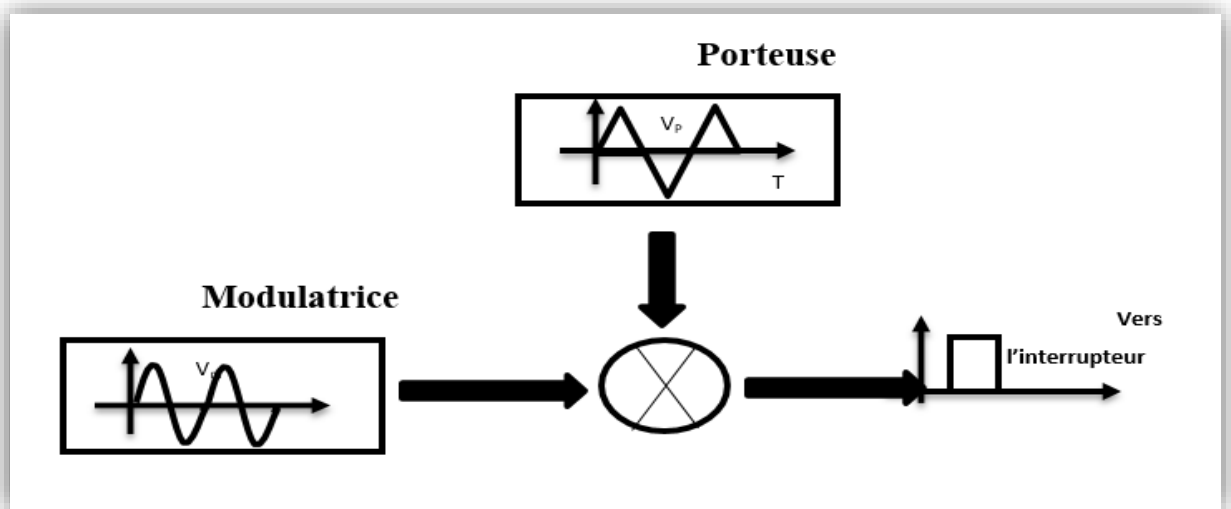


Figure (II.10) : Schéma de base MLI.

II.3.2 Caractéristiques de la modulation

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

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

$$r = \frac{V_m}{V_n} \quad (\text{II.1})$$

L'indice de modulation : Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de référence (modulatrice).

$$M = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{II.2})$$

II.3.3 Principe de base

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdale déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f_s . Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ce qui engendre des pertes supplémentaires.

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

$$V_m > V_p \rightarrow S(t) = 1 \text{ sinon } S(t) = 0$$

Avec :

- V_m : la tension référence.
- V_p : la tension porteuse.
- $S(t)$: st le signal MLI résultant.

II.3.4 Le schéma de bloc

Le schéma fonctionnel de la figure (II.11) montre le principe de la commande triangle-sinusoïdale MLI

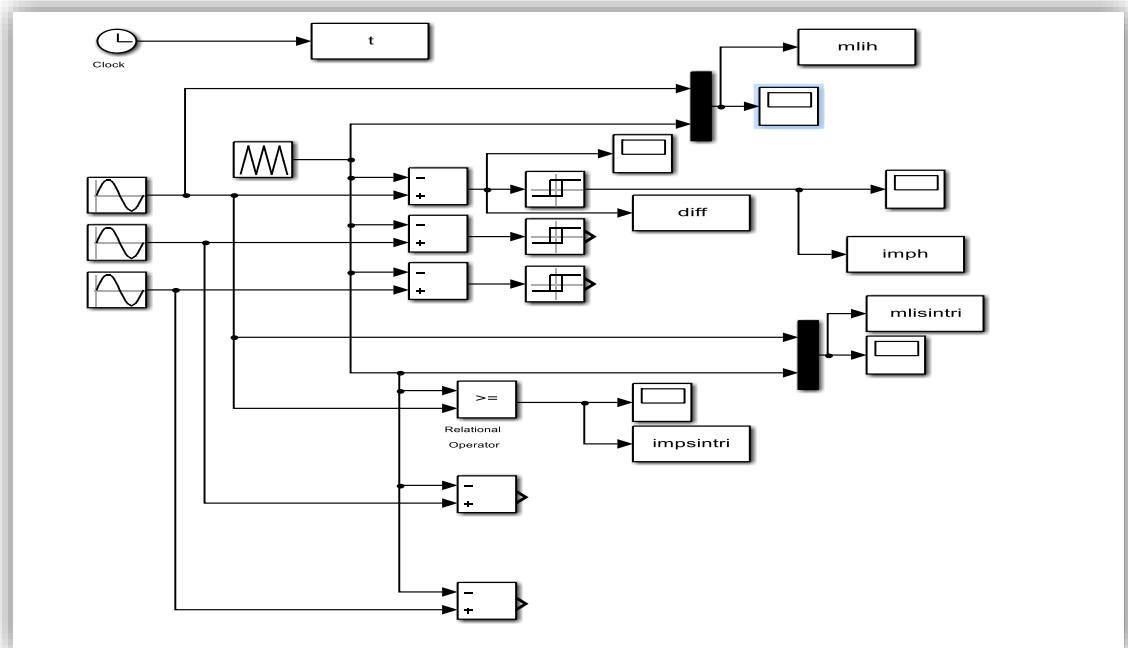


Figure (II.11) : Schéma fonctionnel de la commande MLI.

II.3.5 Résultats de simulation

Les résultats de simulation des figures (II.12, II.13) ont été obtenus lors de l'application de la MLI triangle-sinusoïdal sur l'onduleur triphasé où :

- La fréquence est égale 50Hz.
- La fréquence de commutation est égale 10kHz.
- La tension continue est 100 V.

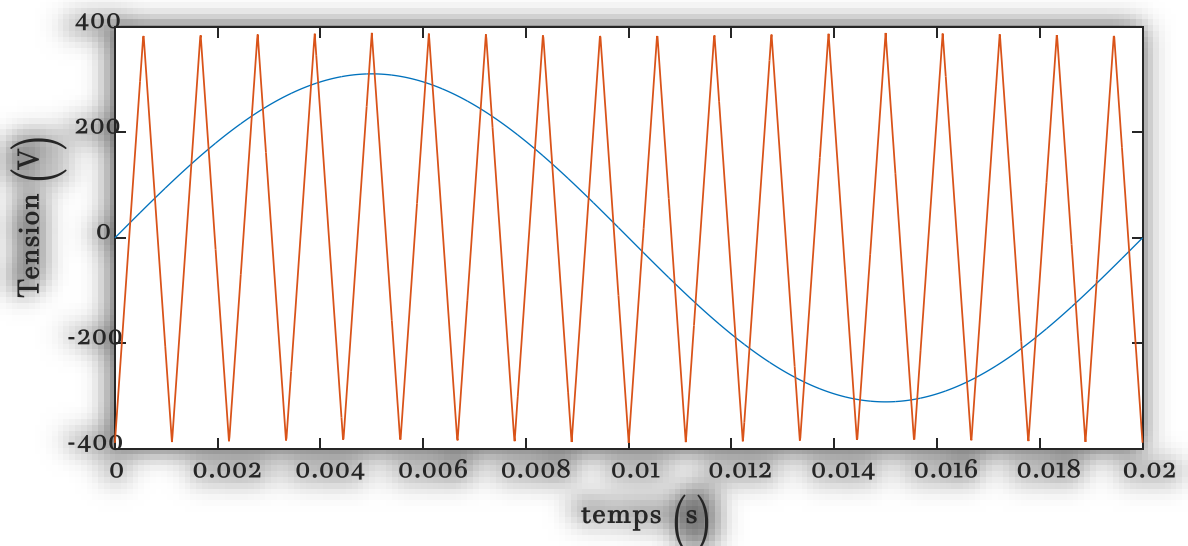


Figure (II.12) : Allure de tensions des signaux de commande.

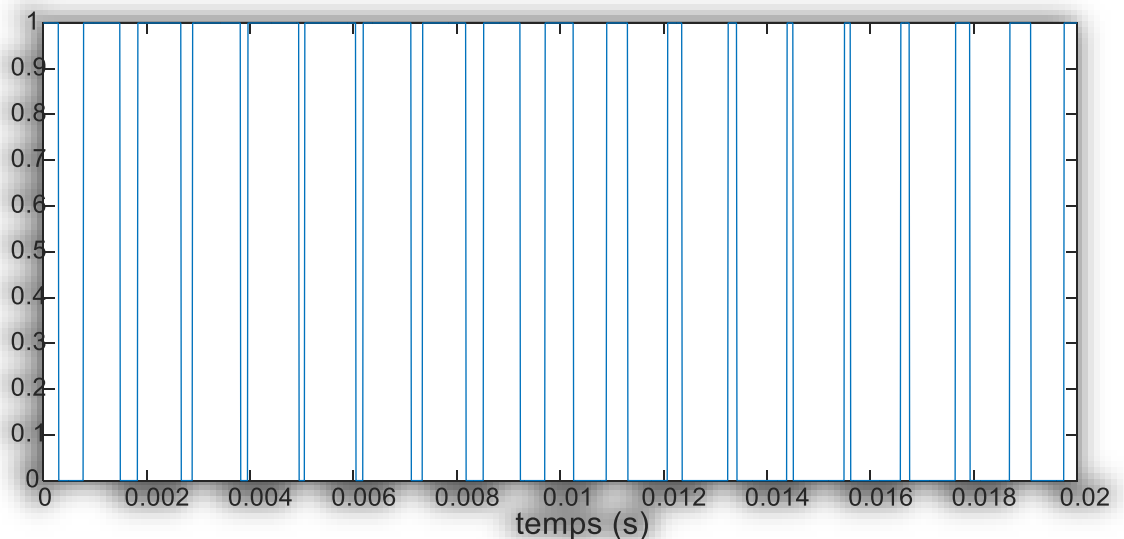


Figure (II.13) : Signaux de la commande MLI.

La figure (II.13) montre bien le Principe de fonctionnement de la technique MLI. Si $V_{réf} > V_{por} \Rightarrow S1=1$ Sinon $S1=0$.

On montre qu'il est possible en calculant soigneusement les angles de commutation, d'annuler complètement les harmoniques de rang faible. Cela est assuré dans les onduleurs industriels par un système à microprocesseur dans lequel sont mis en mémoire les valeurs des angles de commutation.

II.4 Conclusion

La simulation des différentes techniques de commande de l'ondeur triphasé a montré que la technique de modulation de largeur d'impulsion MLI possède un meilleur résultat par rapport à la technique de commande à 180° car, elle repousse les harmoniques vers les fréquences les plus élevés ce qui :

- ✓ Facilite le filtrage.
- ✓ Minimise la distorsion du courant.

Et elle donne des formes des tensions très proches à la forme sinusoïdale.

Le chapitre IV va nous confirmer expérimentalement la validité de la commande MLI appliquée sur un ondeur triphasé.



Chapitre III



CHAPITRE III :
Commande Vectorielle de la Machine
Asynchrone



Promotion 2023

III.1 Introduction

Les mécanismes industriels modernes et les systèmes robotiques imposent des méthodes de contrôle très sophistiquées des machines à courant alternatif.

A l'heure actuelle, le moteur asynchrone, de par sa simplicité de construction, sa robustesse et son faible coût détrône progressivement la machine à courant continu et concurrence son homologue synchrone couvrant ainsi une plage de puissance de quelques watts jusqu'à quelques mégawatts.

Ces dernières décennies, les recherches universitaires et industrielles se sont orientées afin d'aboutir à un contrôle du variateur asynchrone équivalent à celui d'un moteur à courant continu. Dans ce contrôle, le flux et le couple sont, deux variables essentielles de réglage, sont découplées et commandées indépendamment, idée mise en existence par BLASCHKE en 1971 sous le nom « commande vectorielle », et propulsée par le développement spectaculaire de la micro-informatique et de l'électronique de puissance [17].

Le but de ce chapitre est de présenter les orientations du flux dans une machine asynchrone triphasé commandée en tension. La simulation a été effectuée uniquement pour l'orientation du flux du rotor pour la machine sous tension.

➤ **La Commande vectorielle par orientation du flux (CV-OF) :**

L'examen de l'expression du couple d'une machine asynchrone montre qu'il résulte de la différence des produits de deux composantes en quadrature, flux rotoriques et courants statoriques, ce qui représente un couplage complexe entre grandeurs machine [18].

Le contrôle de l'orientation des flux a pour but de séparer les grandeurs responsables de la magnétisation de la machine et de la production de couple. Mathématiquement, la loi de commande consiste à spécifier toutes les transformations destinées à passer d'un système à double non-linéarité structurelle à un système linéaire assurant l'indépendance entre la génération de flux et la génération de couple comme dans une machine à courant continu à excitation séparée distinctes [2]. Le contrôle de l'alignement du flux consiste à réguler le flux avec une composante du courant et à réguler le couple avec l'autre composante. Pour ce faire, le système d'axes "d, q" doit être sélectionné. Un choix judicieux de l'angle d'orientation du signe « d, q » conduit à placer l'axe « d » sur la résultante de l'écoulement, ce qui permet d'annuler la composante transverse de l'écoulement, comme le montre la figure (III.1). [19].

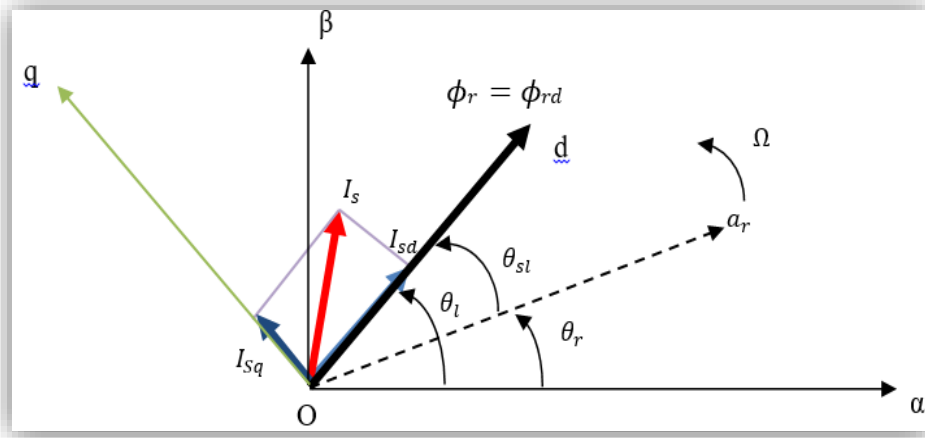


Figure (III.1) : Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer).

➤ Choix d'orientation de flux

Le choix des axes d'orientation peut être fait selon l'une des directions des flux de la machine à savoir le flux rotorique, statorique ou d'entrefer.

- ❖ $\phi_{rq} = 0$ et $\phi_r = \phi_{rd}$: c'est le flux rotorique qui orienté.
- ❖ $\phi_{sd} = 0$ et $\phi_s = \phi_{sq}$: c'est le flux statorique qui orienté.
- ❖ $\phi_{mq} = 0$ et $\phi_m = \phi_{md}$: c'est le flux d'entrefer qui orienté.

Dans les trois cas le couple est proportionnel au produit du flux par la composante du courant statorique en quadrature avec le flux.

L'orientation du flux rotorique permet d'obtenir un couple de démarrage important et nécessite la connaissance des paramètres rotorique.

Dans tout ce qui va suivre l'orientation du flux rotorique est la méthode qui sera retenue.

➤ Principe du contrôle par flux orienté

Dans ce cas le flux rotorique est orienté sur l'axe «d» d'une référence solidaire au champ tournant de vitesse (ω_s), donc on peut remarquer les propriétés suivantes :

- La composante transversale du flux rotorique est nulle. ($\phi_{rq} = 0$).
- L'axe «d» est aligné systématiquement sur le vecteur du flux rotorique. ($\bar{\phi}_r = \phi_{rd}$).
- La composante longitudinale du courant rotorique est nulle si le flux rotorique est maintenu constant. ($\phi_r = cst \rightarrow i_{rd} = 0$).

Le modèle vectoriel de la machine asynchrone est décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d}{dt} \phi_s + j\omega_s \phi_s \\ 0 = R_r \bar{i}_r + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_r + j\omega_r \bar{\phi}_r \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{cases} \bar{\phi}_s = L_s \bar{i}_s + M \bar{i}_s \\ \bar{\phi}_r = L_r \bar{i}_r + M \bar{i}_s \rightarrow +\bar{i}_r = \frac{\phi_r}{L_r} - \frac{M \bar{i}_s}{L_r} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Avec : $\bar{X} = X_d + jX_q$ (\bar{X} : représente le flux, les courants et les tensions).

Pour écrire le modèle de la MAS avec l'état ($\bar{\mathbf{i}}_s$), on réalise les changements suivants :

$$\bar{\phi}_s = L_s \bar{i}_s + \frac{M \bar{\phi}_r}{L_r} - \frac{M^2}{L_r} \bar{i}_s = L_s \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \right) \bar{i}_s + \frac{M}{L_r} \bar{\phi}_r \quad (\text{III.3})$$

$$\bar{\phi}_s = \sigma L_s \bar{i}_s + \frac{M}{L_r} \bar{\phi}_r \quad (\text{III.4})$$

La combinaison de ces équations donne :

$$\bar{i}_r = \frac{\bar{\phi}_r}{L_r} - \frac{M \bar{i}_s}{L_r} \quad (\text{III.5})$$

$$\begin{aligned} V_s &= R_s \bar{i}_s + \frac{d}{dt} \left(\sigma L_s \bar{i}_s + \frac{M}{L_r} \bar{\phi}_r \right) + j\omega_s \left(\sigma L_s \bar{i}_s + \frac{M}{L_r} \bar{\phi}_r \right) \\ 0 &= R_r \left(\frac{\bar{\phi}_r}{L_r} - \frac{M \bar{i}_s}{L_r} \right) + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_r + j\omega_r \bar{\phi}_r \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

$$0 = \frac{-MR_r}{L_r} \bar{i}_s + \left(\frac{R_r}{L_r} + j\omega_r \right) \bar{\phi}_r + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_r \quad (\text{III.7})$$

$$0 = \frac{-MR_r}{L_r} \bar{i}_s + \left(\frac{R_r}{L_r} + j\omega_r + S \right) \bar{\phi}_r; \bar{\phi}_r = \phi_{dr} \quad (\text{III.8})$$

La décomposition des équations (5-9) en partie réelle et imaginaire donne :

$$\begin{cases} 0 = \frac{-MR_r}{L_r} \bar{i}_{ds} + \left(\frac{R_r}{L_r} + S \right) \phi_r \\ 0 = \frac{-MR_r}{L_r} \bar{i}_{qs} + (\omega_r) \phi_r \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

$$\begin{cases} \bar{i}_{ds} = \frac{s + \frac{R_r}{L_r}}{\frac{MR_r}{L_r}} \phi_r = \frac{s + \frac{1}{T_r}}{\frac{M}{T_r}} \phi_r = \frac{T_r S + 1}{M} \phi_r \\ \bar{i}_{qs} = \frac{T_r \omega_r}{M} \phi_r \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

La relation de ids signifie que dans le modèle de la machine asynchrone dans le repère (d, q) à flux rotorique orienté, le module de ce flux est contrôlé linéairement par la composante directe du courant statorique ids moyennant une dynamique du premier ordre avec la constante de temps Tr .

$$V_r = 0 = R_r i_r + \frac{d}{dt} \phi_r + j\omega_r \phi_r \quad (III.11)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_r \phi_{qr} = 0 & (2) \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_r \phi_{dr} & (2) \end{cases}$$

$$(1) \rightarrow 0 = R_r R_{dr} + \frac{d}{dt} \quad (III.12)$$

$$\phi_{qr} = \text{cte} \rightarrow \frac{d}{dt} \phi_{dr} = 0 \quad (III.13)$$

D'après ces propriétés on peut écrire :

$$\begin{cases} \phi_{qr} = 0 \\ \phi_{dr} = \phi_r = \text{cst} \\ \phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (III.14)$$

On remplace ce système dans les équations des flux, on obtient :

$$\begin{cases} \phi_r = M_{ids} \\ \phi_r = M_{iqs} + L_r i_{rq} = 0 \end{cases} \quad (III.15)$$

A partir de la dernière équation de ce système on aura l'équation suivante :

$$i_{rq} = \frac{-M_{isq}}{L_r} \quad (III.16)$$

On remplace le système (III.14) dans la formule de couple électromagnétique on aura :

$$c_e = \frac{MP}{L} \phi_r i_{sq} \quad (III.17)$$

Ou encore, le couple devient :

$$C_e = K_2 i_{sd} i_{sq} \quad (III.18)$$

Avec :

$$K_2 = \frac{PM^2}{L_r} \quad (III.19)$$

La présente expression est analogue à celle du couple d'une machine à courant continu. La figure (III.2) illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplé classique d'une machine à courant continu et la commande vectorielle d'une machine asynchrone [18].

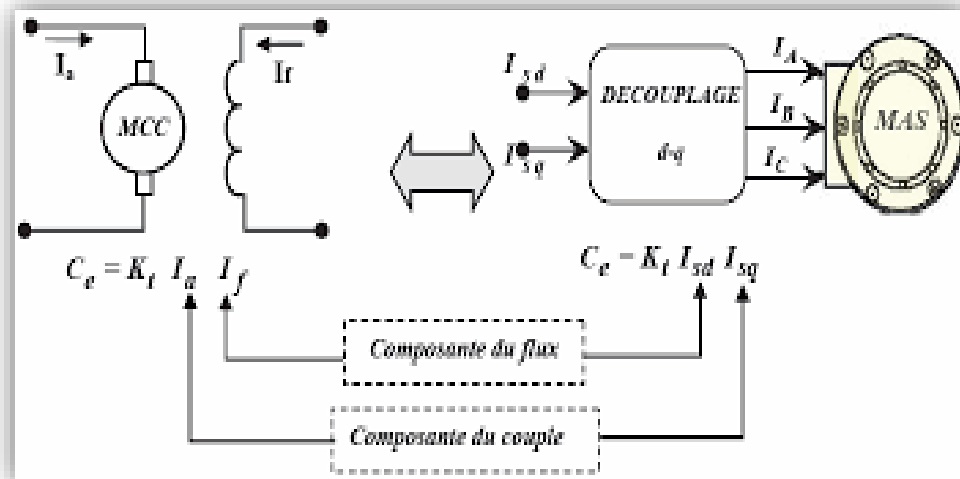


Figure (III.2) : Analogie de la machine asynchrone avec le moteur à courant continu [20].

Ainsi le système balais-collecteur dans la machine à courant continu est remplacé, dans le cas de la machine asynchrone par le système d'autopilotage qui permet de réaliser une harmonie entre la fréquence de rotation et celle des courants induits dans le rotor, telle que la relation suivante [21] :

$$\omega_s = \omega_r + \omega = p\Omega_r + \omega$$

$$\theta_s = \int \omega_s dt$$

III.2. Types de la commande vectorielle

Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux principales méthodes, la première appelée méthode directe qui a été développée par F.Blaschke, la seconde connue par la méthode indirecte développée par K.Hasse.

III.2.1. Commande vectorielle directe

Pour déterminer le position et la norme du flux (contrôler par contre réaction) il faut utiliser les capteurs à effet HALL placés sur les dents de stator (ceci nécessite des moteur spéciaux), ils sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans les conditions sévères telles que les vibrations et. Les échauffements excessifs, et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables. L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes :

- Le non fiabilité de la mesure du flux.
- Problème de filtrage du signal mesuré.

- Précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.
- Le coût de production élevé (capteurs + filtre).

Afin de pouvoir utiliser une machine standard les capteurs de flux doivent être remplacés par estimateur de flux.

Nous appliquons la commande vectorielle directe à la machine asynchrone alimentée en tension avec convertisseur.

III.2.2. Commande vectorielle indirecte

Cette méthode n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor. Cette dernière peut être développée par deux groupes principaux :

- Le vecteur du flux rotorique est obtenu indirectement à partir des courants et des tensions statoriques mesurées.
- Dans le deuxième groupe, le vecteur de flux rotorique est estimé à partir de la mesure des courants statoriques et de la vitesse du rotor, en se basant sur les équations du circuit rotorique du moteur asynchrone dans un système de référence tournant en synchronisme avec le vecteur de flux rotorique.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation en vers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotorique T_r . En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué [24] ; [Article].

III.3. Structure de la commande vectorielle de la MAS alimentée en tension

III.3.1 Expression générale du moteur

La commande vectorielle à flux rotorique orienté que nous mettons en œuvre est basée sur une orientation du repère tournant d'axes (d,q) tels que l'axe d soit confondu avec la direction de ϕ_r [31]. Le flux ϕ_r étant orienté sur l'axe d, l'équation d'état $\dot{X} = [A]X + [B]U$ nous permet d'exprimer V_{ds} et i_{ds} , et ω_s avec $\phi_{rq} = 0$ et $\overline{\phi_{rd}} = 0$:

$$\begin{cases} V_{sd} = \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \left(R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} - \frac{M}{L_r^2} R_r \phi_r \\ V_{sq} = \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \left(R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{sq} - \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r^2} P \Omega \phi_r \\ T_r \frac{d\phi_r}{dt} + \phi_r = M i_{sd} \\ \omega_s = P \Omega + \frac{M i_{sq}}{T_r \phi_r} \end{cases} \quad (III.20)$$

Ces expressions peuvent être exploitées telles quelles pour réaliser la commande vectorielle à flux orienté des moteurs asynchrones alimentées en tension mais V_{sd} et V_{sq} influent à la fois sur i_{sd} et i_{sq} donc sur le flux et le couple (Figure III.3). Il est donc nécessaire de réaliser un découplage [24].

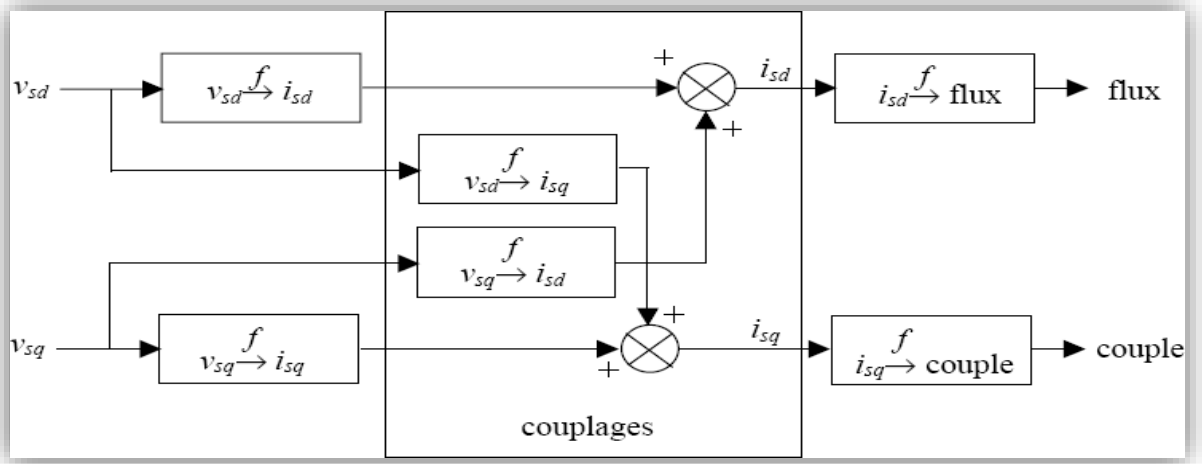


Figure (III.3) : Description des couplages [24].

III.3.2. Système d'équations liées au flux rotorique

Les équations (III.20), munies de la contrainte ($\phi_{rq} = 0$) se simplifient :

$$V_{ssd} = \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} + \frac{M}{L_r} \frac{d\phi_r}{dt} \quad (III.21)$$

$$V_{ssq} = \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} - \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_s \frac{M}{L_r} \phi_r \quad (III.22)$$

$$\frac{d\phi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} \quad (III.23)$$

$$\omega_r = \frac{M}{T_r} \frac{i_{sq}}{\phi_r} \quad (III.24)$$

$$C_e = \frac{PM}{L_r} \phi_r i_{sq} \quad (III.25)$$

$$j \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f \Omega_r \quad (III.26)$$

Les équations mettant respectivement en évidence le courant producteur du flux, i_{sd} et le courant producteur du couple. Cela offre la possibilité de contrôler la machine asynchrone en découplant comme dans la machine à courant continu, le flux et le couple. La structure de découplage est définie par les équations définies précédemment. Le schéma bloc de cette structure est représenté, par le montage de la figure (III.4)

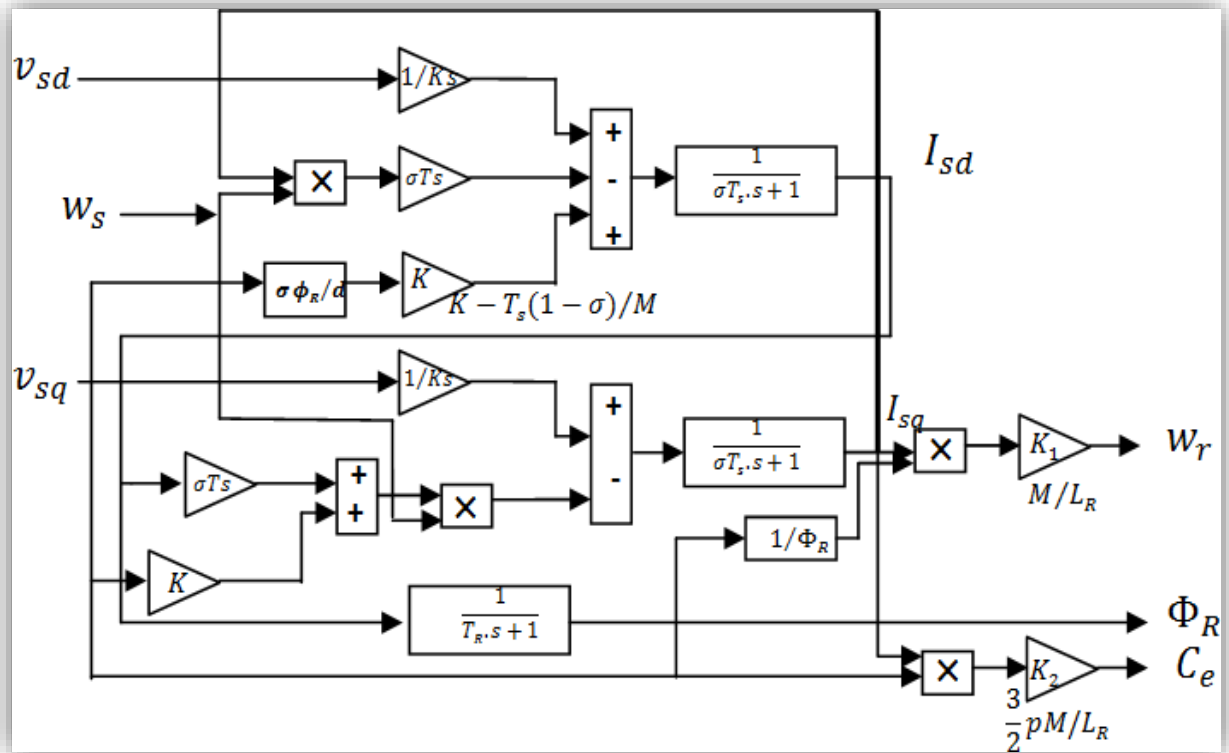


Figure (III.4) : structure de la commande par orientation du flux rotorique.

III.3.3 Découplage entré-sortie

L'objectif est, dans la mesure du possible, de limiter l'effet d'une entrée à une seule sortie. Nous pouvons alors modéliser le processus sous la forme d'un ensemble de systèmes mono-variables évoluant en parallèle. Les commandes sont alors non interactives.

Différentes techniques existent découplage utilisant un régulateur, parmi de ces techniques le découplage par compensation [16].

III.3.3.1. Découplage par compensation

Définissons deux nouvelles variables de commande V_{sd}^* et V_{sq}^* telles que :

$$\begin{cases} e_{sq} = \omega_s \sigma L_s i_{sq} - \frac{M}{L_r^2} R_r \phi_r \\ e_{sd} = \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r^2} P \Omega \phi_r \end{cases} \quad (III.27)$$

$$\begin{aligned} V_{sd} &= V_{sd}^* - e_{sd} \\ V_{sq} &= V_{sq}^* - e_{sq} \end{aligned} \quad (III.28)$$

Les tensions V_{sd} et V_{sq} sont alors reconstitué à partir des tensions V_{sd}^* et V_{sq}^* (Figure III.5)

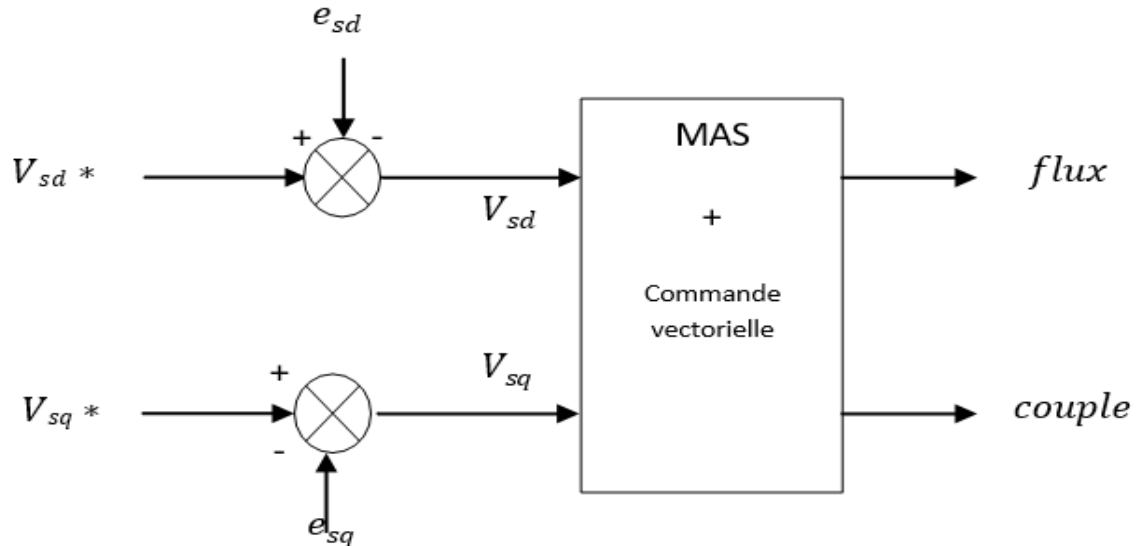


Figure (III.5) : Reconstitution des tensions.

La Figure (III.6) donne le schéma bloc de la commande par orientation du flux rotorique avec un découplage entrée sortie.

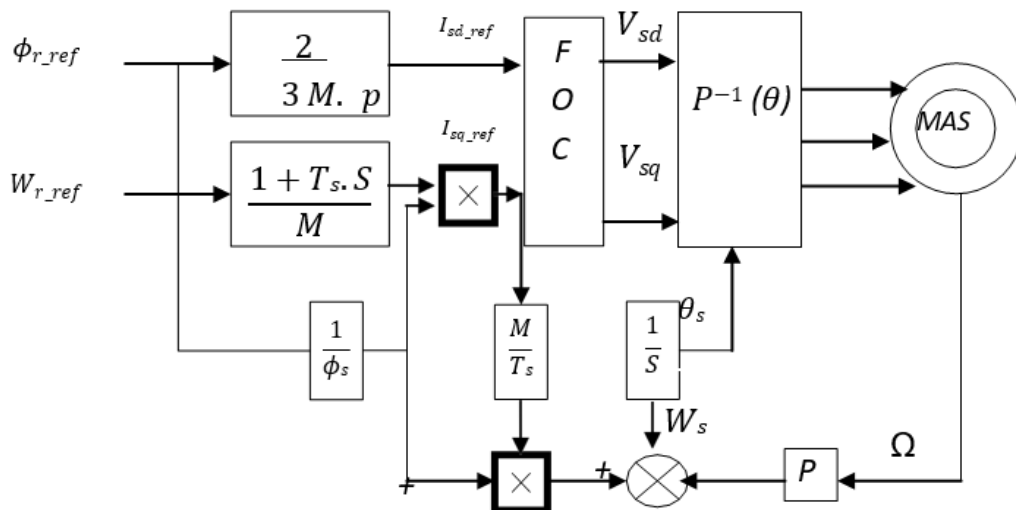


Figure (III.6) : Commande par orientation du flux avec découplage entrée sortie [18].

III.4 Régulation

L'objectif de la commande, en général, est d'avoir un système de hautes performances. Plusieurs critères de performance peuvent être définis à savoir :

- Précision en poursuite.
- Précision en régulation :
 - Temps de montée.
 - Temps de réponse.
 - Dépassement.
 - Stabilité.
- Robustesse vis-à-vis des perturbations (charge, moment d'inertie).
- Sensibilité à la variation de paramètres.

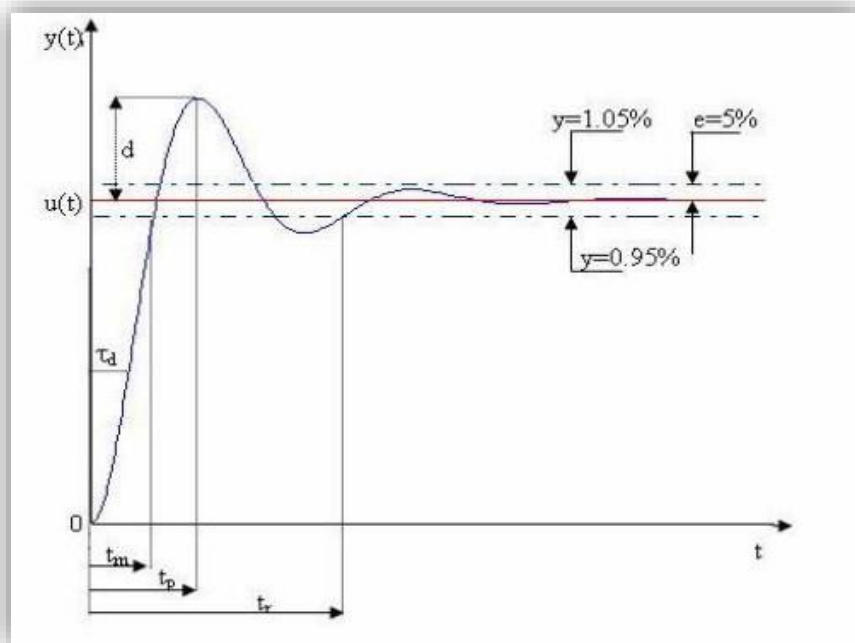


Figure (III.7) : Caractéristiques de la réponse des systèmes.

A partir de ce point, des différentes techniques de commandes sont utilisées afin de remplir le cahier de charge de la commande, techniques classiques ou avancées. L'une des techniques classiques consiste à utiliser les régulateurs type proportionnel et intégral PI dont les coefficients sont calculés à partir des paramètres de la machine à commander [27].

III.4.1 Régulation de Courant

Du découplage proposé à la figure (III.8), on aboutit au schéma bloc simple et identique pour les deux axes.

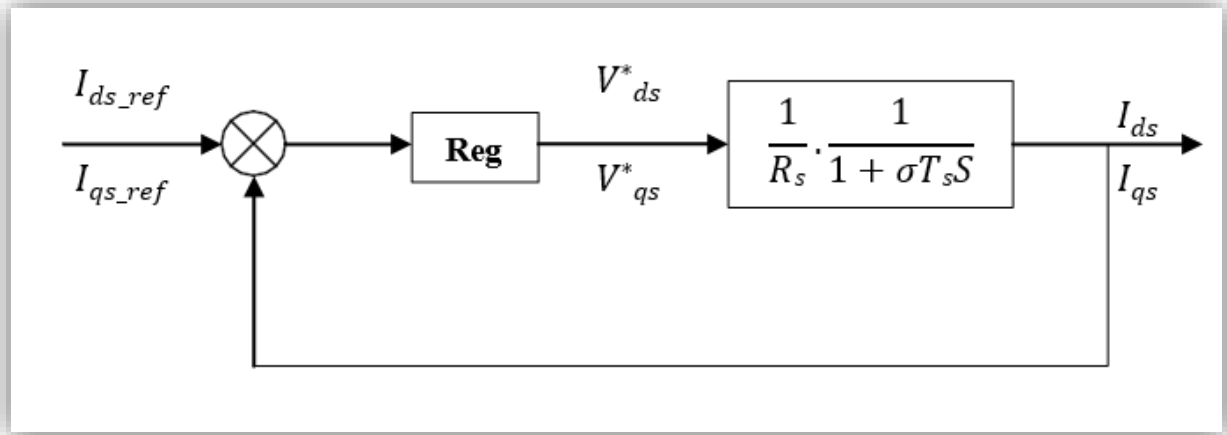


Figure (III.8) : Boucle de courant après découplage.

Chaque boucle de courant est dotée d'un régulateur proportionnel intégral (PI) classique, il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et son propre consigne [28], [29].

Le régulateur PI (action proportionnelle-intégrale) est une combinaison d'un régulateur P et d'un régulateur I. La fonction du régulateur PI en continue est :

$$c(t) = K_p \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i S} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \right) \tag{III.29}$$

La fonction de transfert en S est :

$$(S) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i} \right) = k_p + \frac{k_i}{S} \tag{III.30}$$

Avec k_p : constante de proportionnalité.

$k_i = \frac{k_p}{T_i}$: constante d'intégration, T_i : constante de temps d'intégration, elle est choisie d'une manière à satisfaire un compromis stabilité-rapidité .

On calcul la fonction de transfert en boucle ouverte, de la figure (III.8) :

$$G_0(S) = \left(k_p + \frac{k_i}{S} \right) \cdot \left(\frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \sigma T_s \cdot S} \right)$$

Par compensation on aura :

$$= k_p \left(S + \frac{k_i}{k_p} \right) \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{\frac{1}{\sigma L_s}}{S + \frac{R_s}{\sigma L_s}}$$

Calcul de la fonction de transfert en boucle fermée :

$$F(s) = \frac{G_0(S)}{1 + G_0(S)} = \frac{\frac{k_p}{\sigma L_s} \cdot \frac{1}{s}}{1 + \frac{k_p}{\sigma L_s} \cdot \frac{1}{s}}$$

Après calcul et développement on trouve :

$$(S) = \frac{1}{\tau_i \cdot S + 1}$$

Avec : $\tau_i = \frac{\sigma L_s}{k_p}$: constante de temps des courants dans les deux boucles.

On choisit la dynamique de la boucle de courant qui est rapide par rapport à celle de la vitesse on déduit k_p et enfin k_i .

Les mêmes valeurs de coefficients sont adoptées pour les deux boucles de courant.

III.4.2 Régulation De Vitesse

Le schéma de régulation de la vitesse avec un régulateur PI est le suivant :

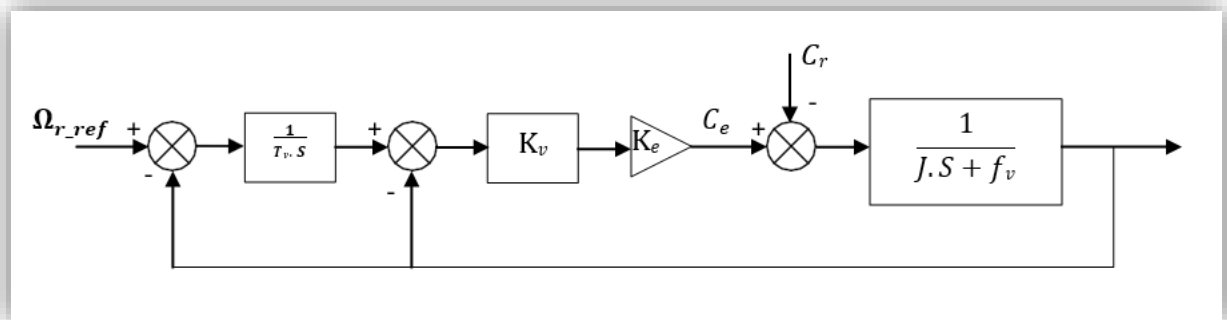


Figure (III.9) : Boucle de régulation de vitesse à structure PI.

$\underline{K}_e = p^M \phi_{r-ref}$: Constante du couple électromagnétique.

Avec cette structure de régulation (PI) de vitesse, on n'a pas pu avoir de bonnes performances à la fois pour l'asservissement (réponse par rapport à la consigne) et pour la régulation (réponse par rapport à la perturbation).

Alors, on est amené à utiliser la structure de régulation de vitesse IP, tel que schématisée sur la figure (III.10).

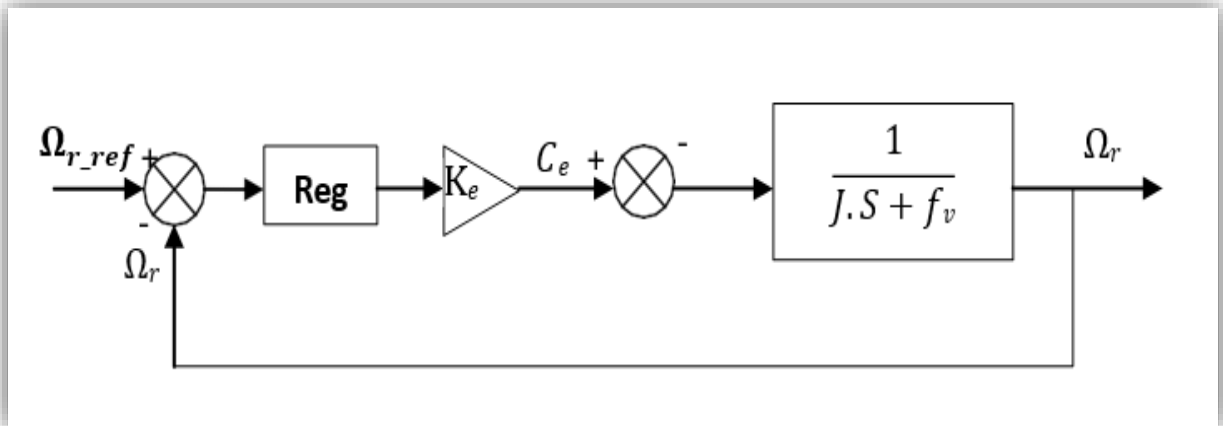


Figure (III.10) : Boucle de régulation de vitesse structure IP.

Dans cette structure, on a deux boucles en cascade, le calcul des coefficients du régulateur est développé en annexe.

III.5 Mode Défluxage

Plusieurs applications, plus particulièrement la traction électrique, exigent un fonctionnement en survitesse à puissance constante. Or, pour assurer un tel fonctionnement, dans le cas d'un entraînement à vitesse variable utilisant un moteur asynchrone, une tension élevée à l'entrée est requise. Pour contourner cette sur demande en tension, on réduit le flux de référence aux vitesses élevées. De plus, pour optimiser la demande du courant de magnétisation de la machine à induction, il est nécessaire de défluxer de manière à offrir à la machine le flux dont elle a besoin pour produire son couple maximal sans aucune violation des contraintes thermique imposées sur la machine et sur les composants de puissances du convertisseur [30].

Le principe de défluxage consiste à maintenir le flux rotorique constant et égal au flux nominal et en le faisant varier sur une plage pour les vitesses supérieures à la vitesse nominale.

$$\phi_{r_ref} = \phi_{r_nom} : \text{pour } |\Omega| \leq \Omega_{nom}$$

Avec :

- ϕ_{r_ref} : flux rotorique de référence.
- ϕ_{r_nom} : flux rotorique de nominal.
- Ω_{ref} : vitesse de référencé.
- Ω_{nom} : vitesse de rotation nominale.

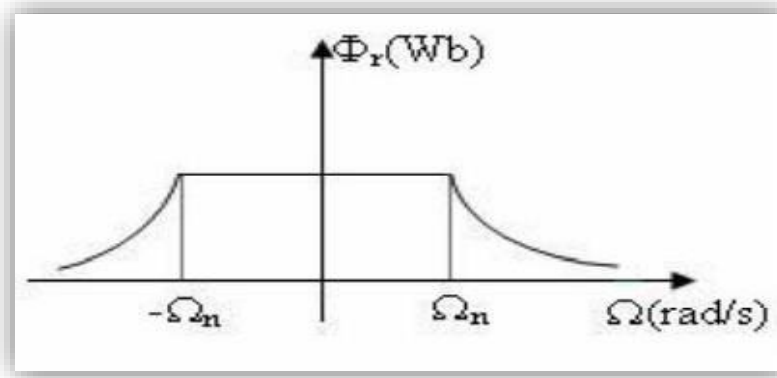


Figure (III.11) : Opération en mode défluxé.

III.6 Simulation numérique

A partir de l'étude théorique de la structure de la commande vectorielle à flux orienté, dans ce chapitre, nous pouvons élaborer les différents blocs nécessaires à une simulation du procédé. Le schéma d'ensemble est donné par la figure(III.12).

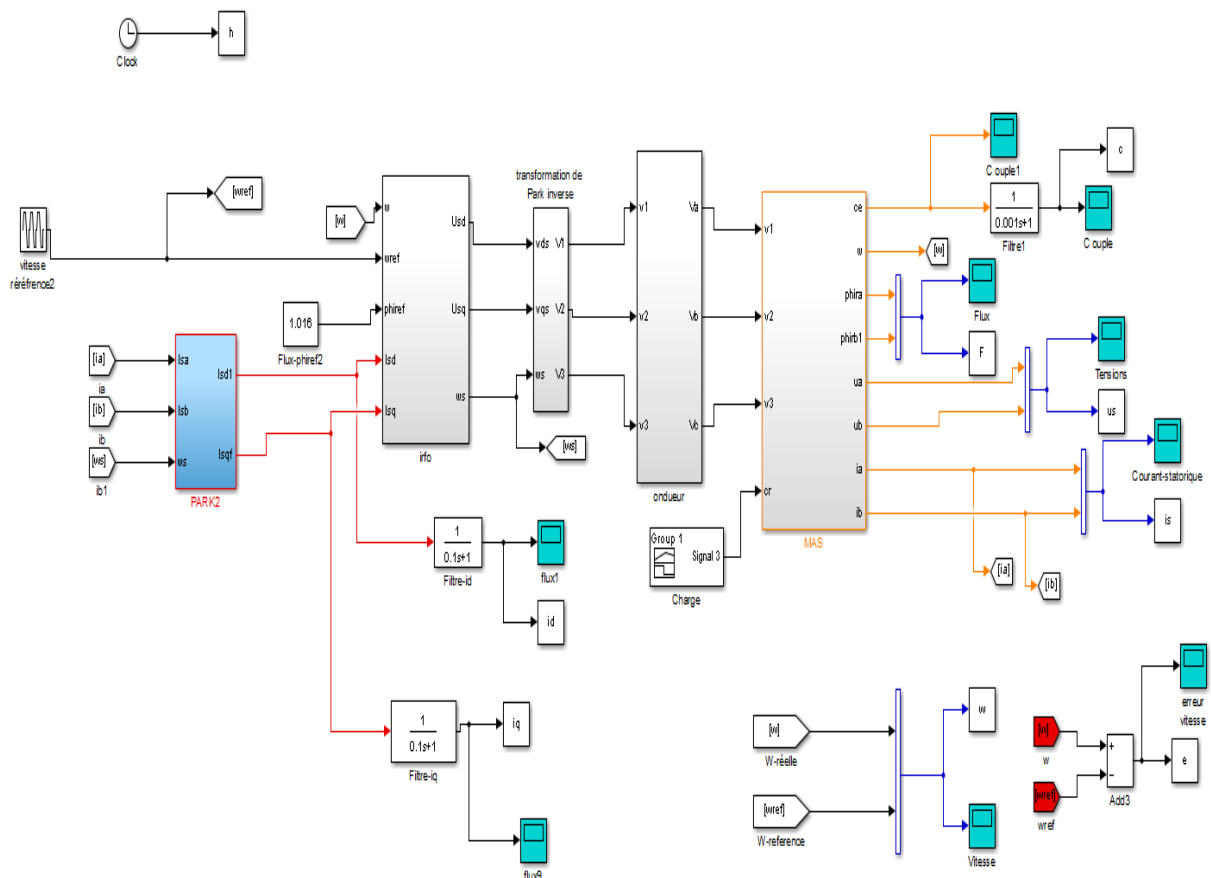


Figure (III.12) : Schéma d'une commande vectorielle indirecte du flux d'une MAS alimentée en tension.

III.7 Présentation des résultants de simulation

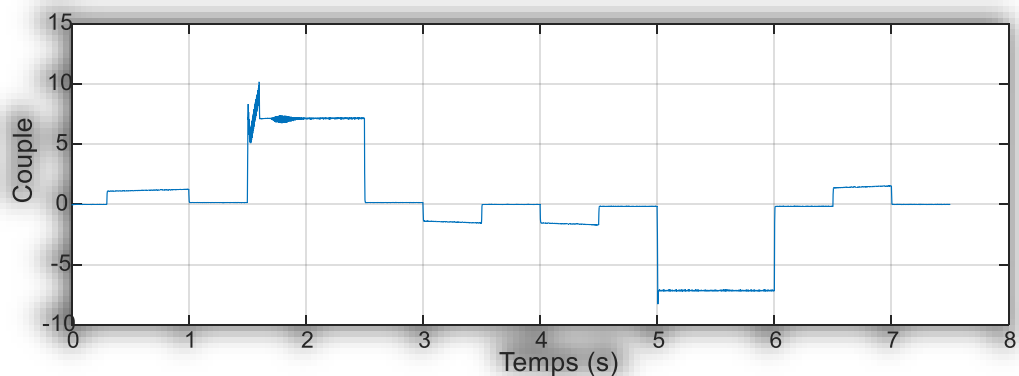
Afin de montrer les résultats obtenus par simulation de la commande vectorielle directe en tension. Nous avons simulé le système dans d' différents cas de fonctionnement tels que la variation de charge, de la vitesse et la variation paramétrique en l'occurrence la résistance rotorique.

III.7.1 Simulation avec variation de la charge

Les résultats de cette simulation montrent que pour la variation de charge fig .les grandeurs telles que la vitesse, le couple, les flux et les courants sont influencés par cette variation d'où le système est parfaitement commandé.

La courbe des flux montre également un découplage entre le couple électromagnétique et le flux rotorique, le couple électromagnétique a la même allure que le courant à un coefficient près ce qui prouve que le découplage est parfaitement réalisé ($\phi_{rd} = 0$).

Nous constatons également que le couple électromagnétique suit la consigne, le courant de phase statorique suit parfaitement la variation de la charge.



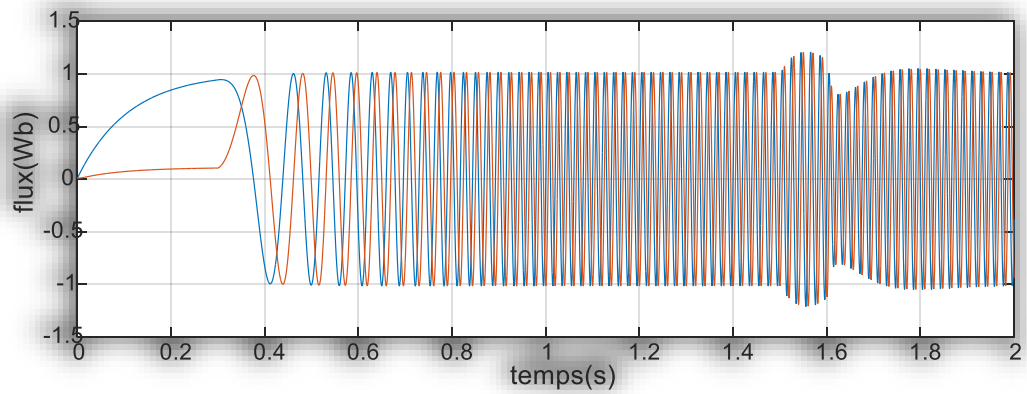


Figure (III.15) : Le flux.

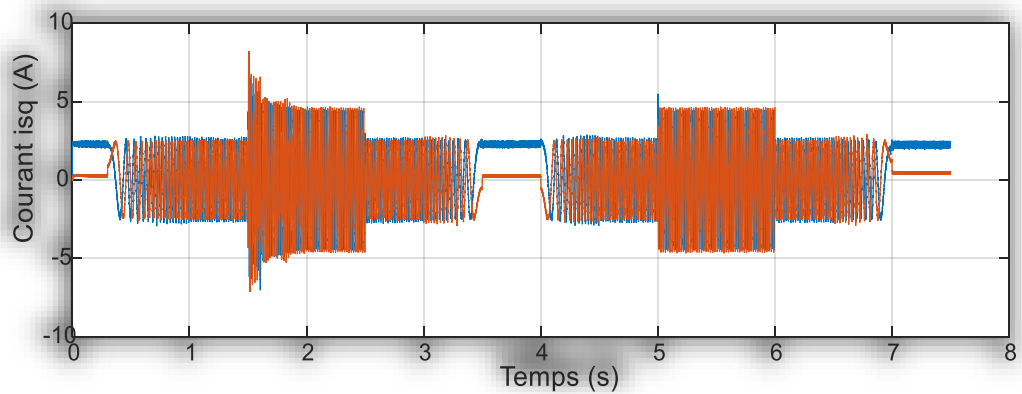


Figure (III.16) : Courant statorique.

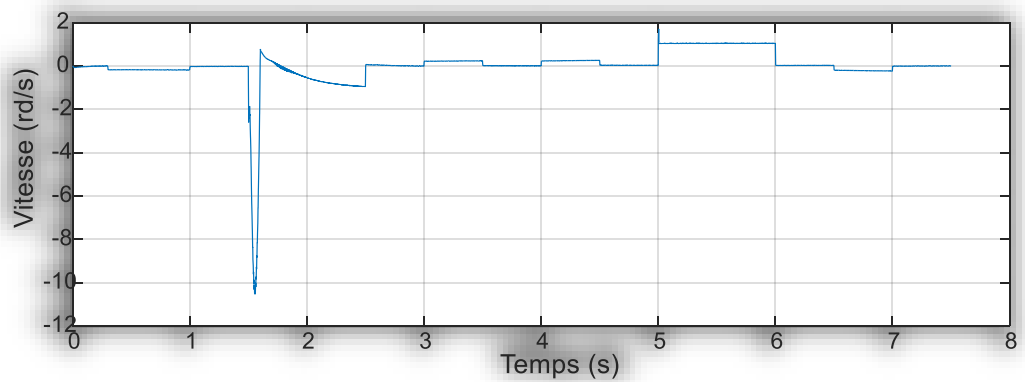


Figure (III.17) : Erreur de la vitesse.

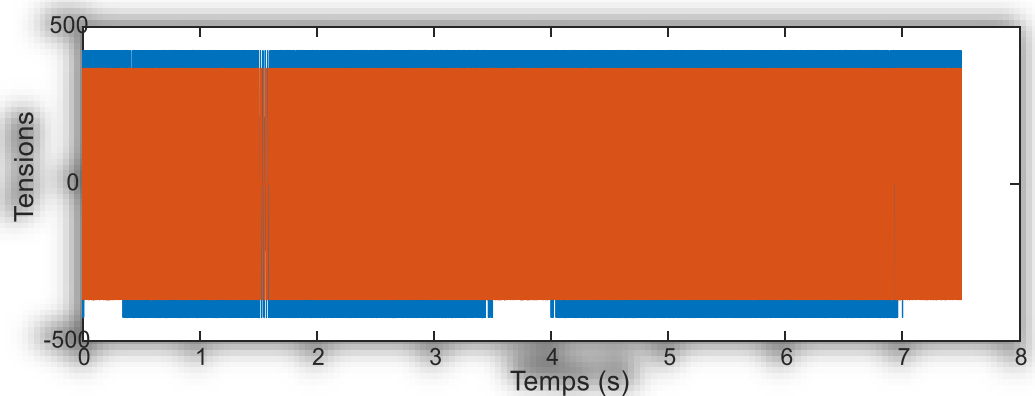


Figure (III.18) : Tensions.

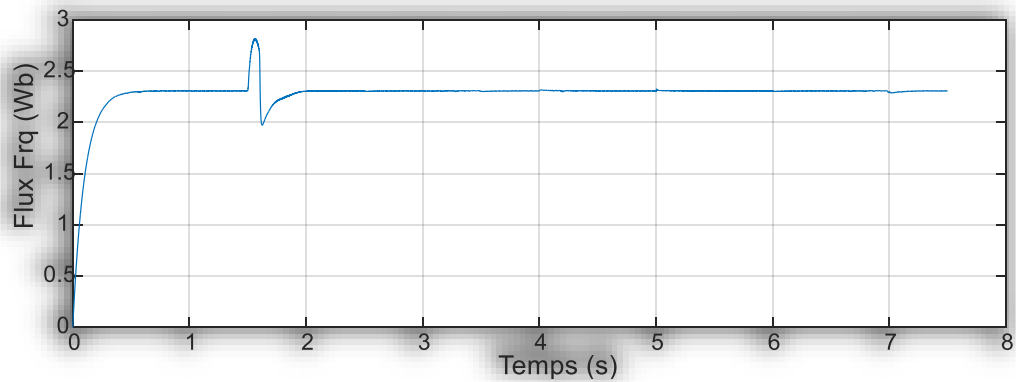


Figure (III.19) : Le flux quadratique (Wb).

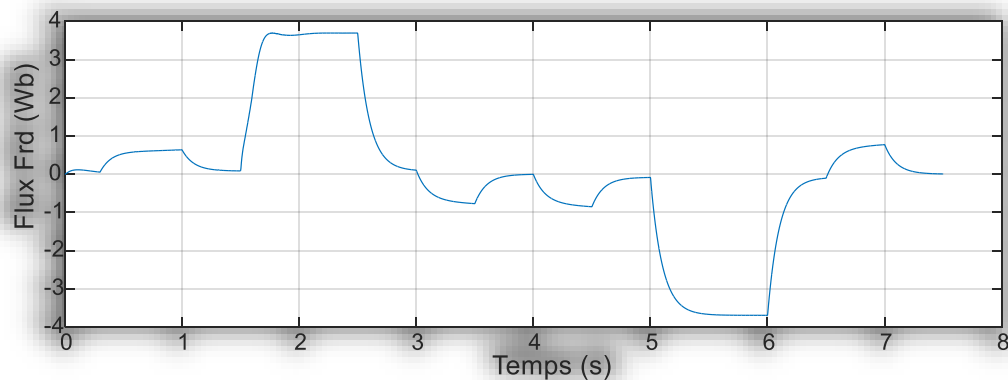


Figure (III.20) : Le flux direct (Wb).

III.8 Conclusion

En particulier, la commande vectorielle en orientant le flux de la roue assure le découplage nécessaire et permet la séparation de la commande de flux et de la commande de couple.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts de base de la lutte anti vectorielle et plus encore.

Tout d'abord, nous vous avons montré comment calculer les différentes commandes, puis nous avons effectué un test de vitesse, de charge et de résistance au déplacement. Les résultats montrent que la lutte anti vectorielle est sensible à la variation.



Chapitre IV



CHAPITRE IV : *La Réalisation Pratique de l'onduleur commandé par Arduino*



Promotion 2023

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la réalisation expérimentale d'un onduleur de Tension commandé par un signal PWM via la carte ARDUINO- UNO.

IV.2 Description du banc d'essai réalisé

Le banc d'essai réalisé au Laboratoire de l'université (figure IV.1), il est composé de :

- un onduleur de tension triphasé réalisé à base des Insolated Gate Bipolar Transistor (IGBT) K30T60.
- une carte de pilotage à base de transistors BC540 et BC 580.
- une carte d'ARDUINO UNO.

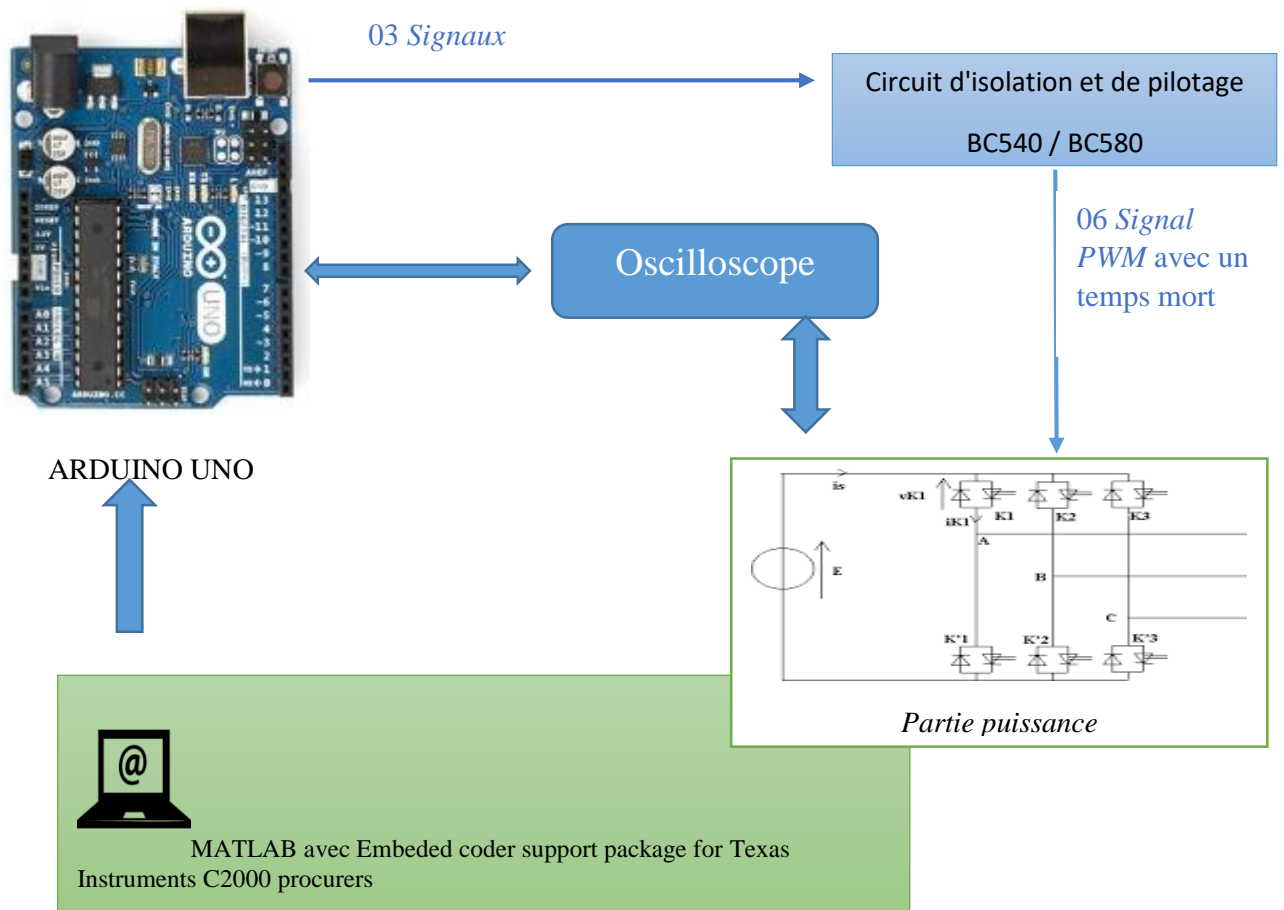


Figure (IV.1) : Schéma bloc du banc d'essai.

IV.3 Généralités sur L'Arduino

Le module Arduino est un circuit imprimé en matériel libre (plateforme de contrôle) dont les plans de la carte elle-même sont généralement publiés sur NET en licence libre. La pièce maîtresse de ce circuit est le microcontrôleur ; ce dernier est programmé peut analyser et produire des signaux électriques de manière à effectuer des tâches très diverses. Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications de l'électrotechnique industrielle et embarquée. La programmation cette carte se fait par le logiciel IDE Arduino. [34]

IV.3.1 Le choix de la carte Arduino :

Actuellement, il existe plusieurs versions de module Arduino, nous citons :

- Arduino NG, programmé avec un et employer un ATmega8.
- L'extrémité d'Arduino, avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un
- Microcontrôleur ATmega8.
- L'Arduino Nano, une petite carte programme à l'aide porte USB cette version utilisant un microcontrôleur ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version).
- Le Lily Pad Arduino, une conception de minimaliste pour l'application wearable en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- Le NG d'Arduino, avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un ATmega8.
- Le NG d'Arduino plus, avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un ATmega168.
- L'Arduino Bluetooth, avec une interface de Bluetooth pour programmer en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Diecimila, avec une interface d'USB et utilise un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Duemilanove ("2009"), en utilisant un microcontrôleur l'ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version) et actionné par l'intermédiaire de la puissance d'USB/DC.
- L'Arduino Mega, en utilisant un microcontrôleur ATmega1280 pour I/O additionnel et mémoire.
- L'Arduino Uno, utilisations microcontrôleur ATmega328.

- L'Arduino Mega2560, utilisations un microcontrôleur ATmega2560, et possède toute la mémoire à 256 KBS. Elle incorpore également le nouvel ATmega8U2 (ATmega16U2 dans le jeu de puces d'USB de révision 3).
- L'Arduino Leonardo, avec un morceau ATmega32U4 qui élimine le besoin de raccordement d'USB et peut être employé comme clavier.
- L'Arduino Esplora : ressemblant à un contrôleur visuel de jeu, avec un manche et des sondes intégrées pour le bruit, la lumière, la température, et l'accélération. [34]

Parmi ces types, nous avons choisi une carte Arduino Uno Basique (Figure IV.2). L'intérêt principal de cette carte est de faciliter la mise en œuvre de la commande de l'onduleur. L'Arduino fournit un environnement de développement s'appuyant sur des outils open source comme interface de programmation. L'injection du programme dans la mémoire du microcontrôleur se fait d'une façon très simple par la liaison USB. Cette carte est basée sur un microcontrôleur ATmega 328. Elle contient également une mémoire morte de 1 kilo, dotée de 14 entrées/sorties digitales « dont 6 peuvent être utilisées en tant que sortie PWM », 6 entrées analogiques et un cristal à 16 MHz, une connexion USB et possède un bouton de remise à zéro et une prise jack d'alimentation.

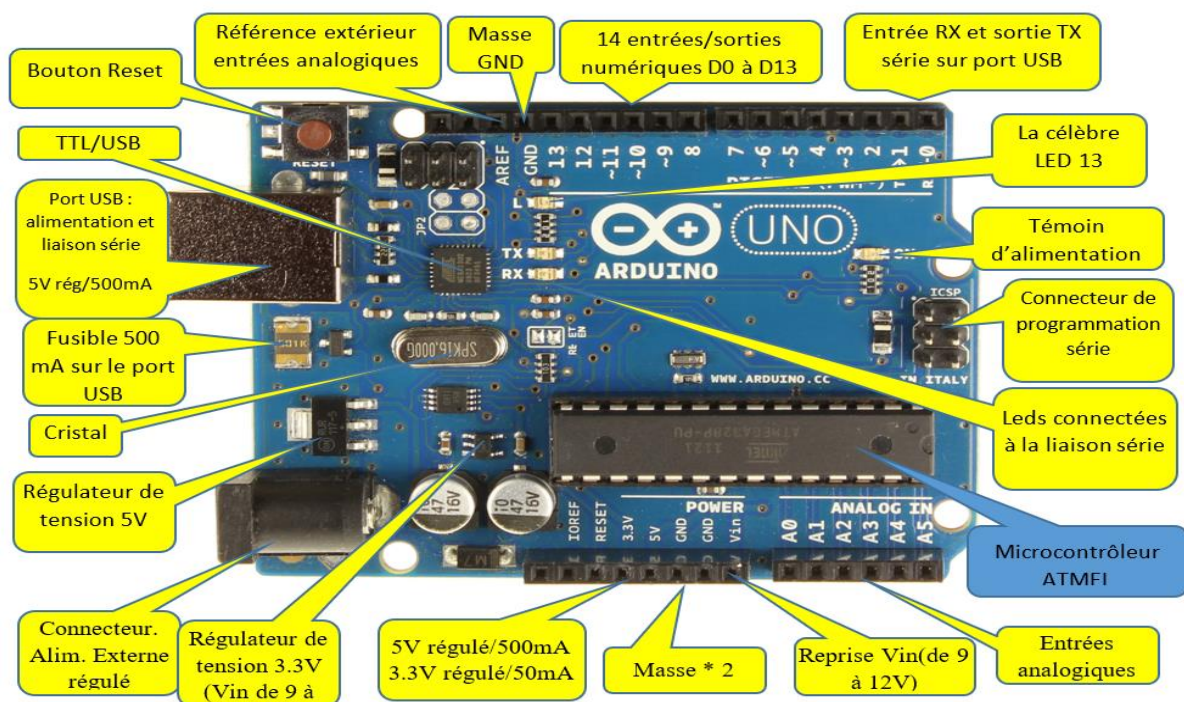


Figure (IV.2) : Carte Arduino UNO Basique.

La structure de la carte ARDUINO-UNO détaillée est illustrée par la figure (IV.3)

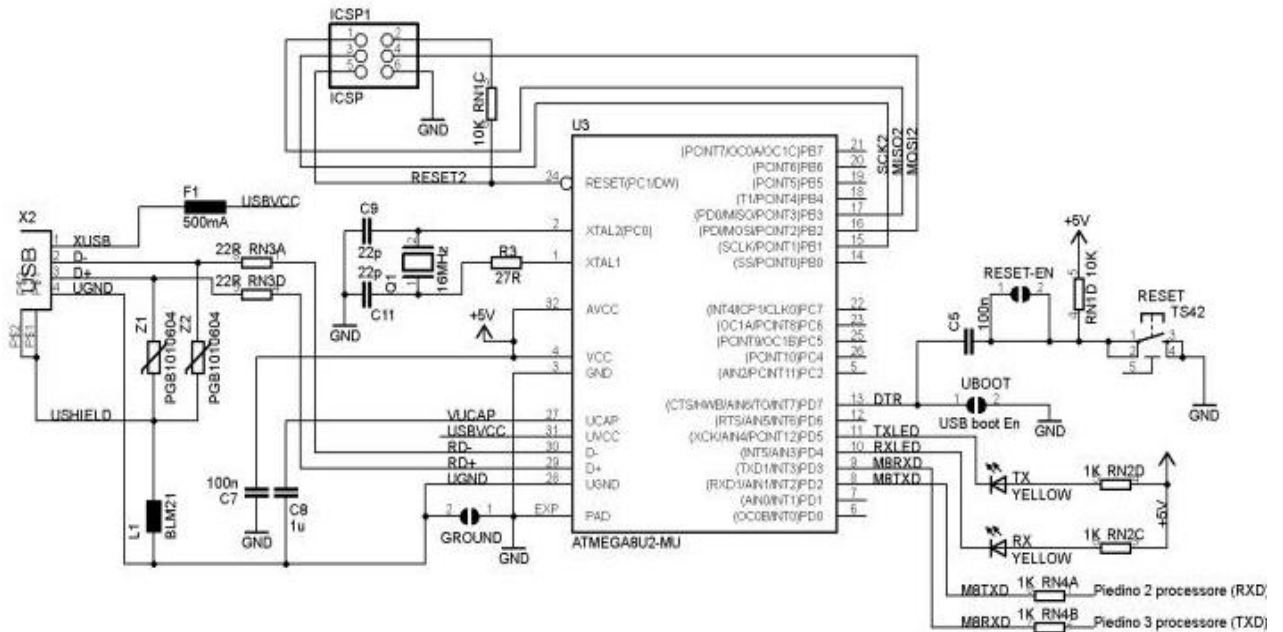


Figure (IV.3) : Structure de la carte ARDUINO-UNO [13].

IV.3.2 Caractéristiques de la carte Arduino Uno :

- ❖ Microcontrôleur : ATmega328.
- ❖ Tension d'alimentation interne = 5V.
- ❖ Tension d'alimentation (externe)= 7 à 12V, limites =6 à 20 V.
- ❖ Entrées/sorties numériques : 14 dont 6 sorties PWM.
- ❖ Entrées analogiques = 6.
- ❖ Courant max par broches E/S = 40 mA.
- ❖ Courant max sur sortie 3,3V = 50mA.
- ❖ Mémoire Flash 32 KB.
- ❖ Mémoire SRAM 2 KB.
- ❖ Mémoire EEPROM 1 KB.
- ❖ Fréquence horloge = 16 MHz.
- ❖ Confection au PC par prise USB.
- ❖ Dimensions = 68.6mm x 53.3mm.

IV.3.3 Alimentation de la carte ARDUINO :

Selon le constructeur, la carte Arduino nécessite une tension alimentation de 9V à 12V via une alimentation externe stabilisée en utilisant un connecteur (figure IV.4) ou bien via la connexion USB (qui fournit 5V - 500mA).



Figure (IV.4) : Le connecteur de la carte.

IV.3.4 Les entrées & sorties

Cette carte possède 14 broches numériques (numérotée de 0 à 13) (Figure IV.5) peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique, en utilisant les instructions `pinMode ()`, `digitalWrite ()` et `digitalRead ()` du langage Arduino. Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir un courant maximal de 40mA d'intensité et dispose d'une résistance interne de "rappel au plus" (pull-up) (déconnectée par défaut) de 20 50KOhms. Cette résistance interne s'active sur une broche en entrée à l'aide de l'instruction `digital Write (broche, HIGH)`. En plus, certaines broches ont des fonctions spécialisées :

- Interruptions Externes : Broches 2 et 3. Ces broches peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, sur un front montant ou descendant, ou sur un changement de valeur. -Impulsion PWM (largeur d'impulsion modulée) : Broches 3, 5, 6, 9, 10, et 11. Fournissent une impulsion PWM 8-bits à l'aide de l'instruction `analogWrite ()`.
- SPI (Interface Série Périphérique): Broches 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Ces broches supportent la communication SPI (Interface Série

Périphérique) disponible avec la librairie pour communication SPI. Les broches SPI sont également connectées sur le connecteur ICSP qui est mécaniquement compatible avec les cartes Mega.

- I2C : Broches 4 (SDA) et 5 (SCL). Supportent les communications de protocole I2C (ou interface TWI (TwoWire Interface - Interface "2 fils"), disponible en utilisant la librairie Wire/I2C (ou TWI - Two-Wire interface - interface "2 fils").
- LED: Broche 13. Il y a une LED incluse dans la carte connectée à la broche 13. Lorsque la broche est au niveau HAUT, la LED est allumée, lorsque la broche est au niveau BAS, la LED est éteinte.
- La carte Uno dispose 6 entrées analogiques (numérotées de 0 à 5), chacune pouvant fournir une mesure d'une résolution de 10 bits (càd sur 1024 niveaux soit de 0 à 1023) à l'aide de la très utile fonction analogRead () du langage Arduino. Par défaut, ces broches mesurent entre le 0V (valeur 0) et le 5V (valeur 1023), mais il est possible de modifier la référence supérieure de la plage de mesure en utilisant la broche AREF et l'instruction analog Reference du langage Arduino. La carte Arduino Uno intègre un fusible qui protège le port USB de l'ordinateur contre les surcharges en intensité (le port USB est généralement limité à 500mA [35])

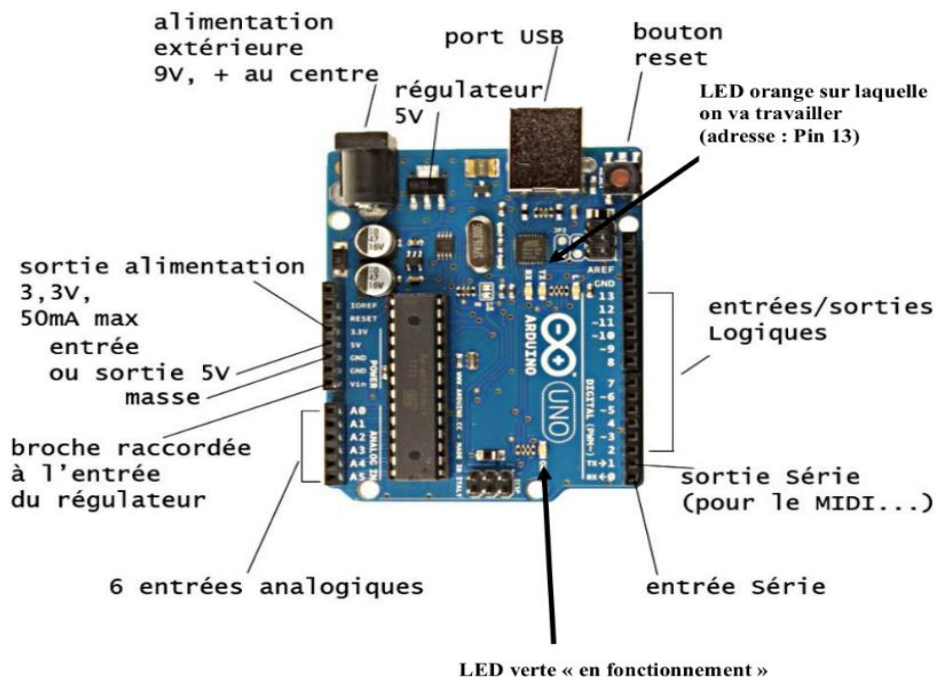


Figure (IV.5) : Description de la carte Arduino (entrées / sorties).

IV.4 Programmation de la carte Arduino :

Une telle carte à base sur d'un microcontrôleur doit être dotée d'une interface de programmation. Dans notre cas l'environnement de programmation utilisé est un logiciel en open-source téléchargé gratuitement (pour Mac OS X, Windows, et Linux) comme le montre la Figure (IV.6). C'est un logiciel de programmation par code (noté IDE : Integrated Development Environment), qui contient une cinquantaine de commandes différentes. . L'IDE permet d'écrire, de modifier un programme et de le convertir en une série d'instructions compréhensibles pour la carte.

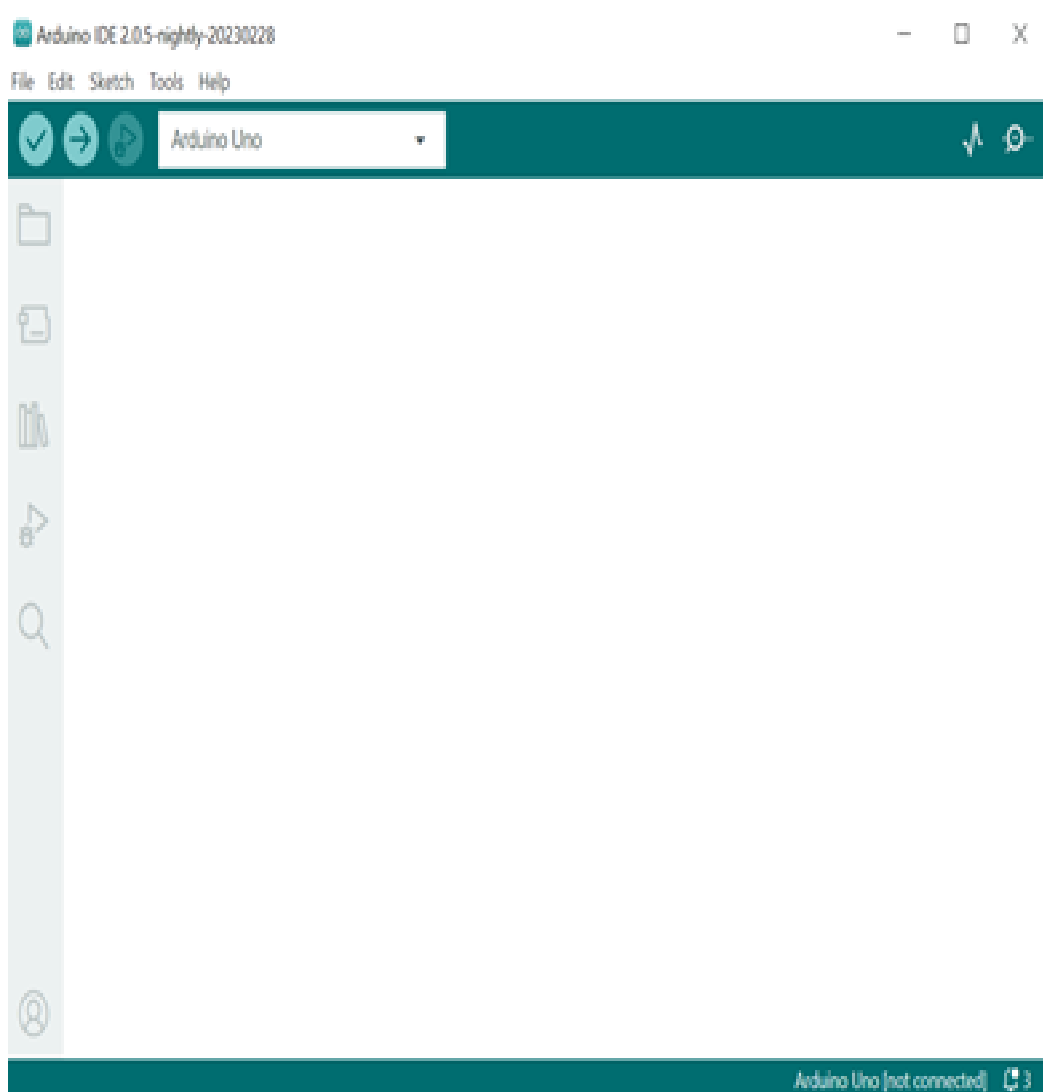


Figure (IV.6) : Environnement de programmation.

IV.5 structure du programme

La programmation de l'Arduino est structurée selon trois parties principales : structure, valeurs (variables et constantes), et fonctions. Ces trois structures sont illustrées sur le tableau suivante :

Structure générale	Variables	Fonctionne E/S
set	Constants	numérique
up	HIGH LOW	pinMode ()
()	INPUT	digitalWrite()
loop	OUTPUT INPUT_PULLUP	digitalRead()
p()	UP	E/S analogique
Contrôle et conditions	true false	analogReference()
If	integer	analogRead()
if...	constants	analogWrite() - PWM
else	floating point constants	Due only
for	Data	analogReadResolution()
switch	Type	analogWriteResolution()
case	s	E/S Avancé
while	void	tone()
do...	Bool	noTone()
while	ean	shiftOut()
break	char	shiftIn ()
continue	unsigned	pulseIn ()
return	charbyte	Gestion du temps
goto	int	millis ()
Autres commandes	unsigned	micros()
(semicolon)	int	delay()
{ } (curly braces)	word	delayMicroseconds()
// (single line comment)	long	Math
/* */ (multi-line comment)#define	unsigned long	min()
#include	short	max()
Arithmetic Operators	float	abs()
	double	
	ble	

= (assignment operator) + (addition) - (subtraction) * (multiplication) / (division) % (modulo) Opérations de comparaison == (equal to) != (not equal to) < (less than) > (greater than) <= (less than or equal to) >= (greater than or equal to) Operations booléennes && (and) (or) ! (not) Pointer Access Operators * dereference operator & reference operator Bitwise Operators & (bitwise and) (bitwise or)	string - char array String – object array Conversion char() byte() int() word() lon g() flo at() Variable Scope & Qualifiers variable scope static vola tile cons t Random Numbers randomSeed () random() Bits and Bytes low Byte() high Byte() bit Read() bit Write() bit Set()	constrain() map() pow() sqrt() Trigonométrie sin() cos() tan() bitClear() bit() Interruptions Externes attachInterrupt() detachInterrupt() noInterrupts ()
---	---	---

IV.6 Schéma de Simulation de l'onduleur triphasé sous (Proteus)

La Figure (IV.7) illustre le schéma de simulation de la commande par Arduino de l'onduleur triphasé à pleine onde par le logiciel Proteus.

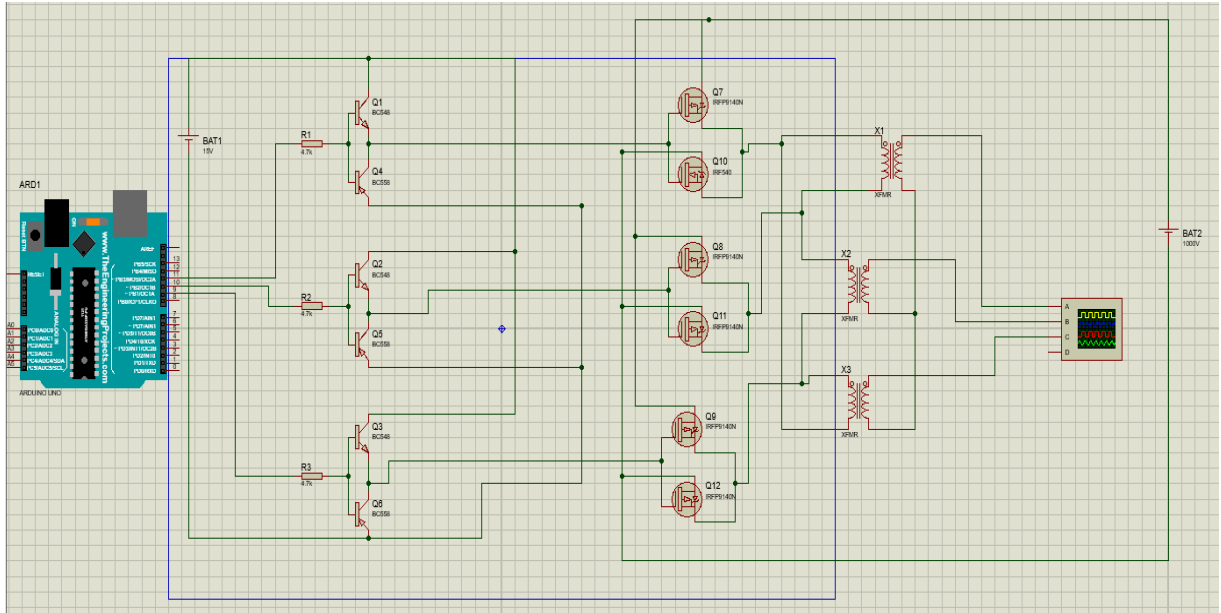


Figure (IV.7) : Schéma de simulation de la commande de l'onduleur.

IV.6.1 Résultats de Simulation

La figure (IV.8) montre la forme de l'onde des tensions à la sortie de l'onduleur pour les trois phases ; on remarque que les trois phases sont déphasées de 120° ce qui confirme la faisabilité de la commande) pleine onde.

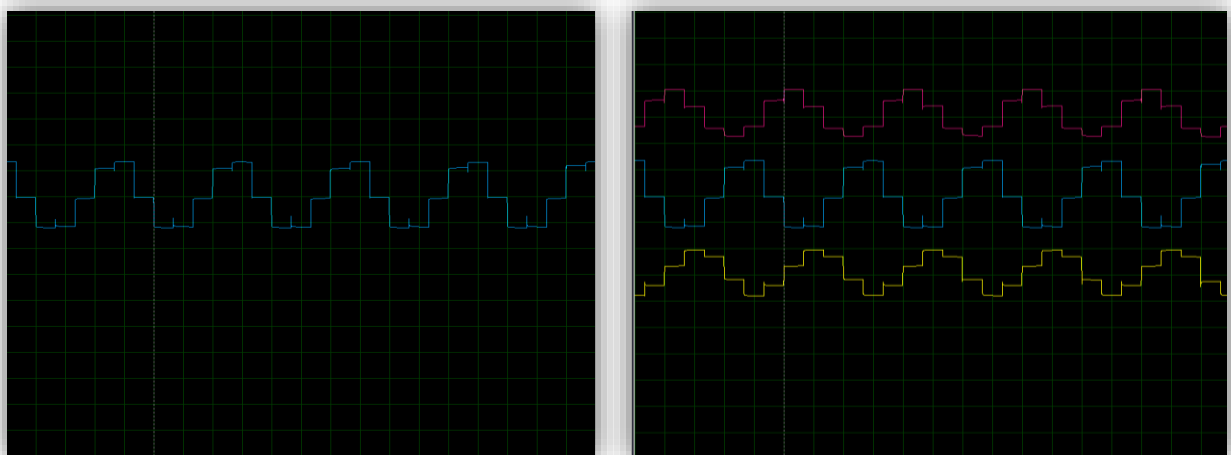


Figure (IV.8) : Forme de l'onde des tensions à la sortie de l'onduleur.

IV.7 Programme de réalisation de la PWM par Arduino

```
// ----- <Electronics-project-hub>com ----- //

const int output_1 = 9;

const int output_2 = 10;

const int output_3 = 11;

const int t = 3310;

void setup()

{

  pinMode(output_1, OUTPUT); // Phase 1

  pinMode(output_2, OUTPUT); // Phase 2

  pinMode(output_3, OUTPUT); // Phase 3

}

void loop()

{

  delayMicroseconds(t);

  digitalWrite(output_1, LOW);

  delayMicroseconds(t);

  digitalWrite(output_2, HIGH);

  delayMicroseconds(t);

  digitalWrite(output_3, LOW);

  delayMicroseconds(t);

  digitalWrite(output_1, HIGH);

  delayMicroseconds(t);

  digitalWrite(output_2, LOW);
```

```
delayMicroseconds(t);  
  
digitalWrite(output_3, HIGH);  
  
}  
  
// ----- <Electronics-project-hub>com ----- //
```

IV.8 Réalisation pratique de l'onduleur

➤ Circuit imprimé

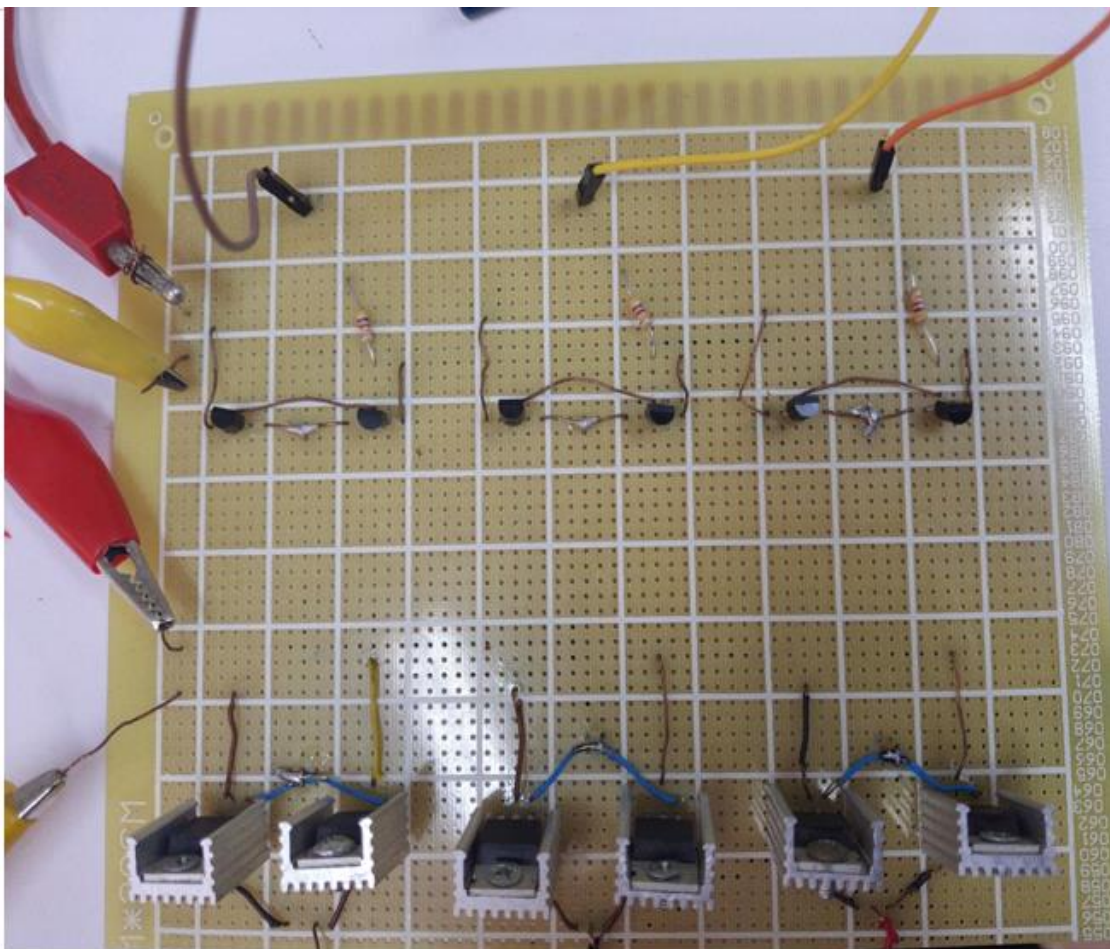


Figure (IV.9) : Circuit imprimé de l'onduleur à six interrupteurs IRF.

➤ Banc d'essai

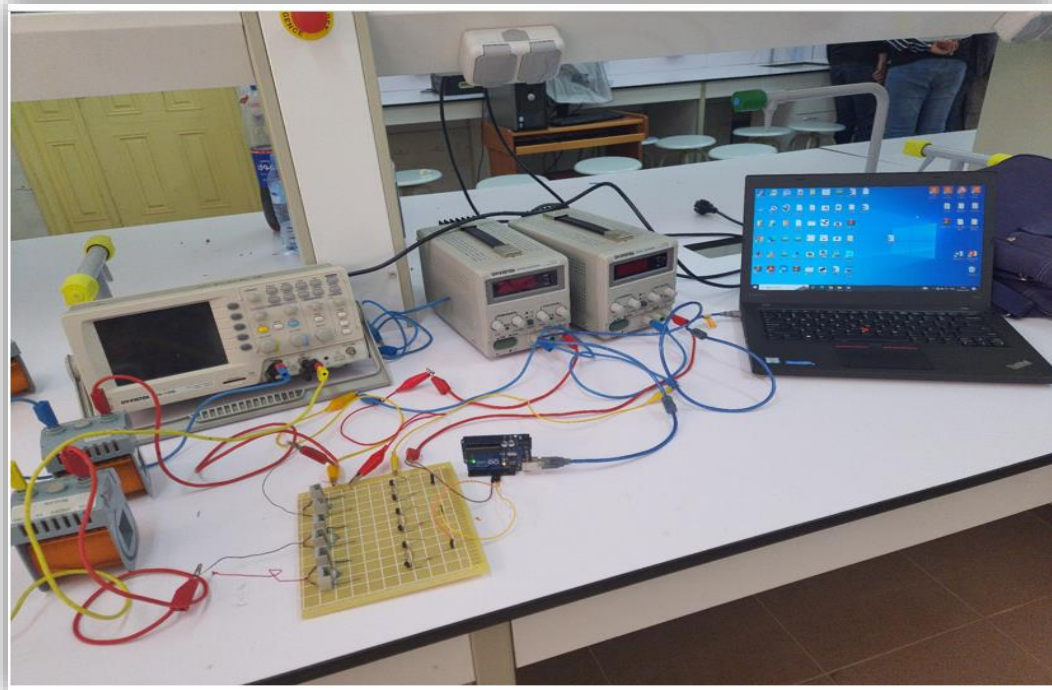


Figure (IV.10) : Photo du Banc d'essai.

➤ Résultats



Figure (IV.11) : Forme des signaux de commande (PWM).

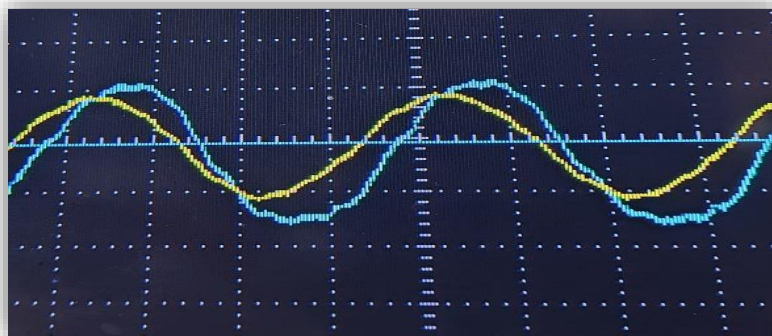


Figure (IV.12) : Forme d'onde des tensions issues de l'onduleur commandé à pleine onde avec filtrage.

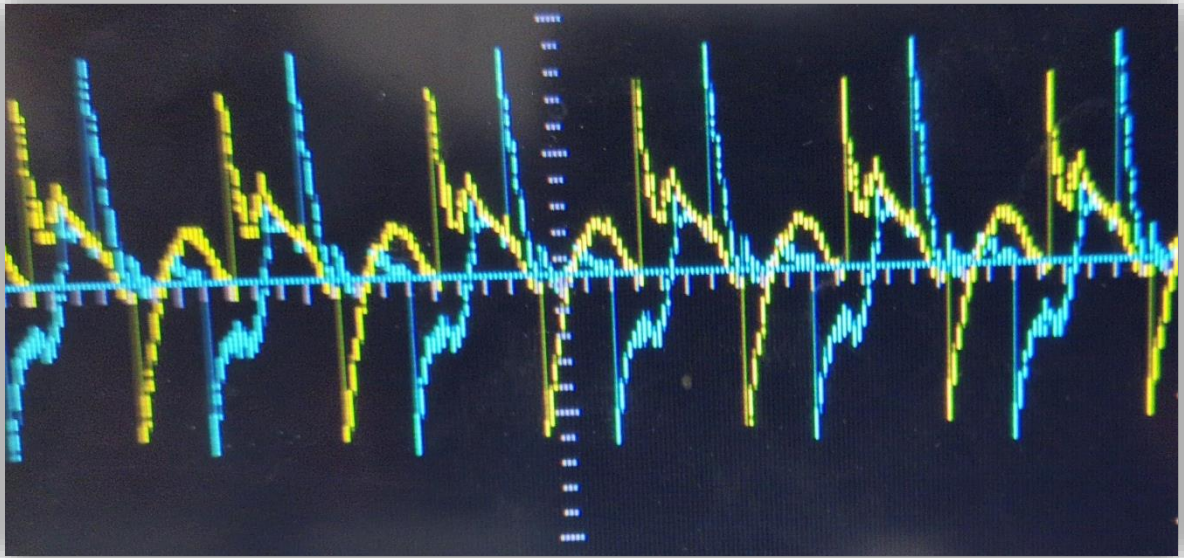


Figure (IV.13) : Forme d'onde des tensions issues de l'onduleur commandé à fréquence élevée sans filtrage.

IV.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la réalisation de l'onduleur triphasé commandé à pleine onde et à fréquence élevée. Vu le manque d'équipements performant, on n'a pas pu réaliser un onduleur puissant. Dans l'annexe on a proposé un onduleur puissant basé sur des IGBT de puissance qui peut être exploité dans l'environnement industriel. Les résultats obtenus confirment l'étude théorique qu'on a présentée dans les chapitres précédents.



Conclusion générale



Promotion 2023

Conclusion Générale

Notre mémoire de fin d'études a pour objectif la réalisation pratique d'un onduleur triphasé c'est-à-dire la mise en place d'un banc d'essais expérimental au niveau de laboratoire de génie électrique à l'université d'Abbes Laghrour Khenchela. L'onduleur réalisé sera dédié à la commande d'un moteur asynchrone triphasé à cage.

La machine asynchrone, de par sa construction, est la machine la plus robuste et la moins chère. Les progrès réalisés en commande et les avancées technologiques considérables, tant dans le domaine de l'électronique de puissance que dans celui de la micro-électronique, ont rendu possible l'implantation des commandes performantes de cette machine faisant d'elle un concurrent redoutable dans les secteurs de la vitesse variable.

En général, la commande de la machine asynchrone se divise en deux classes.

- Commande de faible coût et faible performance (par exemple la commande V/f).
- Commande à haute performance, exemple la commande vectorielle indirecte par orientation de flux rotorique (IRFOC) : indirect rotor field oriented control) qui assure une dynamique élevée. C'est pour ça on a opté cette dernière pour appliquer les tensions issues de notre onduleur.

Le mémoire est organisé en quatre chapitres, en plus d'une introduction générale et une conclusion générale. Les résultats de simulation obtenus montrent la faisabilité du modèle que ce soit de l'onduleur ou de la machine asynchrone et sa commande. Les résultats de validation expérimentale de l'onduleur réalisé à travers l'application de deux commandes (plein onde et MLI).

Ce travail a mis en évidence l'importance de la réalisation pratique, il est vrai que les systèmes de simulation nous ont aidé pour savoir ou en va dans l'expérience, mais la réalisation nous a appris beaucoup de choses et de techniques qu'on aurait jamais eu avec la simulation.

Nous suggérons comme travaux qui rendent notre projet plus performant est exploitable dans différents domaines :

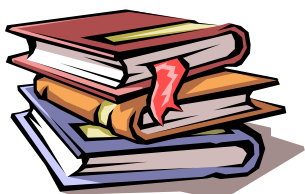
- Utilisation des interrupteurs puissants (plus 2KW)
- Utilisation de la technique de l'intelligence artificielle pour la commande de l'onduleur et son adaptation avec la charge.



Bibliographies



Promotion 2023



Bibliographies



- [1] BOUKAROURA Abdelkader, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond-Graph », Magister en électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif 2009.
- [2] Application ASI, « onduleur de tension description », www.wikipédia.com
- [3] Adjimi Nadia et Belaidi Wahiba, « modélisation et commande d'un onduleur MLI », Mémoire master, Université Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi, 2009.
- [4] G. Segulier and F. Labrique, '*Les Convertisseurs de l'Electronique de Puissance*', Tome 4 : La Conversion Continu-Alternatif', Edition Lavoisier, Technologie et Documentation, 1989.
- [5] Benadel HANI Choudira MESSAOUD, technique de commande d'un onduleur triphasé, projet de fin d'étude licence génie électrique.
- [6] Discovery kit with STM32F407VG MCU User Manual, www.st.com/resource/en/user_manual/dm00039084.pdf
- [7] Tamrabet Hanene" Robustesse d'un Control Vectoriel de Structure Minimal d'une Machine Asynchrone " Mémoire de magistère, Batna, 2006.
- [8] OKBA Salah et BEDDIAR Walid " Etude et réalisation d'un onduleur detension triphasé à MLI ", projet de fin d'étude master génie électrique. 2019
- [9] Benyahia. M, "Commande non linéaire et prédictive application à la machine asynchrone " Mémoire de magister, Université de Batna 2001.
- [10]R. Mohamed, "Simulation et réalisation d'un onduleur de tension monophasé à trois niveau". Mémoire de fin d'étude, institut d'électrotechnique, université de Batna 2002.
- [11]D. Abdennour, "Contrôle direct du couple du moteur à induction sans capteur de vitesse associée à un observateur non linéaire ", Thèse de magister, Université de Batna.
- [12]G. Brahim," Commande non linéaire de la machine à induction", Mémoire de master, Université de Batna, 2012.
- [13]Lamine M, Traoré.A, "Modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à

l'aide du logiciel Matlab/Simulink", MSAS_pp 038_45.

[14] M. Med Brahim et Redouani Med Mokhtar, " Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone ", Memoire de master, Université d'El-Oued, 2014.

[15] "Application de la technique de linéarisation par retour d'état à la commande d'une machine asynchrone ". PFE, Université M'sila, 2003.

[16] B. Smail, " Commande vectorielle d'une machine asynchrone alimentée en tension, mémoire ingénieur d'état", Université de Batna, 1995.

[17] A. Essadki, A.Oukassi, M.Maaroufi ,M.Cherkaoui, "Orientation de flux d'une machine asynchrone à cage alimentée en courant estimation du flux rotorique ", IEEE, 2000.

[18] Y. D. Landau, "Adaptive Control ". The Modèle Référence Approche. Inc., NewYorck, 1979.

[19] M.Salima ," Commandes adaptative et prédictive de la machine asynchrone ", Mémoire de doctorat ,Mentouri de Costantine 2009.

[20] B.Tark "Commande vectorielle de la machine asynchrone par régulateur RST" Mémoire d'ingénieur, université de Batna, 2003.

[21] Ch.Khoutir "modélisation de la machine asynchrone" Mémoire d'ingénieur l'universite de m'sila ,2006.

[22] P.Krishnamurthy, F.Khorrami, "Adaptative Partial-State Feedback Control for Induction Motors, American control conférence, Denver, Colorado, June 4-6, 2003.

[23] BEDDIAF YASSINE. " VALIDATION EXPERIMENTALE D'ESTIMATEURS ET D'OBSERVATEURS ROBUSTES DE FLUX ET DE VITESSE POUR UNE MACHINE ASYNCHRONE" Mémoire de fin d'étude DOCTORAT d'électrotechnique, université de Batna 2016.

[24] F.MohamedSadadik," Commande optimale d'une moteur asynchrone muni d'un pilotage vectoriel ", Mémoire de master, université de Kasdi Merbah Ouargla, 2016

[25] G.Buche, "commande vectorielle de machine asynchrone en environnement temps réel matlab/simulink", Mémoire de fin d'étude, C.U.E.F.A de Grenoble, France, 2001.

[26] Michael A. Johnson, Mohammad H. Moradi 'PID Control New Identification and Design Methods', Springer-Verlag London Limited, 2005.

[27] K.Ogata, Modern Control Engineering, Prentice Hall, UpperSaddle River, NewJersy, 1997.

[28] M. Bazi Smail, " Contribution à la commande robuste d'une machine asynchrone par technique PSO ", Mémoire de magister, université de Batna, 2009.

[29] B. Lotfi : Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques. Mémoire présentée pour l'obtention du titre de doctorat à l'université Henri Poincaré, Nancy I, en génie électrique, 1999.

[30] S. Gusia, " Modélisation des systèmes électroniques puissance à commande MLI Application aux actionnements électriques", Université catholique de Louvain, Mémoire de doctorat 2005.

[31] Ch. Djamel, " Commande d'une machine asynchrone par logique floue", Thèse de master, Université de El-Oued 2014.

[32] T. Mohamed, " Commande par linéarisation exacte d'une machine asynchrone régime de fluxé". Mémoire présentée pour l'obtention du grade de (P.H.D) à l'université de Laval .Québec, 1997.

[33] K. Arab Tehrani, « Conception, synthèse et application d'une nouvelle commande robuste par PID fractionnaire pour les onduleurs Multiniveaux, »Mémoire de Doctorat, Institut Nationale Polytechnique de lorraine, 2010.

[34] Y. Hadji, Yasser Gadi, « Détection de défauts dans le convertisseur à MLI d'une Machine Asynchrone, » Mémoire de Master académique, université kasdiMerbah, Ouargla, 2014.

[35] B. Wafa, « Convertisseurs Multiniveaux dans les systèmes PV connectés au réseau, » Mémoire de Magister, université Mohamed Khider, Biskra, 2009

[36] Tutoriel de programmation Arduino mega 2560, <https://www.cours-gratuit.com/cours-arduino/tutoriel-de-programmation-arduino-mega-2560-pdf>

[37] Carte Arduino UNO R3 caractéristiques, description, <https://arduino-france.site/description-arduino-uno/>

[38] BERREZZEK FARID, «Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone », Magister en électrotechnique, Université BADJI MOKHTAR

[39] AYACHI ZAKARIA, DJOTNI KARIM, «ETUDE ET SIMULATION D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE», Magister en électrotechnique, Université BADJI MOKHTAR – ANNABA 2021

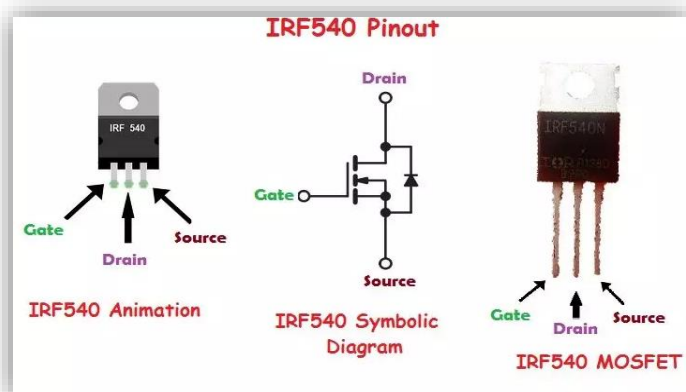


Annexes

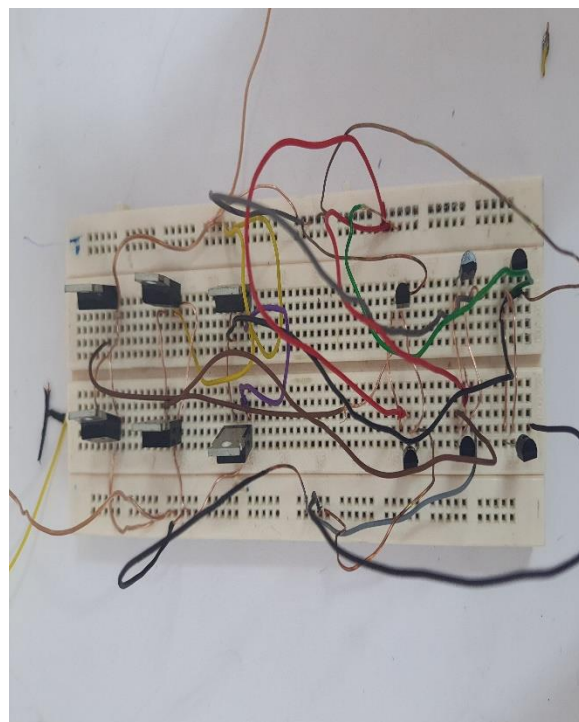
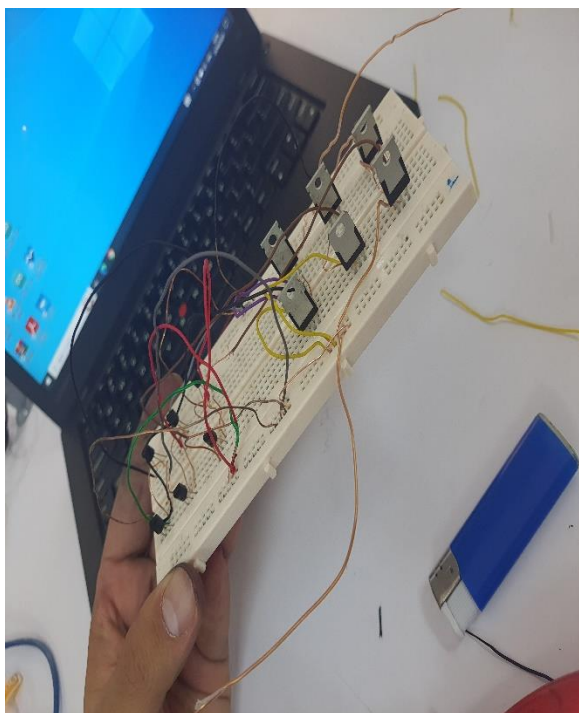
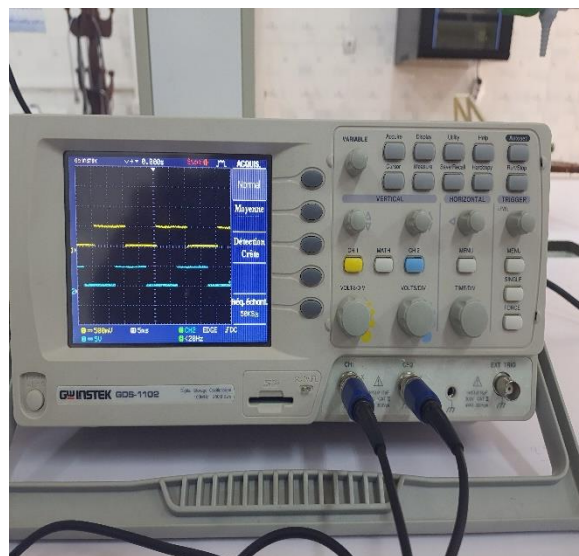
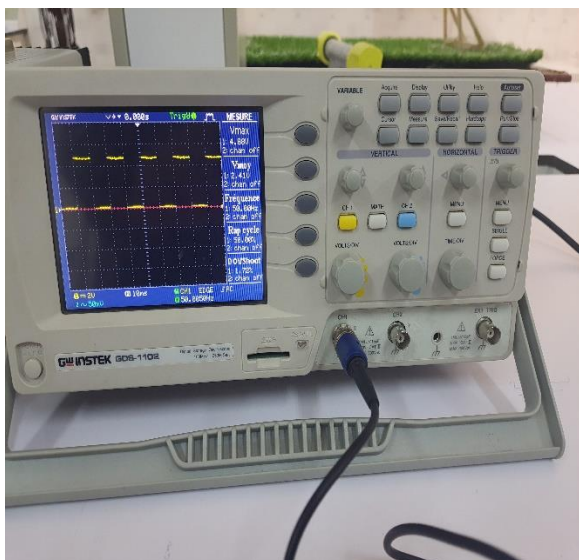


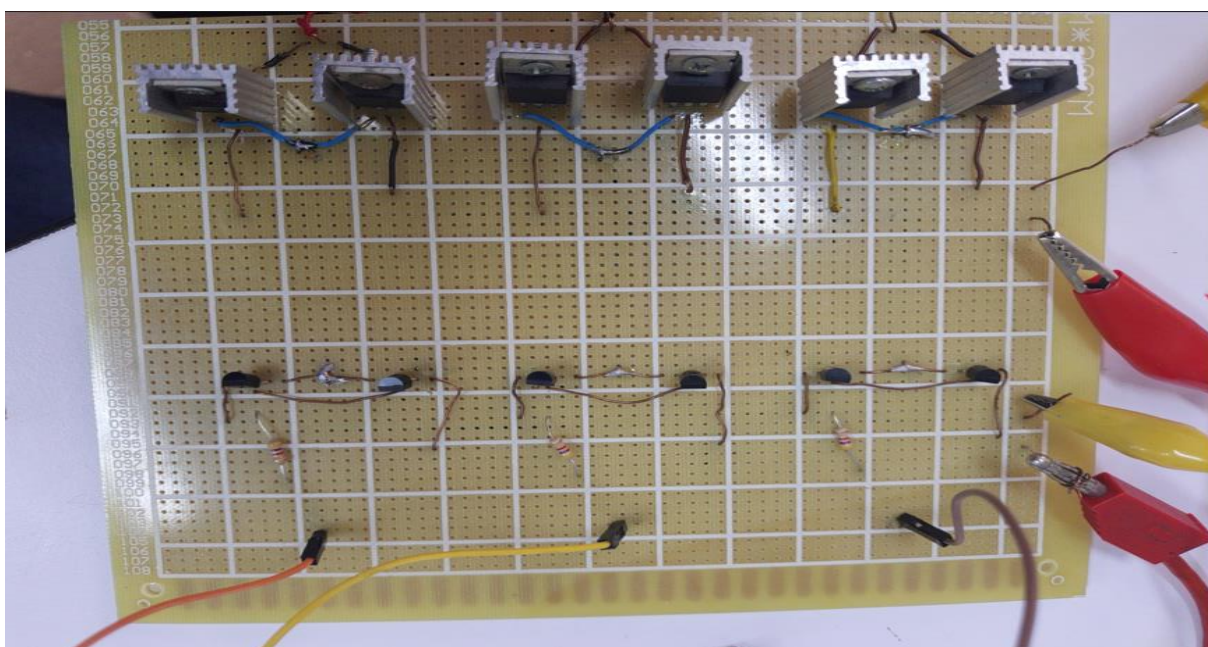
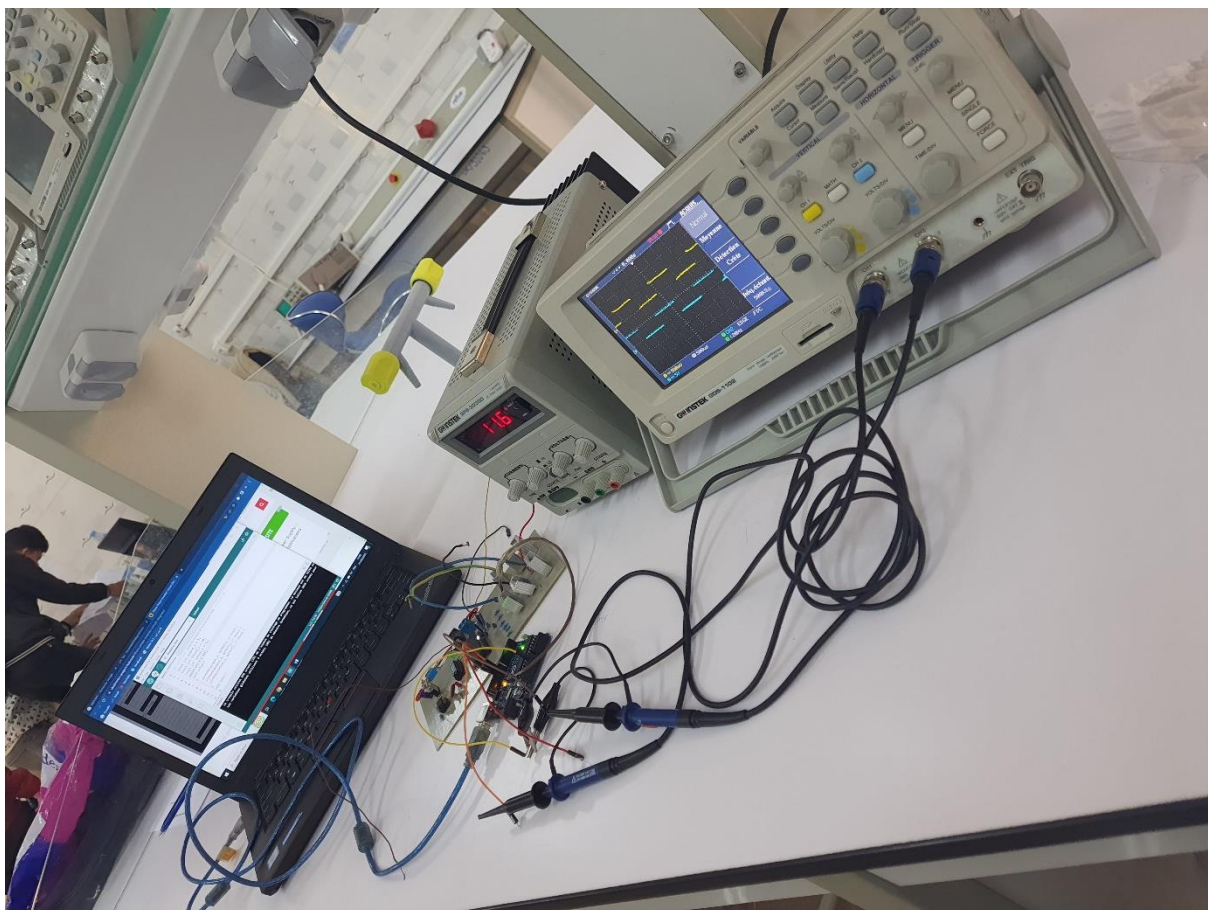
Promotion 2023

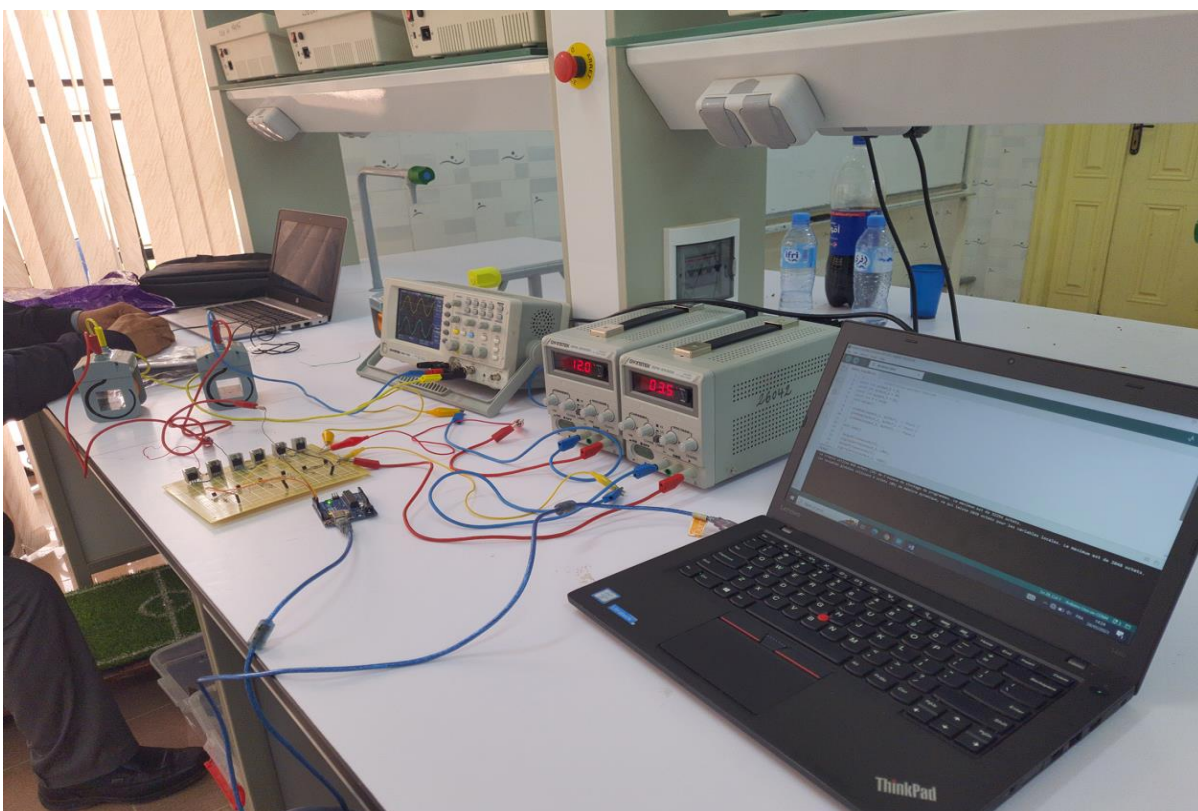
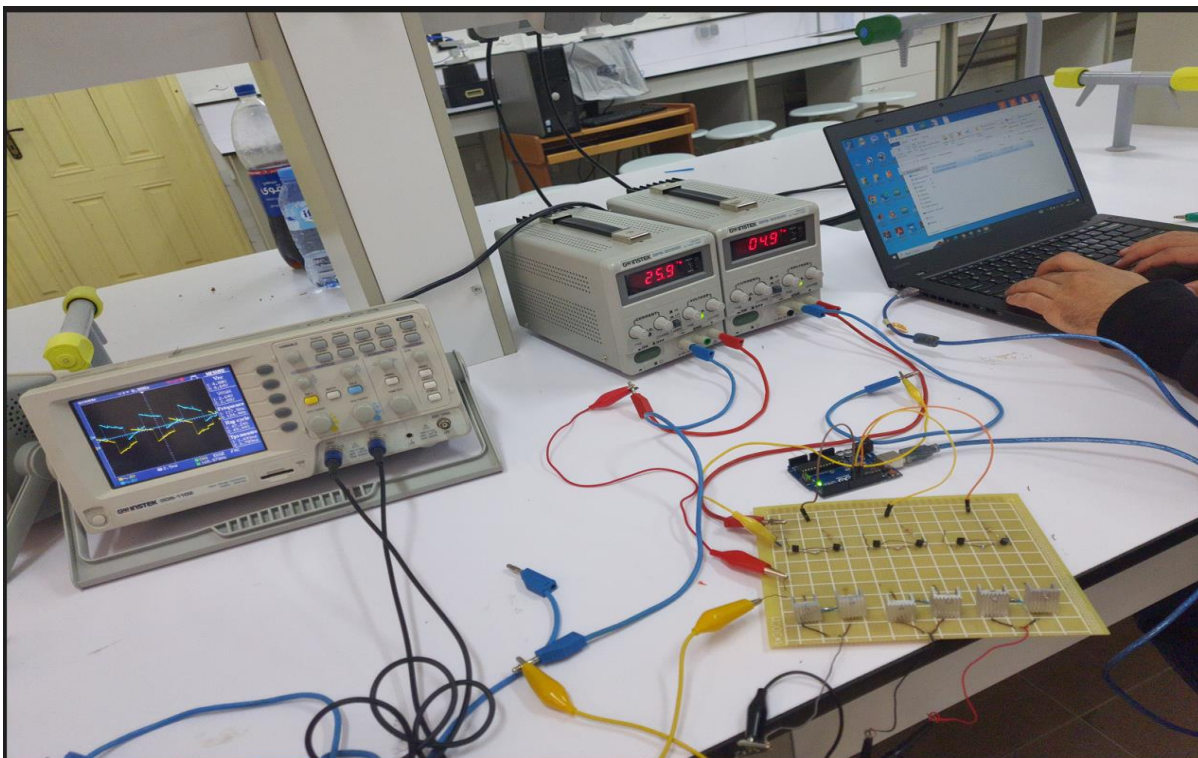
Annexe 1 :

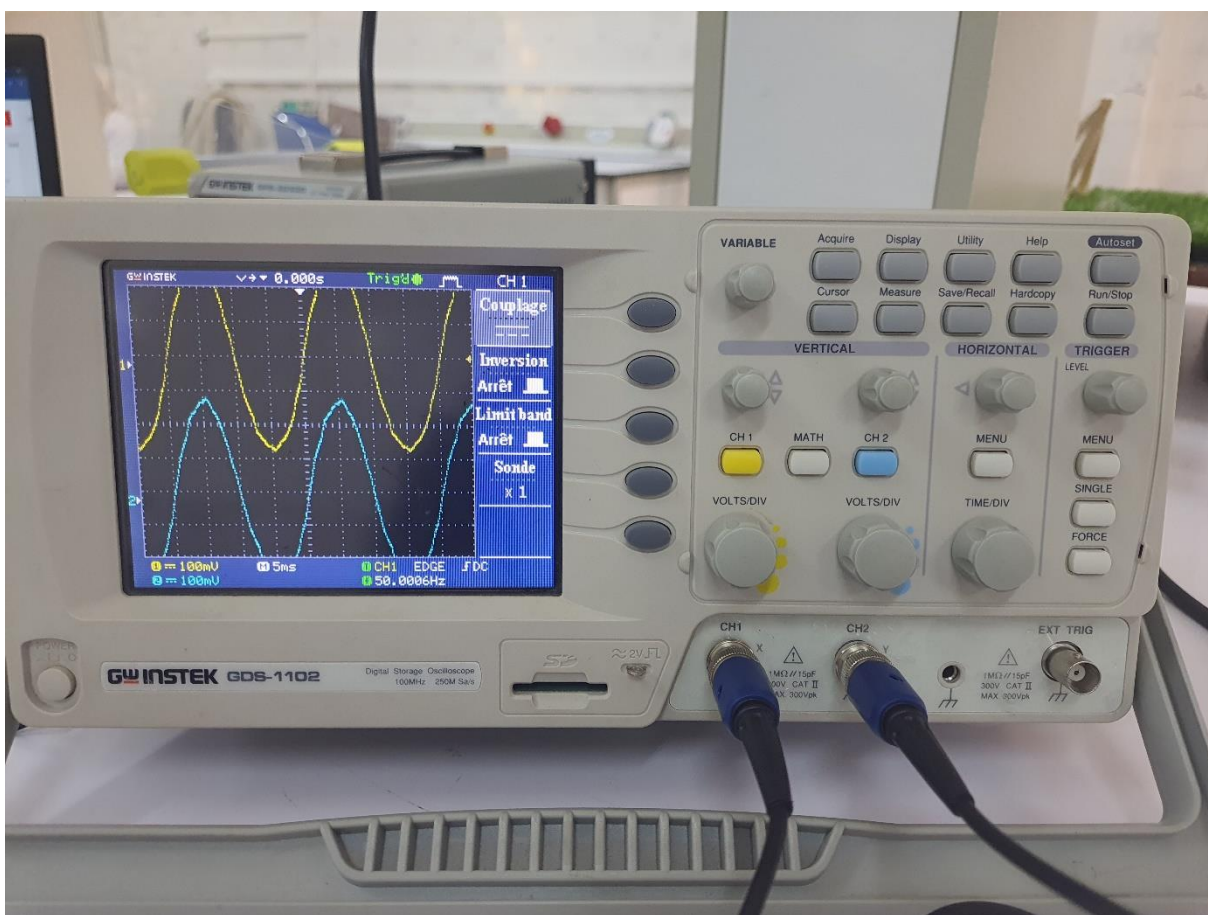
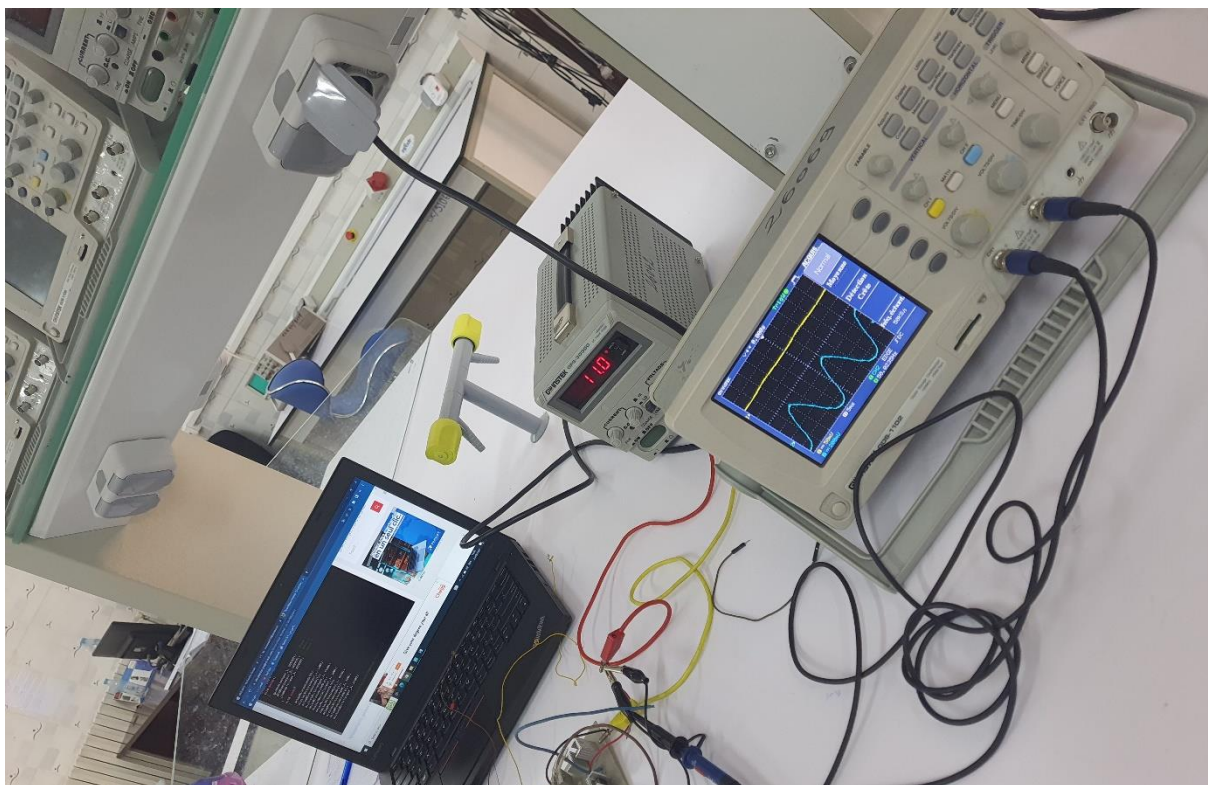


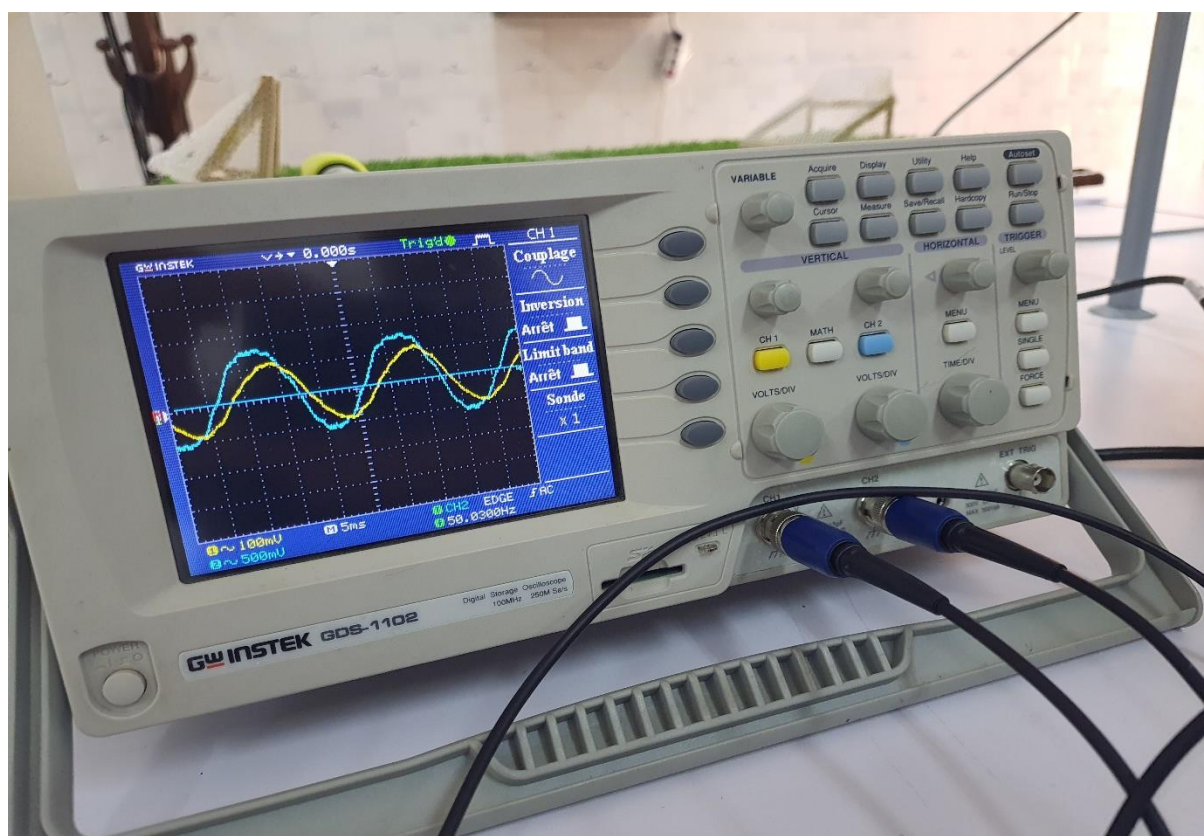
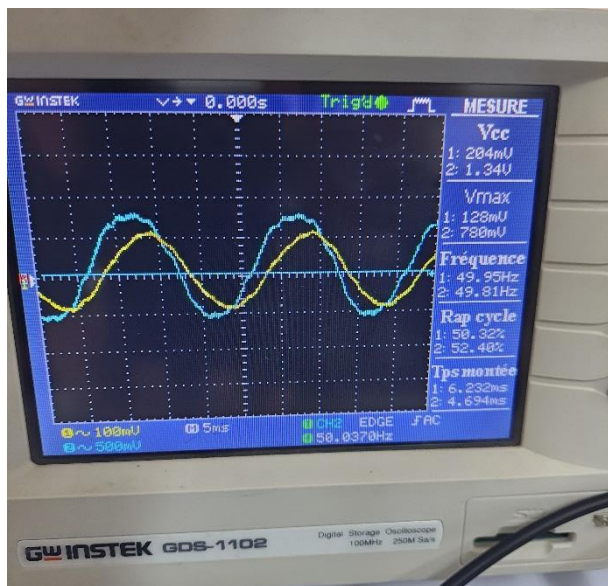


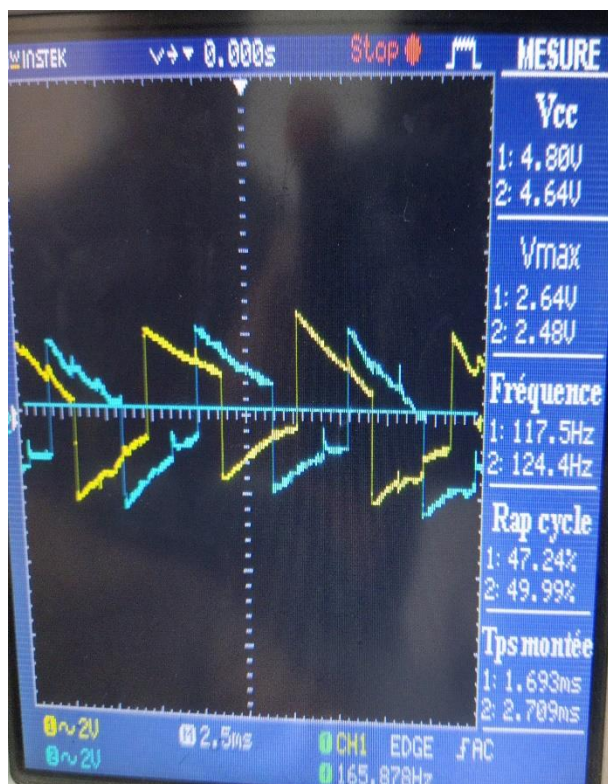












Annexe 2 :

Pour un onduleur plus puissant nous proposons la réalisation de l'onduleur de la figure ci-dessous :

Schéma global:

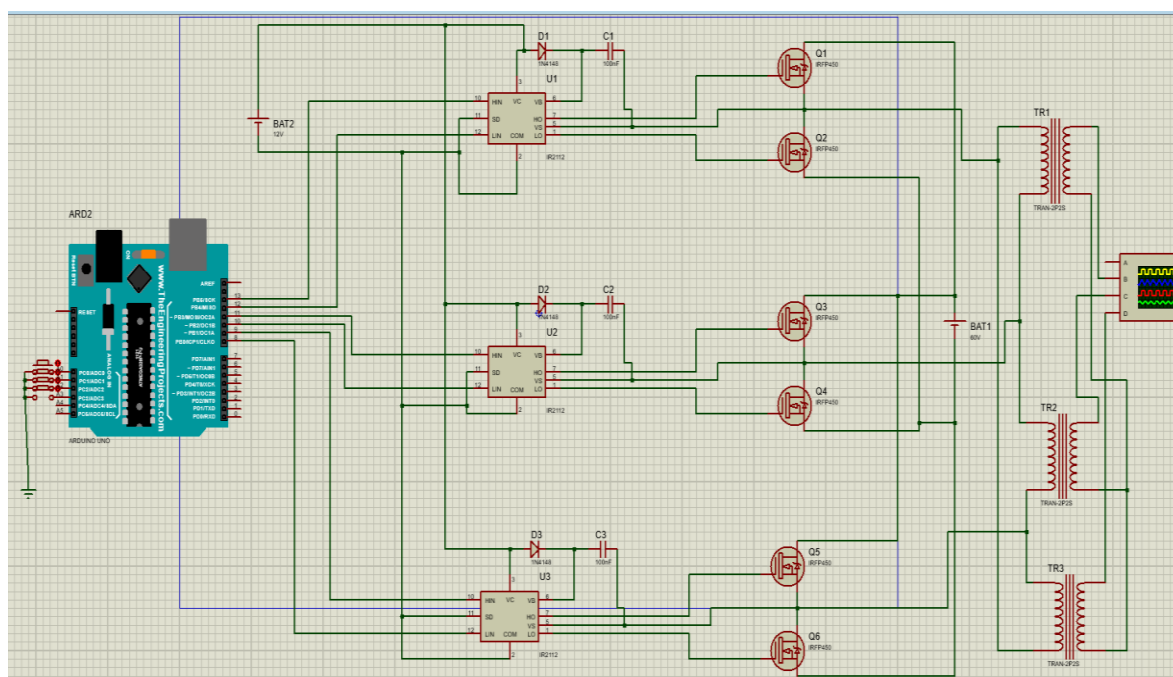
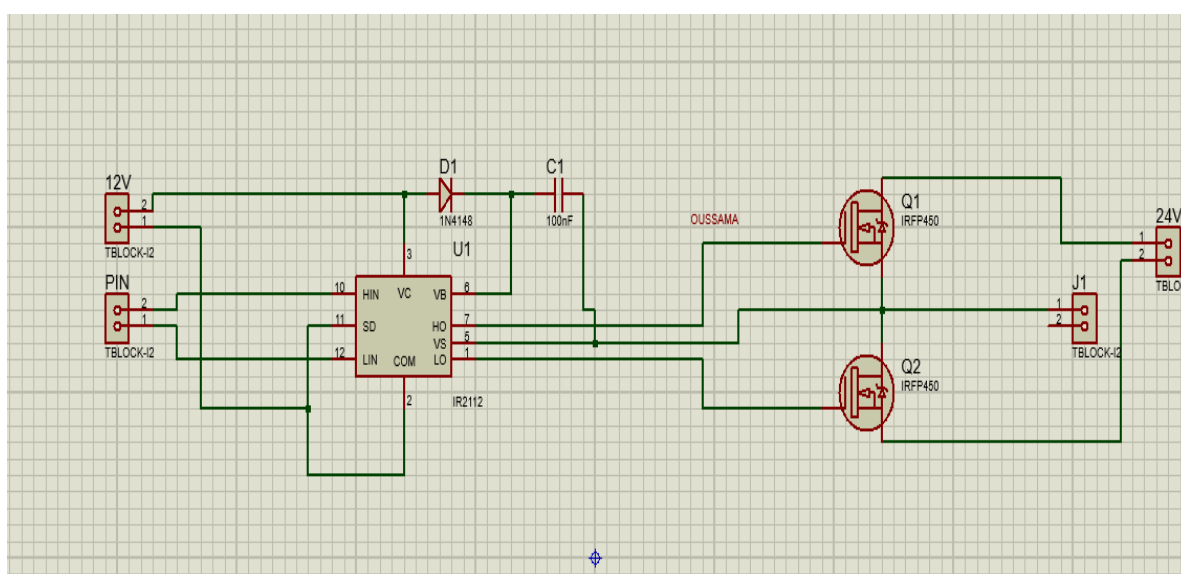


Schéma d'une phase:



Programme de la commande à pleine onde

```
unsigned long time;
//int time;
int Ft=100;
int T=1000000/Ft;
int det=0*0.01*T;
int rtime;
    int phaseA = 13;
    int phaseA1 = 12;
    int phaseB = 11;
    int phaseB1 = 10;
    int phaseC = 9;
    int phaseC1 = 8;
void setup(){
//Serial.begin(9600);
pinMode(phaseA, OUTPUT);
pinMode(phaseA1, OUTPUT);
pinMode(phaseB, OUTPUT);
pinMode(phaseB1, OUTPUT);
pinMode(phaseC, OUTPUT);
pinMode(phaseC1, OUTPUT);}
void loop(){
//Serial.print("Time: ");
time = micros();
rtime = time % T;
if ( (rtime < (0.166)*T) ) { // timer / wait fou a full second
digitalWrite(phaseA1, LOW);delayMicroseconds(det); digitalWrite(phaseA, HIGH);
digitalWrite(phaseB, LOW);delayMicroseconds(det);digitalWrite(phaseB1, HIGH);
```

```
digitalWrite(phaseC1, LOW); delayMicroseconds(det); digitalWrite(phaseC, HIGH);
} else if (rtime >= (0.166)*T && rtime < (0.33)*T) { // timer / wait fou a full second
//digitalWrite(phaseA, HIGH);digitalWrite(phaseA1, LOW);
// digitalWrite(phaseB, LOW);; delayMicroseconds(50);digitalWrite(phaseB1, HIGH);
digitalWrite(phaseC, LOW);delayMicroseconds(det);digitalWrite(phaseC1, HIGH);
}else if ((rtime >= (0.33)*T ) && (rtime < (0.5)*T)) {
// digitalWrite(phaseA, HIGH);digitalWrite(phaseA1, LOW);
digitalWrite(phaseB1, LOW); delayMicroseconds(det); digitalWrite(phaseB, HIGH);
//digitalWrite(phaseC, LOW);digitalWrite(phaseC1, HIGH);
}else if ((rtime >= (0.5)*T) && (rtime < (0.66)*T)) {
digitalWrite(phaseA, LOW); delayMicroseconds(det);digitalWrite(phaseA1, HIGH);
// digitalWrite(phaseB, HIGH);digitalWrite(phaseB1, LOW);
// digitalWrite(phaseC, LOW);digitalWrite(phaseC1, HIGH);
}else if ((rtime >= (0.66)*T) && (rtime < (0.83)*T)) {
// digitalWrite(phaseA, LOW);digitalWrite(phaseA1, HIGH);
// digitalWrite(phaseB, HIGH);digitalWrite(phaseB1, LOW);
digitalWrite(phaseC1, LOW); delayMicroseconds(det); digitalWrite(phaseC, HIGH);
}else if ((rtime >= (0.83)*T) && (rtime < (1)*T)) {
// digitalWrite(phaseA, LOW);digitalWrite(phaseA1, HIGH);
digitalWrite(phaseB, LOW); delayMicroseconds(det);digitalWrite(phaseB1, HIGH);
// digitalWrite(phaseC, HIGH);digitalWrite(phaseC1, LOW);
} // Serial.println(time); //prints time since program started
// // wait a second so as not to send massive amounts of data}
```

Programme de commande par MLI

```
#include "math.h"

unsigned long time;

float Ft=100;

float T=1000000/Ft;

float rtime;

float rtimef;

float TT;

int phaseA = 13;

int phaseA1 = 12;

int phaseB = 11;

int phaseB1 = 10;

int phaseC = 9;

int phaseC1 = 8;

// modulation

float mod=9;

float A=1;

int k;

float Eq;

float k1;

int kk;

void setup(){

//Serial.begin(9600);

pinMode(phaseA, OUTPUT);

pinMode(phaseA1, OUTPUT);
```

```

pinMode(phaseB, OUTPUT);

pinMode(phaseB1, OUTPUT);

pinMode(phaseC, OUTPUT);

pinMode(phaseC1, OUTPUT);

}

void loop(){

//Serial.print("Time: ");

time = micros();

rtime = fmod(time,T);

k=(int)(2*mod*rtime/T)+1;

Eq=(pow(-1,k))*A*(4.0*mod*rtime/T-(2*k-1));

Eq=double(Eq);

//if (abs(Eq)<=A){

if ((0.9*A*sin(2*3.14*rtime/T))>(Eq)){

digitalWrite(phaseA1, LOW); digitalWrite(phaseA, HIGH);

}else{

digitalWrite(phaseA, LOW);digitalWrite(phaseA1, HIGH);

}

if ((1.5*A*sin(2*3.14*rtime/T-2*3.14/3.))>(Eq)){

digitalWrite(phaseB1, LOW);digitalWrite(phaseB, HIGH);

}else{

digitalWrite(phaseB, LOW);digitalWrite(phaseB1, HIGH);

}

if ((1.5*A*sin(2*3.14*rtime/T-4*3.14/3.))>(Eq)){

digitalWrite(phaseC1, LOW);digitalWrite(phaseC, HIGH);

```

```
}else{
```

```
digitalWrite(phaseC, LOW);digitalWrite(phaseC1, HIGH);
```

```
}
```

