

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA

Faculté des Sciences de Technologie

Département d'Electronique



Domaine : Sciences technologiques

Filière : Electronique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master

Option : Instrumentation

Thème :

**Régulation PI Numérique du Hacheur
Dévolteur à base du Microcontrôleur
PIC16F877A**

Réalisé par :

Mellak Nedjemeddine

Tayebbey Oualid

Encadré par :

Pr. MEZACHE Amar

Pr. OUDIRA Houcine

Promotion 2020/2021

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements :

En premier lieu nous tenons à manifester nos louanges à Dieu le tout puissant par aisance et excellence, de nous avoir donné la force et la patience de réaliser ce travail.

Nous tenons particulièrement à remercier chaleureusement notre encadreur Pr. Mezache Amar et notre Co-encadreur Pr. Oudira Houcine pour nous avoir accompagné toute au long de ce travail et pour son guide.

Nous adressons nos remerciements aux membres de jury Dr. Brik Youcef et Dr. Benahcene Madani de nous avoir fait l'honneur de présider le jury et d'évaluer ce travail.

Nous tenons à remercier également Mr le Chef de département de l'Electronique et tous les enseignants qui ont contribué à notre cycle de formation et aussi tout le personnel du Hall de Technologie pour leur serviabilité.

Nous tenons à formuler notre gratitude et nos profondes reconnaissances à l'égard de nos parents pour leurs soutiens durant nos études. A tous les amis (es) qui n'ont pas hésité à nos donner leurs aides.

Enfin on ne peut oublier de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace :

Je remercie dieu de m'avoir donné le courage et la volonté

Tout au long de mon cursus.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents ;

Mes grands-mères et Mes grands-pères ;

Mes frères ;

Mes sœurs ;

Mes cousins ; Mes cousines ; Mes tantes ; Mes oncles ;

Toute la famille **MELLAK** ;

Mes amis (es) ;

Tous les gens qui m'ont soutenu durant mes études.

Nedjmeddine

Dédicace :

Je remercie dieu de m'avoir donné le courage et la volonté

Tout au long de mon cursus.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents ;

Mes grands-mères et Mes grands-pères ;

Mes frères ;

Mes sœurs ;

Mes cousins ; Mes cousines ; Mes tantes ; Mes oncles ;

Toute la famille **Tayebbey** ;

Mes amis (es) ;

Tous les gens qui m'ont soutenu durant mes études.

Qualid

Table des matières :

Remerciements

Décidas

Table des matières.....	<i>I</i>
Liste des figures.....	II
Liste des tableaux.....	III
Introduction Générale.....	12
CHAPITRE1 :	15
1. 1 Introduction	16
1. 2 Classification des hacheurs.....	16
1. 2. 1 Hacheur dévolteur	16
(i) Fonctionnement	17
(ii) Formes d'ondes	17
1. 2. 2 Hacheur survolteur	18
(i) Fonctionnement	18
(ii) Formes d'ondes	19
1. 2. 3 Convertisseur série-parallèle.....	19
1. 2. 4 Hacheur en pont	20
1. 3 Dimensionnement du processus de filtrage du convertisseur série.....	21
1. 3. 1 Calcul de la self	21
1. 3. 2 Calcul de la capacité.....	23
1. 4 Modèle mathématique du convertisseur série.....	24
1.5Conclusion.....	29
CHAPITRE 2 :	30
2. 1 Introduction	31
2. 2 Définitions de la commande des systèmes	31
2. 2. 1 Asservissement.....	31
2. 2. 2 Régulation	32

(i) Objectifs de la régulation	33
(ii) Principe général de la régulation	33
(iii) Régulation en boucle ouverte	33
Les avantages	34
Les inconvénients.....	34
(iv) Régulation en boucle fermée :	34
Côté positif	35
Côté négatif	35
2. 3 Synthèse des régulateurs PI.....	35
2. 3. 1 Régulation PI en tension.....	36
2. 3. 2 Régulation PI en courant.....	38
2. 4 Microcontrôleurs	39
2. 4. 1 Intérêt des microcontrôleurs	40
2. 4. 2 Les caractéristiques du pic16F877A	40
2. 4. 3 Architecture externe.....	42
2. 4. 4 Architecture interne	43
(i) Timers du pic 16F877A :	44
Timer 0 :	44
Timer 1 :	45
Timer 2 :	45
(ii) Les interruptions	46
(iii) Les ports d'entrée/sorties.....	47
(iv) Convertisseur analogique numérique	48
(v) Module power control PWM	48
2. 5 Conclusion.....	50
CHAPITRE 3:.....	51
3. 1 Introduction	52
3. 2 Simulations Matlab	52
3. 3 Simulations Proteus.....	58
3. 5 Conclusion.....	65

CHAPITRE 4 :	66
4. 1 Introduction	67
4. 2 Conception logicielle	67
4. 2. 1 Configuration du module LCD	67
4. 2. 2 Configuration du module ADC :	68
4. 2. 3 Configuration du module Timer2 (signal MLI)	69
2. 4. 4 Configuration du module Timer0 (temps d'échantillonnage)	69
2. 4. 5 Calcul de la tension de référence	70
4. 2. 6 Mesure de la tension et du courant de charge	70
4. 3 Conception matérielle	70
4. 3. 1 Listes des composants	71
4. 3. 2 Typo de la carte	71
4. 3. 3 Description des parties de la carte	71
<i>(i) Alimentations</i>	71
<i>(ii) Isolation optique</i>	76
<i>(iii) Commande radio FM</i>	77
<i>(iv) La charge</i>	77
<i>(v) Filtre</i>	79
4. 4 Résultats expérimentaux	79
(i) Cas d'une charge $R = 50\Omega$	80
(ii) Cas d'une charge $R = 75\Omega$	81
(iii) Cas d'une charge $R = 150\Omega$	81
4. 5 Application à la variation de vitesse du moteur DC	87
4. 6 Conclusion	88
Conclusion Générale	89
Les références	
Annexes	
Le résumé	

LISTE DES FIGURES :

Figure	Nome de figure	Page
Figure. 1. 1:	Hacheur dévolteur	17
Figure. 1. 2 :	Formes d'ondes hacheur devolteur	18
Figure. 1. 2 :	Hacheur survolteur	19
Figure. 1. 4 :	Formes d'ondes hacheur survolteur	20
Figure. 1. 5 :	Un convertisseur série-parallèle	21
Figure. 1. 6 :	Hacheur en pont	22
Figure. 1. 7 :	Modes de fonctionnement à quatre quadrants	23
Figure. 1. 8 :	Formes d'ondes des grandeurs de sortie du hacheur en pont	24
Figure. 1. 9 :	Allure du courant dans la bobine	25
Figure. 1. 10 :	Allure du courant dans le condensateur	26
Figure. 1. 11 :	Phase de charge	27
Figure. 1. 12 :	Phase de décharge	28
Figure. 1. 12	Réponse de contrôle en courant et de tension	28
Figure1.13	Schéma de contrôle en courant et de tension	29
Figure. 2. 2 :	Réponse d'un procédé asservi à un échelon de consigne	32
Figure. 2. 3 :	Réponse d'un procédé régulé à un échelon de perturbation	34
Figure. 2. 4 :	Système en boucle ouverte	34
Figure. 2. 5 :	Système en boucle fermée	37
Figure. 2. 6 :	Mode de contrôle en tension	38
Figure. 2. 8 :	Brochage du PIC 16F877A [19].	42
Figure 2. 9 :	Architecture interne du pic16F877A [19].	43
Figure. 2. 10 :	Architecture interne du du timer0 du pic 16F877A [19].	44
Figure. 2. 11 :	Architecture interne du Timer1 du pic 16F877A [19].	45
Figure. 2. 12 :	Architecture interne du Timer2 du pic 16F877A [19].	46

Figure. 2. 13 :	Les différents PORT de PIC16F877A [19].	48
Figure.2.14 :	Schéma fonctionnel analogique numérique	48
Figure. 2. 15 :	Sortie PWM	49
Figure. 3. 1 :	Environnement Matlab et ses fonctionnalités.	53
Figure. 3. 2 :	Schéma blocks de la correction PI cascadée du hacheur dévolteur	54
Figure. 3. 3 :	Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 50\Omega$, $V_r = 10V$ et 30V	55
Figure. 3. 4 :	Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 50\Omega$, $V_r = 40V$ et 20V	55
Figure. 3. 5 :	Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 75\Omega$, $V_r = 15V$ et 35V	56
Figure. 3. 6 :	Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 75\Omega$, $V_r = 35V$ et 5V	56
Figure. 3. 7 :	Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 150\Omega$, $V_r = 5V$ et 35V	57
Figure. 3. 8 :	Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 150\Omega$, $V_r = 20V$ et 5V	57
Figure. 3. 9 :	Circuit électrique pour la simulation Proteus	59
Figure. 3.:	Mesures de la tension et du courant de la charge	61
Figure. 3. 11 :	Régulation PI pour $R = 50\Omega$, $V_r = 10\%$ (a), 30% (b) et 70% (c)	63
Figure. 3. 12 :	Régulation PI pour $R = 75\Omega$, $V_r = 10\%$ (a), 30% (b) et 70% (c)	63
Figure. 3. 13 :	Régulation PI pour $R = 150\Omega$, $V_r = 10\%$ (a), 30% (b) et 90% (c)	64
Figure. 4. 1 :	Schéma fonctionnel de la commande du hacheur back	67
Figure. 4. 2 :	Les temps utilisés dans la commande PI	69
Figure. 4. 3 :	Circuit électrique conçu à partir de la liste des composants.	72
Figure 4. 4 :	Circuit routage (typo de la carte).	73
Figure. 4. 5 :	Face de pistes en cuivre en bas de la carte (Bottom copper)	73
Figure 4. 6 :	Carte finale réalisée de la commande PI du hacheur dévolteur.	74
Figure. 4. 7 :	Transformateurs d'alimentation.	74

Figure. 4. 8 :	Montage de l'alimentation du pic16F877A (+5V) et l'opto-coupleur (+12V).	74
Figure. 4. 9 :	Montage de l'alimentation du hacheur dévolteur +50V.	75
Figure. 4. 10 :	Brochage de l'opto-coupleur 4N37.	75
Figure. 4. 11 :	Le circuit électrique (a), le circuit routage (b), le circuit émetteur FM réalisé (c) et le récepteur FM monté sur notre carte de commande PI.	77
Figure. 4. 12 :	Résistance céramique et le moteur DC 35V.	78
Figure. 4. 13 :	Les deux bobines montées en série de 102mH du filtre LC	78
Figure. 4. 14 :	Signal d'entrée du hacheur back avant et après le redressement.	79
Figure. 4. 15 :	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 50\Omega$ et $V_r = 2.9V$.	81
Figure. 4. 16 :	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 50\Omega$ et $V_r = 12.3V$.	81
Figure. 4. 17 :	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 50\Omega$ et $V_r = 18.7V$.	82
Figure. 4. 18 :	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 50\Omega$ et $V_r = 34.5V$.	82
Figure. 4. 19 :	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 75\Omega$ et $V_r = 6.8V$.	83
Figure. 4. 20 :	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 75\Omega$ et $V_r = 18.7V$.	83
Figure 4. 21:	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 75\Omega$ et $V_r = 29.6V$.	84
Figure 4. 22:	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 75\Omega$ et $V_r = 34.5V$.	84
Figure 4. 23:	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 150\Omega$ et $V_r = 6.8V$.	85

Figure 4. 24:	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 150\Omega$ et $V_r = 12.3V$.	85
Figure 4. 25:	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 150\Omega$ et $V_r = 18.7V$.	86
Figure 4. 26:	Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 150\Omega$ et $V_r = 29.6V$.	86
Figure 4. 27:	Variateur de vitesse du moteur DC	87

LISTE DE TABLEAUX :

Table. 1. 1 :	Valeurs calculées de L et C du processus de filtrage	23
Table. 3. 1 :	Paramètres des correcteur PI, $T_e = 0.00001$	52
Table. 3. 2 :	Paramètres des correcteurs PI, $T_e = 0.0004$	57
Table. 4. 1	Liste des composants de la carte de commande en boucle fermée.	71
Table. 4. 2 :	Paramètres des correcteurs PI	79

Liste de l'abréviation :

Abréviations	Notations
AC	Courant alternatif
DC	Courant continue
D	Diode
CAN	Convertisseur Analogique Numérique
CNA	Convertisseur Numérique Analogique
R	Résistance
L	Inductance
C	Capacité
MLI	modulation de largeur d'impulsions
PI	Proportionnel Intègre
IGBT	transistor bipolaire à grille isolée
LCD	écran à cristaux liquides
CCS	Code Composer Studio

Introduction Générale :

1. Introduction

L'électronique de puissance est la partie du génie électrique qui s'intéresse sur l'étude des techniques consistantes pour la conversion de l'énergie électrique. A partir d'une structure (circuit de puissance) donnée, elle manipule le contrôle des instants de la commutation des semi-conducteurs de puissance (Transistors, Thyristors et Triacs). Grâce aux progrès de ces composants et de leur mise en œuvre, l'électronique de puissance a pris une place très importante dans tous les domaines de l'électricité industrielle [1]. Les quatre fonctions de l'électronique de puissance sont les suivantes [2] :

- Convertisseur AC/DC (redresseurs)
- Convertisseur DC/DC (hacheurs)
- Convertisseur AC/AC (gradateurs ou cyclo-convertisseur)
- Convertisseur DC/AC (onduleurs)

Actuellement, l'électronique de puissance joue un rôle capital dans les secteurs industriels et même dans la vie quotidienne. Plusieurs topologies des convertisseurs de puissance sont utilisées dans des différents domaines. On cite par exemple, les onduleurs dans les systèmes de production d'énergie renouvelable connecté au réseau, les gradateurs dans les alimentations des machines électriques, les redresseurs dans les alimentations fixes et variables des moteurs électriques et les hacheurs dans les systèmes de conversion photovoltaïque. Cependant, la bonne exploitation de convertisseurs nécessite en plus de la phase de dimensionnement et la phase de modélisation une synthèse d'une loi de commande qui permet de contrôler ces convertisseurs et prend en considération les différentes perturbations telle que la variation de la charge, le changement des valeurs des composants électronique (condensateur, inductance...).

2. Travaux du mémoire

L'objectif de ce travail est d'étudier, et de réaliser un convertisseur DC- DC de type Buck en boucle fermée à base de microcontrôleur pic16F877A. Ce convertisseur permet de transformer une tension continue fixe à une tension réglable. Le commande implantée est capable de générer une modulation de largeur d'impulsions (MLI) qui est exploitée pour le

hacheur destiné à une alimentation variable (photovoltaïque, éolienne, etc). L'étude consiste essentiellement à déterminer la loi de commande PI en fonction des grandeurs de la consigne, la tension de sortie et les contraintes du convertisseur réel.

L'étude théorique est suivie par une simulation Matlab et Proteus et par la réalisation d'un hacheur série. Des expériences seront présentées pour évaluer la correspondance entre le modèle théorique et les résultats expérimentaux. On va commander en boucle fermée le hacheur série par les régulateurs PI afin de faire la correction automatique et obtenir la valeur désirée.

Pour répondre aux besoins des sources de tension continues variables, le travail de ce mémoire s'oriente vers la réalisation de la commande numérique PI cascadée du hacheur survolteur à l'aide du microcontrôleur pic16F877A. A cet effet, nous avons tracé les démarches suivantes :

- Etude théorique du hacheur survolteur.
- Dimensionnement de processus de filtrage LC.
- Modélisation mathématique du convertisseur.
- Synthèse des régulateurs PI en tension et en courant
- Simulations Matlab et Proteus de la commande PI.
- Validation pratique de la technique de commande PI en courant.

3. Structure du mémoire

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres comme suit:

Dans le **Chapitre 1**, nous allons exposer en premier temps le principe de fonctionnement de la structure de base du convertisseur DC/DC à un quadrant, avec l'étude des mécanismes de commutation. Puis, nous généralisons aux convertisseurs DC/DC à deux quadrants et à quatre quadrants, ou encore convertisseur réversible en courant et en tension. Le dimensionnement du filtre de sortie LC de la structure hacheur série est présentée. Le modèle mathématique de ce type de hacheur avec l'architecture de commande PI est détaillées à la fin de ce Chapitre.

Dans le **Chapitre 2**, nous allons présenter au début les principaux aspects de la commande automatique considérés pour les systèmes statiques et dynamiques. Ensuite, nous nous intéresserons sur le rôle des actions du correcteur linéaire PI, nous présenterons également les méthodes de calcul des paramètres de la commande PI cascadée en se basant sur les deux systèmes du hacheur dévolteur donnés dans le Chapitre 1. A partir des définitions générales des microcontrôleurs, nous consacrerons à la fin de ce Chapitre sur l'étude du pic16F877A de la famille de Microchip.

Dans le **Chapitre 3**, nous allons lancer nos simulations Matlab et Proteus en fonction de certaines valeurs de la résistance de charge et de la consigne de sa tension. A cet effet, les blocks nécessaires de Simulink/Matlab sont branchés et les valeurs des paramètres du filtre LC et les correcteurs PI sont adaptées. Lors de la simulation Proteus, le courant de charge est capté à partir de la tension aux bornes de la résistance shunt et conditionné par un amplificateur opérationnel.

Pour évaluer pratiquement les performances de la commande PI du hacheur back, nous allons considérer dans le **Chapitre 4** les détails de la réalisation de trois parties; la partie alimentation, la partie commande et la partie puissance. L'algorithme de la commande PI est implémenté numériquement utilisant le pic16F877A. L'acquisition des données de sortie, la mise en marche de l'application et les résultats des essais pratiques sont effectués. Enfin, des commentaires sur les résultats expérimentaux trouvés sont également exprimés.

En fin, une conclusion générale est présentée à propos des principaux résultats réalisés dans ce manuscrit. Des Annexes sont délivrées donnant les codes Matlab et CCS développés dans ce travail.

CHAPITRE 1 :

Convertisseurs DC/DC

Résumé :

Dans ce Chapitre, nous allons exposer en premier temps le principe de fonctionnement de la structure de base du convertisseur DC/DC à un quadrant, avec l'étude des mécanismes de commutation. Puis, nous généralisons aux convertisseurs DC/DC à deux quadrants et à quatre quadrants, ou encore convertisseur réversible en courant et en tension. Le dimensionnement du filtre de sortie LC de la structure hacheur série est présentée. Le modèle mathématique de ce type de hacheur avec l'architecture de commande PI est détaillées à la fin de ce Chapitre.

Sommaire du Chapitre :

1. 1 Introduction.
1. 2 Classification des hacheurs.
1. 3 Dimensionnement du processus de filtrage du convertisseur série.
1. 4 Modèle mathématique du convertisseur série.
1. 5 Conclusion

1. 1 Introduction

Les principales sources d'énergie mises en œuvre industriellement sont l'énergie électrique et l'énergie mécanique. L'énergie électrique peut avoir plusieurs formes adaptées à la nature des récepteurs utilisés. La conversion des sources électriques se compose de quatre fonctions principales :

- Convertisseurs AC/DC c'est le cas des redresseurs.
- Convertisseurs DC/DC c'est le cas des hacheurs.
- Convertisseurs AC/AC c'est les cas des gradateurs et des cyclo-convertisseurs.
- Convertisseurs DC/AC c'est le cas des onduleurs.

Les convertisseurs continu-continu (DC/DC) sont des dispositifs de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés, ce qui permet de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée, etc. On distingue deux types de convertisseurs DC/DC. Ceux qui sont non isolés, que l'on appellera hacheurs, et ceux qui comportent un transformateur assurant l'isolation galvanique, que l'on appelle alimentations à découpage (cas des alimentations de PC). Par la suite, nous n'étudierons que les premiers [3].

Dans ce Chapitre, nous aborderons en premier temps le principe de fonctionnement de la structure de base du convertisseur DC/DC (un quadrant), avec la définition de la cellule de commutation, ainsi que l'étude des mécanismes de commutation. Puis, nous généralisons au convertisseur DC/DC (deux quadrants), avec la définition du convertisseur réversible en courant. Le convertisseur DC/DC (quatre quadrants), ou encore convertisseur réversible en courant et en tension est aussi expliqué. Le dimensionnement du filtre de sortie LC de la structure hacheur série est présentée à la fin de ce Chapitre.

1. 2 Classification des hacheurs

Comme indiqué ci-dessus, les convertisseurs DC/DC peuvent être classés en quatre catégories ; le hacheur série (dévolteur), le hacheur parallèle (survolteur), le hacheur série-parallèle et le hacheur en pont.

1. 2. 1 Hacheur dévolteur

Comme mentionné dans la Section 1. 1, un convertisseur DC/DC a pour vocation d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant

continu. Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage et à blocage commandés (transistor bipolaire, Transistor MOS ou IGB) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (voir [Figure. 1. 1](#)) et nous avons intéressé de ce type de hacheur.

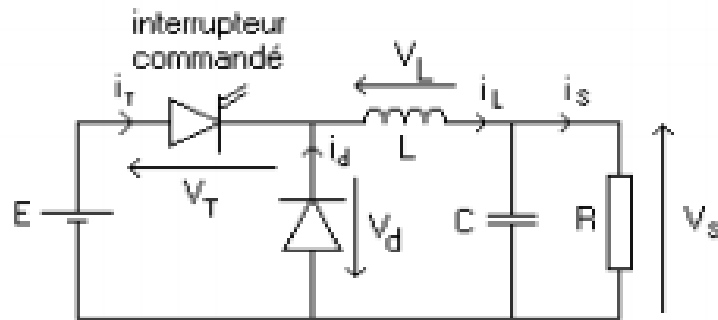


Figure. 1. 1: Hacheur dévolteur

La charge est constituée par la résistance R . Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultante du découpage sur la tension et le courant de sortie. Si ces éléments sont correctement calculés, on peut supposer que le courant de sortie i_s et la tension de sortie V_s sont continués (l'ondulation résiduelle est négligeable). L'ensemble filtre plus charge peut être composé différemment, mais nous raisonnerons sur cet exemple par la suite [\[3\]](#).

(i) *Fonctionnement*

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T ($T = 1/f$), comporte deux étapes. Lors de la première, on rend le transistor passant et la diode polarisée en inverse est bloquée. Cette phase dure de 0 à αT , avec α compris entre 0 et 1 . α est appelé rapport cyclique. Lors de la seconde, on bloque le transistor et la diode devient passante. Cette phase dure de αT à T [\[3\]](#).

(ii) *Formes d'ondes*

Nous allons être amenés à distinguer deux cas ; la conduction continue et la conduction discontinue:

- Dans le premier, le courant de sortie est suffisamment fort et le courant dans l'inductance ne s'annule jamais, même avec l'ondulation due au découpage.
- Dans le second, le courant de sortie moyen est bien entendu positif, mais, en raison de sa faible valeur moyenne, l'ondulation du courant dans l'inductance peut amener ce

dernier à s'annuler. Or, les interrupteurs étant unidirectionnels, le courant ne peut changer de signe et reste à 0.

Les formes d'ondes données maintenant supposent que les composants sont tous parfaits et que la tension et le courant de sortie, peuvent être assimilés à leur valeur moyenne (ondulations de sortie négligées) (voir **Figure. 1. 2**) [3].

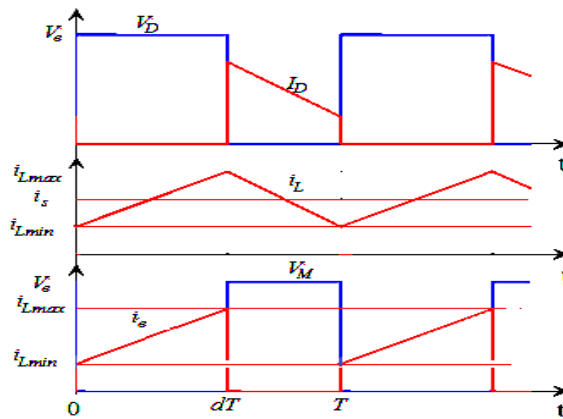


Figure. 1. 2 : Formes d'ondes hacheur devolteur

1. 2. 2 Hacheur survolteur

Un convertisseur survolteur (Boost) ou hacheur parallèle est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur, il est présenté dans la **Figure. 1. 2** [4].

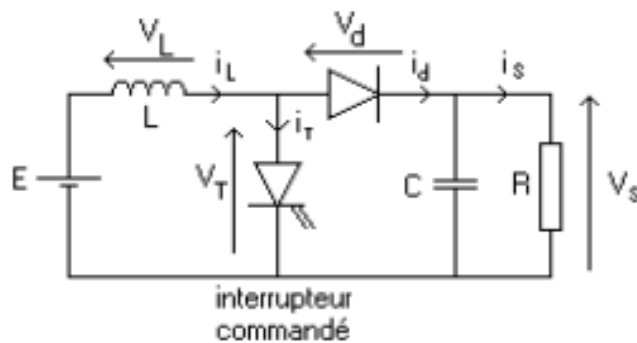


Figure. 1. 2 : Hacheur survolteur

(i) Fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur survolteur peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S (transistor de puissance) :

- Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur S (voir [Figure. 1. 3](#)) est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.
- Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa force électromotrice s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant passant l'inductance traverse ensuite la diode D , le condensateur C et la charge R . Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité [4].

(ii) Formes d'ondes

Les formes d'ondes des grandeurs de sortie sont représentées dans la [Figure. 1. 4](#). Avec des ondulations petites des deux signaux, en supposant la tension et le courant de sortie continus.

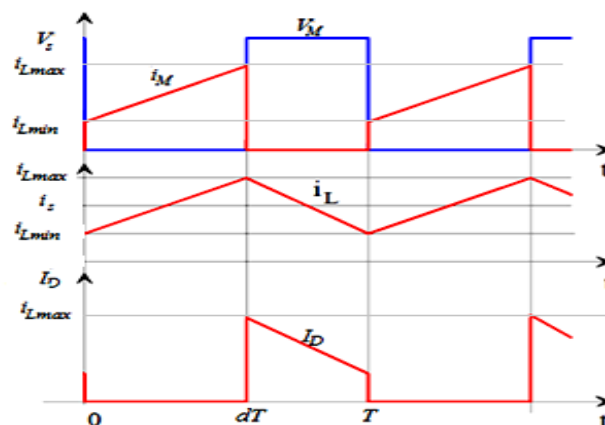


Figure. 1. 4 : Formes d'ondes hacheur survolteur

1. 2. 3 Convertisseur série-parallèle

Le hacheur abaisseur-élevateur est aussi appelé dévolteur-survolteur ou de type Buck-Boost ([Figure. 1. 5](#)). Le hacheur abaisseur-élevateur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents [5].

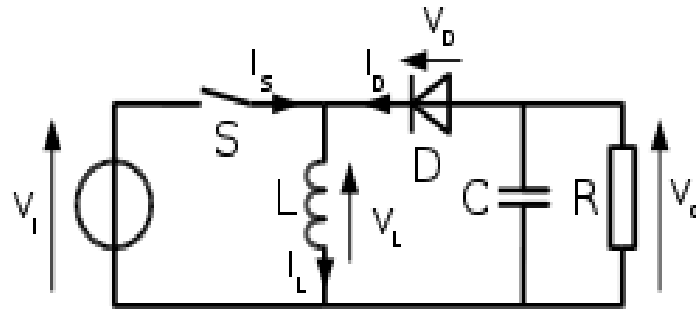


Figure. 1. 5 : Un convertisseur série-parallèle

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à αT , l'interrupteur commandé est fermé (passant). La diode est ouverte et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée. Lors de la seconde partie du cycle, de αT à T , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. L'inductance restitue son énergie à la charge [6].

1. 2. 4 Hacheur en pont

Dans l'industrie, le régulateur à quatre quadrants (en pont) comme montré dans la **Figure. 1. 6** est utilisé comme organe de réglage de vitesse pour les moteurs à courant continu. L'inversion de courant et de tension de charge est possible. Comme leur nom l'indique, le régulateur en pont fonctionne dans quatre quadrants, c'est-à-dire que le sens du courant et de la tension peut être modifié (voir **Figure. 1. 7**) [7-8]. Un moteur à courant continu connecté peut alors tourner dans les deux sens avec des vitesses variables où le freinage du moteur peut s'assurer par ce hacheur. Les formes d'ondes des grandeurs de sortie possèdent des changements de signes durant la période de la commande (voir **Figure. 1. 8**).

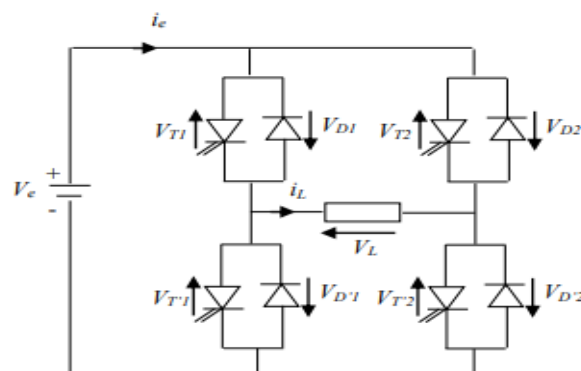


Figure. 1. 6 : Hacheur en pont

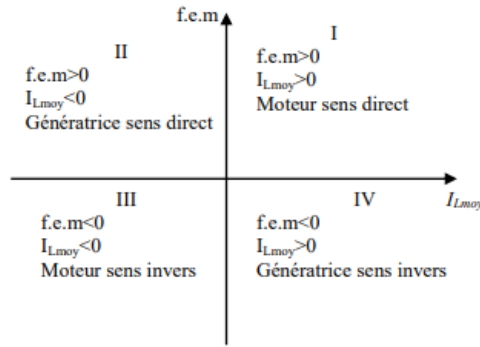


Figure. 1. 7 : Modes de fonctionnement à quatre quadrants

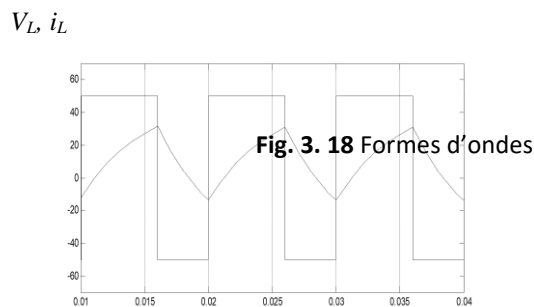
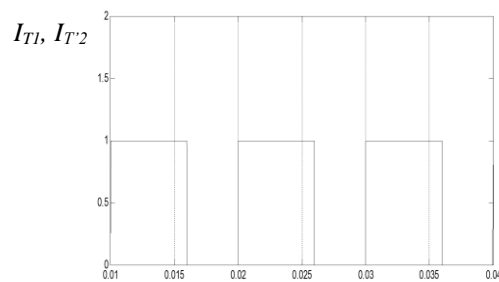


Fig. 3. 18 Formes d'ondes

Figure. 1. 8 : Formes d'ondes des grandeurs de sortie du hacheur en pont

Parmi les applications industrielles des hacheurs, on trouve les ralentisseurs électromagnétiques, entraînements à vitesses variables des machines DC et la stabilisation par hachage etc. [3].

1. 3 Dimensionnement du processus de filtrage du convertisseur série

Pour obtenir un courant constant, nous devons calculer les valeurs L et C de la bobine et le condensateur, qui sont responsables du processus de filtrage de la tension de sortie. En se basant sur la **Figure. 1. 1**, les dimensionnements des deux composants passifs sont les suivants :

1. 3. 1 Calcul de la self

Pour calculer la valeur L de la bobine, nous applique dans les deux mailles de la **Figure. 1. 1** la loi de Kirchhoff comme suit :

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + V_s = E & 0 < t < \alpha T \\ L \frac{di}{dt} + V_s = 0 & \alpha T < t < T \end{cases} \quad (1.1)$$

Où $f = 1/T$ est la fréquence de découpage (i.e., fréquence du signal de commande MLI)

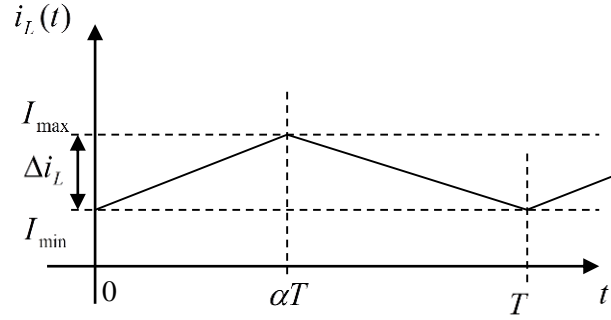


Figure. 1. 9 : Allure du courant dans la bobine

En résolvant (1.1) et on applique les conditions aux limites au niveau des instant αT et T , on trouve

$$\begin{cases} i_L(t) = \frac{E - V_s}{L} t + I_{\min} \\ i_L(t) = -\frac{V_s}{L} (t - \alpha T) + I_{\max} \end{cases} \quad (1.2)$$

Où $I_{\min} = i_L(0) = i_L(T)$ et $I_{\max} = i_L(\alpha T)$. La solution de (1.2) mène

$$\begin{cases} I_{\max} = \frac{E - V_s}{L} \alpha T + I_{\min} \\ I_{\min} = -\frac{V_s}{L} T(1 - \alpha) + I_{\max} \end{cases} \quad (1.3)$$

L'ondulation de courant de la bobine est définie par, $\Delta i_L = I_{\max} - I_{\min}$. En remplaçant $V_s = \alpha E$ dans (1.3) et on obtient :

$$\begin{aligned} \Delta i_L &= \frac{1}{2} \left[\frac{E - V_s}{L} \alpha T + \frac{V_s}{L} T(1 - \alpha) \right] \\ &= \frac{ET}{L} (\alpha - \alpha^2) \end{aligned} \quad (1.4)$$

On met à zéro de la dérivé de (1.4) par rapport à α pour obtenir l'ondulation maximale Δi_L .

D'où

$$\frac{d\Delta i_L}{d\alpha} = \frac{ET}{L}(1-2\alpha) = 0 \Rightarrow \alpha = 0.5 \quad (1.5)$$

Avec cette valeur de α , (1.4) devient

$$\Delta i_{L\max} = \frac{E}{4Lf} \quad (1.6)$$

La valeur minimale de L devient

$$L \geq \frac{E}{4f\Delta i_{L\max}} = 125mH \quad (1.7)$$

1. 3. 2 Calcul de la capacité

Maintenant, on s'oriente vers le calcul de la capacité du condensateur. D'après la loi de Kirchhoff,

$$i_c = i_L - i_s \quad (1.8)$$

i_s est supposé constant. Le courant moyen du condensateur est nul, $i_{Cmoy} = 0$ ce qui donne $i_{Lmoy} = i_{smoy}$. La quantité de charges stockées dans le condensateur durant la phase de charge est donnée par

$$\begin{cases} Q = CV_C \\ V_C = V_s \end{cases} \quad (1.9)$$

La variation de la charge est liée par

$$\begin{cases} \Delta Q = C\Delta V_C \\ Q = \int i_c dt \end{cases} \quad (1.10)$$

Où ΔQ est équivalente au calcul de la surface hachée comme montré par la **Figure. 1. 10**.

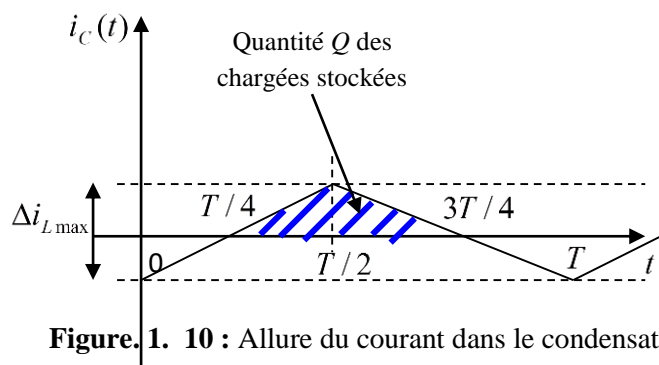


Figure. 1. 10 : Allure du courant dans le condensateur

La surface du triangle vaut

$$\Delta Q = \frac{T \Delta i_{L \max}}{8} \quad (1.11)$$

En remplaçant (1.10) dans (1.11), on obtient

$$C \geq \frac{\Delta i_{L \max}}{8 f \Delta V_C} \quad (1.12)$$

Pour une tension d'entrée, $E = 50V$ et une fréquence de découpage $f = 20kHz$ les valeurs minimales de L et C sont présentées par la **Table. 1. 1**.

Table. 1. 1 : Valeurs calculées de L et C du processus de filtrage

Ondulations de courant et de la tension	L (mH)	C (uF)
$\Delta i_{L \max} = 5mA$ $\Delta V_C = 0.1mV$	125	312

1. 4 Modèle mathématique du convertisseur série

Dans cette section, on va présenter le modèle mathématique du convertisseur dévolteur montré par la **Figure. 1. 1**. On cherche alors à calculer les fonctions de transferts analogiques (transformée de Laplace) du système convertisseur qui relie tension-courant et courant-rapport cyclique.

Dans la première phase de conduction (l'interrupteur est fermé pendant, $0 < t < \alpha T$), nous avons (voir **Figure. 1. 11**)

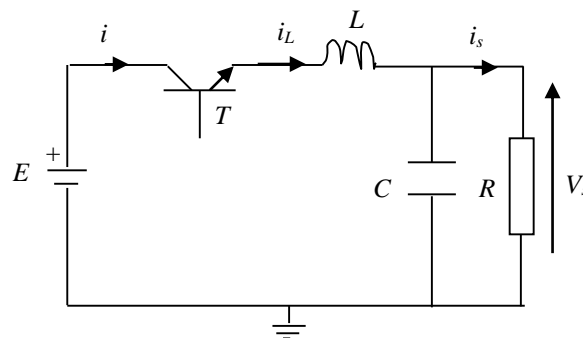


Figure. 1. 11 : Phase de charge

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = E - V_s \\ C \frac{dV_s}{dt} = i_L - \frac{V_s}{R} \end{cases} \quad (1.13)$$

La représentation d'état de (1.13) est donnée :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_L \\ V_s \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}}_{A1} \begin{pmatrix} i_L \\ V_s \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix}}_{B1} E \quad (1.14)$$

Dans la deuxième phase de conduction (l'interrupteur est ouvert pendant, $\alpha T < t < T$), nous avons (voir [Figure. 1. 12](#)).

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -V_s \\ C \frac{dV_s}{dt} = i_L - \frac{V_s}{R} \end{cases} \quad (1.15)$$

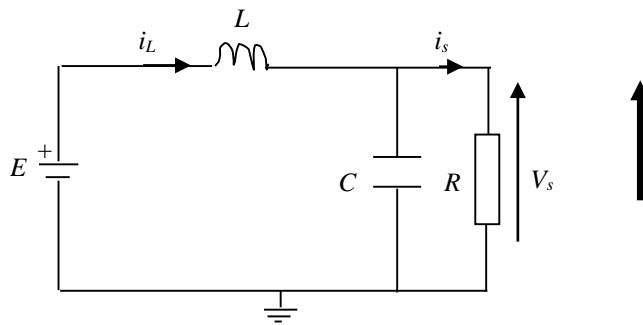


Figure. 1. 12 : Phase de décharge

La représentation d'état de (1.16) est donnée par

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_L \\ V_s \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}}_{A_2} \begin{pmatrix} i_L \\ V_s \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{B_2} E \quad (1.16)$$

Le modèle moyen du convertisseur est

$$\begin{cases} A = \alpha A_1 + (1 - \alpha) A_2 \\ B = \alpha B_1 + (1 - \alpha) B_2 \end{cases} \quad (1.17)$$

Les matrices A et B devient

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\alpha}{L} \\ \frac{\alpha}{C} & -\frac{\alpha}{RC} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1-\alpha}{L} \\ \frac{1-\alpha}{C} & -\frac{1-\alpha}{RC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \quad (1.18)$$

Et

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\alpha}{L} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0(1-\alpha) \\ 0(1-\alpha) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\alpha}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.19)$$

La forme matricielle du système devient

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_L \\ V_s \end{pmatrix}}_x = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} i_L \\ V_s \end{pmatrix}}_x + \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{pmatrix}}_B \alpha \quad (1.20)$$

Le système (1.20) est linéaire, on n'a pas besoin de linéariser. Nous avons, $\dot{x} = Ax + B\alpha$, la transformée de Laplace nous donne

$$sX(s) = AX(s) + B\alpha(s) \quad (1.21)$$

Or

$$(sI - 1)X(s) = \alpha(s) \quad (1.22)$$

A partir de (1.22), on peut écrire

$$X(s) = \underbrace{(sI - 1)^{-1}}_{G(s)} B \alpha(s) \quad (1.23)$$

La fonction de transfert $G(s)$ est donnée par

$$G(s) = \begin{pmatrix} s & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & s + \frac{1}{RC} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.24)$$

Avec

$$\begin{pmatrix} s & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & s + \frac{1}{RC} \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{s \left(s + \frac{1}{RC} \right) + \frac{1}{LC}} \begin{pmatrix} s + \frac{1}{RC} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & s \end{pmatrix} \quad (1.25)$$

D'où

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{1}{s \left(s + \frac{1}{RC} \right) + \frac{1}{LC}} \begin{pmatrix} s + \frac{1}{RC} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{s \left(s + \frac{1}{RC} \right) + \frac{1}{LC}} \begin{pmatrix} \left(s + \frac{1}{RC} \right) \frac{E}{L} \\ \frac{E}{LC} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1.26)$$

A partir de (1.26), on tire deux fonctions de transfert :

$$\begin{aligned}
G_1(s) &= \frac{I_L(s)}{\alpha(s)} = \frac{\left(s + \frac{1}{RC}\right) \frac{E}{L}}{s\left(s + \frac{1}{RC}\right) + \frac{I}{L}} \\
&= \frac{E}{R} \frac{RCs + 1}{LCs^2 + \frac{L}{R}C + 1}
\end{aligned} \tag{1.27}$$

et

$$\begin{aligned}
G_2(s) &= \frac{V_s(s)}{\alpha(s)} = \frac{\frac{E}{LC}}{s\left(s + \frac{1}{RC}\right) + \frac{I}{LC}} \\
&= E \frac{1}{LCs^2 + \frac{L}{R}C + 1}
\end{aligned} \tag{1.28}$$

Pour déterminer la fonction de transfert entre la tension de sortie et le courant dans la bobine, il suffit de diviser $G_2(s)$ sur $G_1(s)$. D'où

$$G_3(s) = \frac{V_s(s)}{I_L(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \tag{1.29}$$

Le processus de correction PI est un processus de comparaison entre la valeur de sortie et la valeur souhaitée. L'erreur entre ces deux grandeurs est pondérée par ce type de correcteur afin de déterminer la grandeur de commande qui représente la valeur du rapport cyclique. La **Figure. 1. 13** donne l'architecture de la commande cascadiée PI, il y a deux boucles imbriquées ; l'une sert à commander le courant traversant la bobine et l'autre sert à commander la tension aux bornes de la charge.

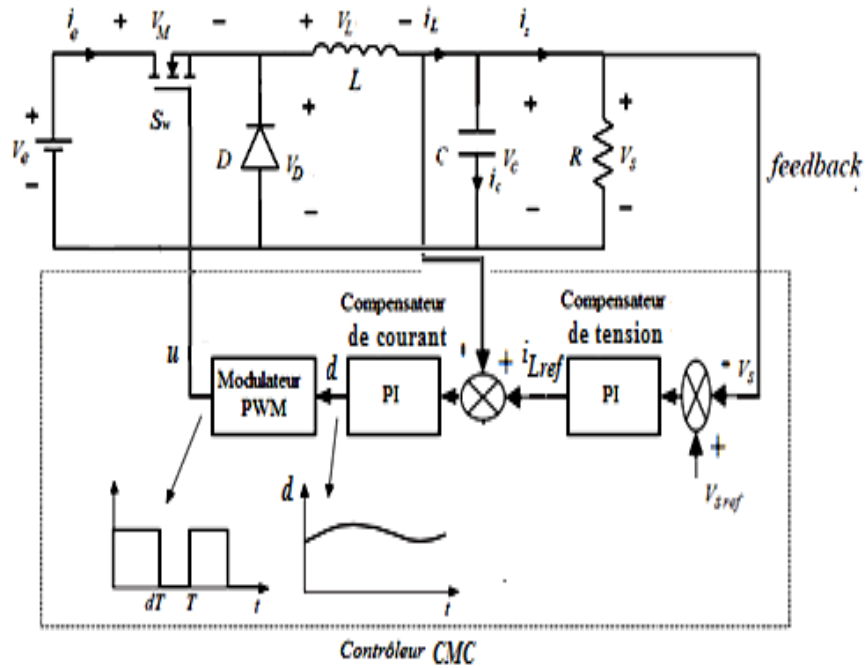


Figure1.13 Schéma de contrôle en courant et de tension

1. 5 Conclusion

Dans ce Chapitre, nous avons abordé en premier lieu quelques notions de base et le principe de fonctionnement de quelques types des hacheurs. En ce qui concerne les dimensionnements des processus de filtrage et de réglage, nous avons concentré sur le hacheur dévolteur puisque notre sujet du mémoire aborde sa réalisation pratique de la commande PI à base des microcontrôleurs. Les modèles mathématiques qui relient la tension de sortie, le courant de la bobine et le rapport cyclique sont données qui possèdent des fonctions de transferts du premier et de deuxième ordre. L'architecture de la commande PI cascadée est aussi présentée à la fin de ce Chapitre.

CHAPITRE 2 :

Régulation PI et Microcontrôleurs

Résumé :

Dans ce Chapitre, nous allons présenter au début les principaux aspects de la commande automatique considérés pour les systèmes statiques et dynamiques. Ensuite, nous nous intéresserons sur le rôle des actions du correcteur linéaire PI, nous présenterons également les méthodes de calcul des paramètres de la commande PI cascadée en se basant sur les deux systèmes du hacheur dévolteur donnés dans le Chapitre 1. A partir des définitions générales des microcontrôleurs, nous consacrerons à la fin de ce Chapitre sur l'étude du pic16F877A de la famille de Microchip.

Sommaire du Chapitre :

- 2. 1 Introduction
- 2. 2 Définitions de la commande des systèmes
- 2. 3 Synthèse des régulateurs PI
- 2. 4 Microcontrôleurs
- 2. 5 Conclusion

2. 1 Introduction

Les régulateurs automatiques étaient conçus et adaptés pour la commande des systèmes linéaires et non-linéaires où les paramètres incertains et variables ne peuvent influencer la robustesse de ces techniques. Autrement dit, les caractéristiques essentielles de ces techniques sont la capacité de robustesse ou la garantie de bonne insensibilité à la variation paramétrique du système à commander et aux bruits de mesures. A titre d'exemple, l'approche PID (Proportion, Intégration et Dérivation) a été largement employée avec succès aux systèmes de commande linéaires tels que la commande des moteurs à courant continu (servomoteurs, servovalves, etc), la commande vectorielle des machines alternatives, les accélérateurs automatiques, les turbines à gaz et à vapeur, etc.

Les microcontrôleurs se sont des processus embarqués qui consistent de plusieurs organes de traitement numérique des données telles que la mémoire RAM, la mémoire EPROM, les registres, les compteurs, les convertisseurs A/N et N/A, etc. Ils sont préférés pour des applications qui ne nécessitent pas un temps de calcul réduit où la fréquence d'horloge ne dépasse pas 80MHz. L'application de commande qu'on veut désir à réaliser spécifie réellement le choix adéquat du microcontrôleur de la firme Microchip ou autres (e.i., pic12Fxx, pic16Fxx, pic18Fxx, dspic30Fxx, etc).

Dans ce chapitre, nous étudierons en premier lieu la régulation, qui est une procédure qui ajuste automatiquement une quantité pour qu'elle garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur souhaitée en dépit de perturbations. Ensuite, nous nous intéresserons à l'étude des microcontrôleurs. En général, il existe de nombreuses familles de microcontrôleurs, mais nous nous consacrerons à l'étude du pic16F877A de la famille du Microchip.

2. 2 Définitions de la commande des systèmes

Dans cette section, nous expliquons en gros en modo quelques spécifications considérées pour la commande automatiques des systèmes.

2. 2. 1 Asservissement

L'asservissement est un système dont l'objet principal est d'atteindre le plus rapidement possible sa valeur de consigne et de la maintenir constante quelles pour quelques soient les perturbations externes (la valeur mesurée de système qui est présentée en bleu dans la **Figure. 2. 1**). Le principe général est de comparer la consigne et l'état du système de manière à le corriger efficacement. On parle également de système commandé en boucle fermée [11]. La **Figure. 2. 2** illustre la réponse d'un procédé asservi à un échelon de consigne [12].

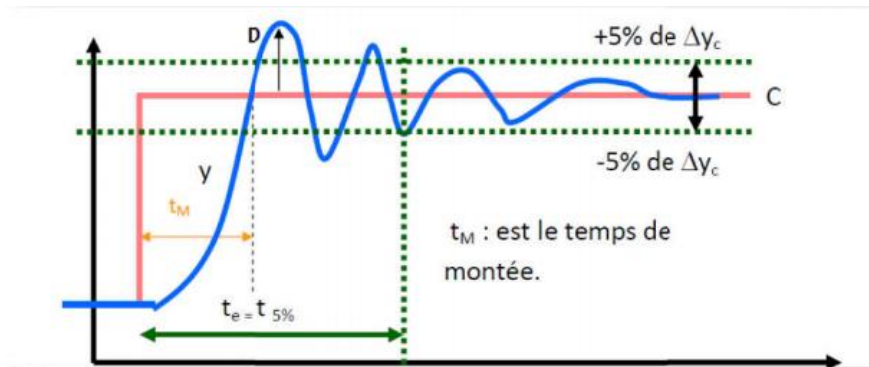


Figure. 2. 2 : Réponse d'un procédé asservi à un échelon de consigne

2. 2. 2 Régulation

La régulation est une partie de la science technique appelée automatique, c'est l'ensemble des techniques qui permettent de contrôler une grandeur physique, sans intervention humaine, pour la maintenir à une valeur donnée. Cette dernière traduisant l'objectif désiré du procédé, est constante et les grandeurs perturbatrices influencent fortement sur la grandeur à maîtriser notée [13, 14]. La réponse d'un procédé régulé à un échelon de perturbation est représentée dans la **Figure**.

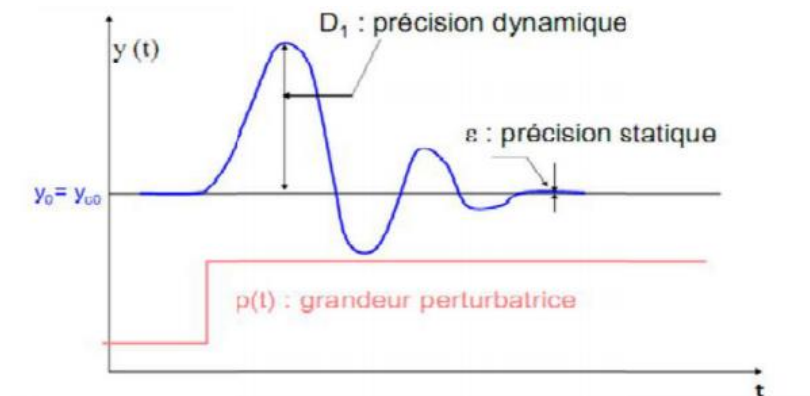


Figure. 2. 3 : Réponse d'un procédé régulé à un échelon de perturbation

(i) Objectifs de la régulation

L'objectif d'une régulation ou d'un asservissement est d'assurer le fonctionnement d'un procédé selon les critères prédéfinis par un cahier de charges. Les aspects de sécurité du personnel et des installations sont à prendre en compte comme ceux concernant l'énergie et le respect de l'environnement. Le cahier des charges définit des critères qualitatifs à imposer qui sont traduits le plus souvent par des critères qualitatifs, comme par exemple, de stabilité, de précision, de rapidité ou de lois d'évolution [14]. Voici quelques exemples d'objectifs qualitatifs : [15]

- Obtenir une combustion air -gaz correcte dans un brûleur.
- Maintenir une qualité constante d'un mélange de produits.
- Obtenir un débit de fluide constant dans une conduite en fonction des besoins.
- Faire évoluer une température d'un four selon un profil déterminé.

(ii) Principe général de la régulation

Dans la plupart des appareils et installations industrielles, tertiaires et mêmes domestiques, il est nécessaire de maintenir des grandeurs physiques à des valeurs déterminées, en dépit des variations externes ou internes influant sur ces grandeurs. Par exemple, le niveau d'un réservoir d'eau, la température d'un étuve, le débit d'une conduite de gaze, étant de nature variables, doivent donc être réglés par des actions convenables sur le processus considéré. Si les perturbations influant sur la grandeur à contrôler sont lentes ou négligeables, un simple réglage (dit en boucle ouverte) permet d'obtenir et de maintenir la valeur demandée (par exemple : action sur un robinet d'eau). Dans la majorité des cas, ce type de réglage n'est pas suffisant, parce que trop grossier ou instable. Il faut alors comparer, en permanence, la valeur mesurée de la grandeur réglée à celle que l'on souhaite obtenir et agir en conséquence sur la grandeur d'action, dite grandeur réglant [15].

(iii) Régulation en boucle ouverte

Un système en boucle ouverte est un système qui ne comporte pas de contre-réaction (feedback) entre la sortie et l'entrée, qui n'implique aucune information sur la sortie. Classiquement, il est composé d'un correcteur, action processus. Comme elle montre la **Figure.2. 4** [16].

Le système en boucle ouverte contient des avantages et des inconvénients parmi eux :

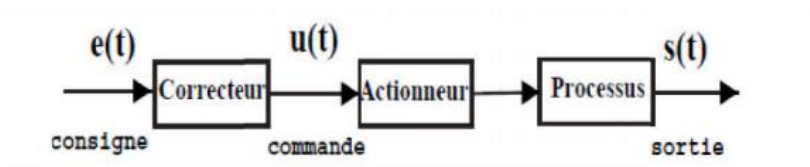


Figure. 2. 4 : Système en boucle ouverte

Les avantages : [17]

- ✓ Permet d'anticiper les phénomènes et d'obtenir des temps de réponse très courts.
- ✓ Il n'y a pas d'oscillation à craindre (car il s'agit d'un système dynamiquement stable).
- ✓ C'est la seule solution envisageable lorsqu'il n'y a pas de contrôle final possible.

Les inconvénients : [18]

- ✓ Correction impossible :
N'ayant aucune information sur la sortie, l'opérateur ne peut élaborer aucune stratégie d'ajustement pour obtenir la sortie désirée.
- ✓ Sensibilité aux perturbations :
En admettant que la sortie soit conforme consigne; une perturbation peut, à un moment donné, Affecter la sortie. L'opérateur ne pourra corriger cette situation.

(iv) Régulation en boucle fermée :

La grandeur réglant exerce une influence sur la grandeur réglée, pour la maintenir dans des limites définies malgré les perturbations. La Figure. 2. 5 ci-dessous illustre un système en boucle fermée [12].

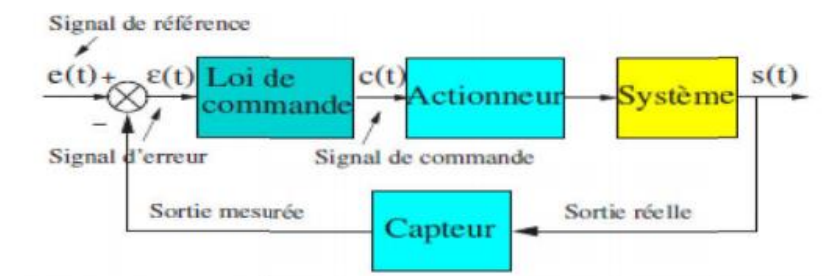


Figure. 2. 5 : Système en boucle fermée.

Comme celle en boucle ouverte, la boucle fermée contient aussi un côté positif et un côté négatif.

Côté positif : [17]

- Une bonne partie des facteurs perturbateurs sont automatiquement compensés par la contre-réaction à travers le procédé.
- Il n'est pas nécessaire de connaître avec précision les lois, le comportement des différents composants de la boucle et notamment du processus.
- La connaissance des allures statistiques et dynamiques des divers phénomènes rencontrés soit utile pour le choix des composants

Côté négatif : [17]

- Il faut citer le fait que la précision et la fidélité de la régulation dépend de la fidélité et de la précision sur les valeurs mesurées et sur la consigne
- Le comportement dynamique de la boucle dépend des caractéristiques des différents composants de la boucle, et notamment du processus.
- Pour que la régulation envoie une commande à l'organe de contrôle, il faut que les perturbations ou les éventuelles variations de la valeur de consigne se manifestent sur la sortie du processus.

2. 3 Synthèse des régulateurs PI

Le correcteur intégral est en général associé au correcteur proportionnel, il élabore alors une commande qui peut être donnée par la relation suivante :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.1)$$

Où K_p et K_i sont les gains des actions proportionnelle et intégrale respectivement, $u(t)$ est la sortie du régulateur qui représente le signal de la commande, $e(t)$ est l'erreur entre la consigne et la mesure. La fonction de transfert analogique du correcteur est alors donnée par :

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.2)$$

L'influence des actions proportionnelle (P) et intégrale (I) sur la commande est comme suit :

Action P :

- Si K_p est grand, la correction est rapide. Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît.
- Si K_p est petit, la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.

Action I :

- L'action intégrale régit, lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne.
- Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste l'action $u(t)$ augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule.

La combinaison des actions P et I permet d'associer l'avantage de l'action P (c'est-à-dire la réaction rapide a un écart de réglage) à l'avantage de l'action I qui est la compensation exacte de la grandeur piloté. Le régulateur P est utilisé lorsqu'on désire régler une grandeur dont la précision n'est pas importante, exemple : régler le niveau dans un bac de stockage. L'action intégrale est utilisée lorsqu'on désire avoir en régime permanent, une précision parfaite, en outre, elle permet de filtrer la variable à régler d'où l'utilité pour le réglage des variables bruitées telles que la pression.

2. 3. 1 Régulation PI en tension

La **Figure. 2. 6** montre la première stratégie de commande PI. La fonction de transfert du système en premier ordre est donnée par l'équation (1.29). Les paramètres du correcteur K_p et K_i peuvent être calculés par plusieurs méthodes telles que la méthode de Bode, la méthode de lieu des pôles, la méthode par identification, etc. Par la suite on s'intéresse à utiliser la méthode paramétrique (identification). D'où, l'équation caractéristique du système de la **Figure. 2. 6 (b)** est donnée par

$$\begin{aligned} 1 + C(s)G(s) &= 1 + (K_p s + K_i) \frac{R}{s(RCs + 1)} \\ &= \frac{RCs^2 + (K_p R + 1)s + K_i R}{s(RCs + 1)} = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

En égalant (2.3) avec un polynôme d'ordre 2 désiré comme

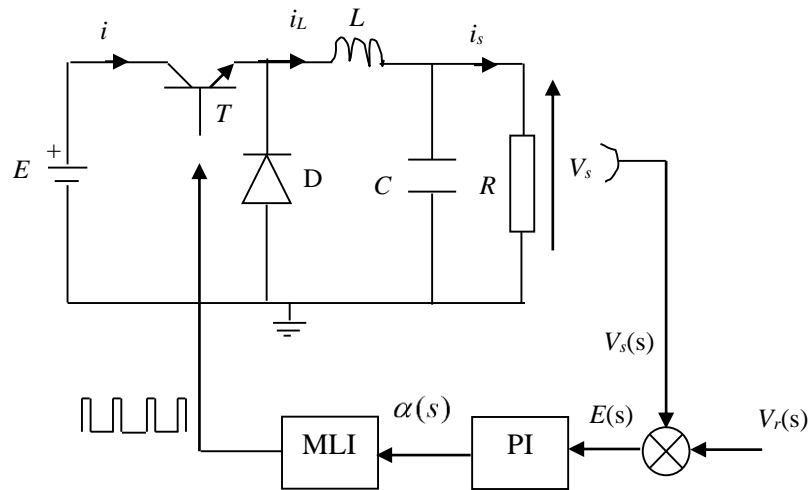
$$s^2 + \frac{(K_p R + 1)}{RC} s + \frac{K_i}{C} = s^2 - (r_1 + r_2)s + r_1 r_2 \quad (2.4)$$

Les racines conjuguées désirées sont choisies comme, $r_1 = -\rho + j\rho$ et $r_2 = -\rho - j\rho$, un seul paramètre doit être trouvé pour obtenir les spécifications désirées en boucle fermée. D'où

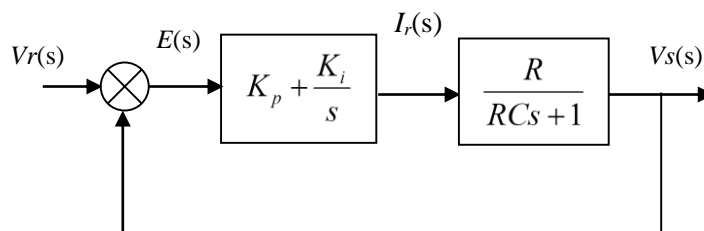
$$\begin{cases} \frac{1 + K_p R}{RC} = 2\rho \\ \frac{K_i}{C} = 2\rho^2 \end{cases}, \rho > 0 \quad (2.5)$$

Or

$$\begin{cases} K_p = \frac{2\rho RC - 1}{R} \\ K_i = 2C\rho^2 \end{cases}, \rho > 0 \quad (2.6)$$



(a)



(b)

Figure. 2. 6 : Mode de contrôle en tension

(a) Convertisseur plus régulateurs

(b) Schéma fonctionnel

2. 3. 2 Régulation PI en courant

La **Figure. 2. 7** montre la deuxième stratégie de commande PI. La fonction de transfert de la boucle de courant possède un système de deuxième ordre donné par l'équation (1.27). L'expression de la fonction de transfert en boucle ouverte du système compensé est donné par

$$C(s)G_1(s) = 1 + (K_{pi}s + K_{ii}) \frac{E}{R} \frac{RCs + 1}{s(LCs^2 + \frac{L}{R}C + 1)} \quad (2.7)$$

(2.6) est un polynome de troisième ordre. Les méthodes de Zigler-Nichols, Bode et lieu des racines peuvent être utilisées pour calculer les paramètres K_{pi} et K_{ii} de la boucle interne de la **Figure. 2. 7 (b)** [Boukas]. Dans le Chapitre 3, nous avons fait des tatonnement en fonction de la réponse du système pour le choix des valeurs adéquates des paramètres des deux régulateurs PI.

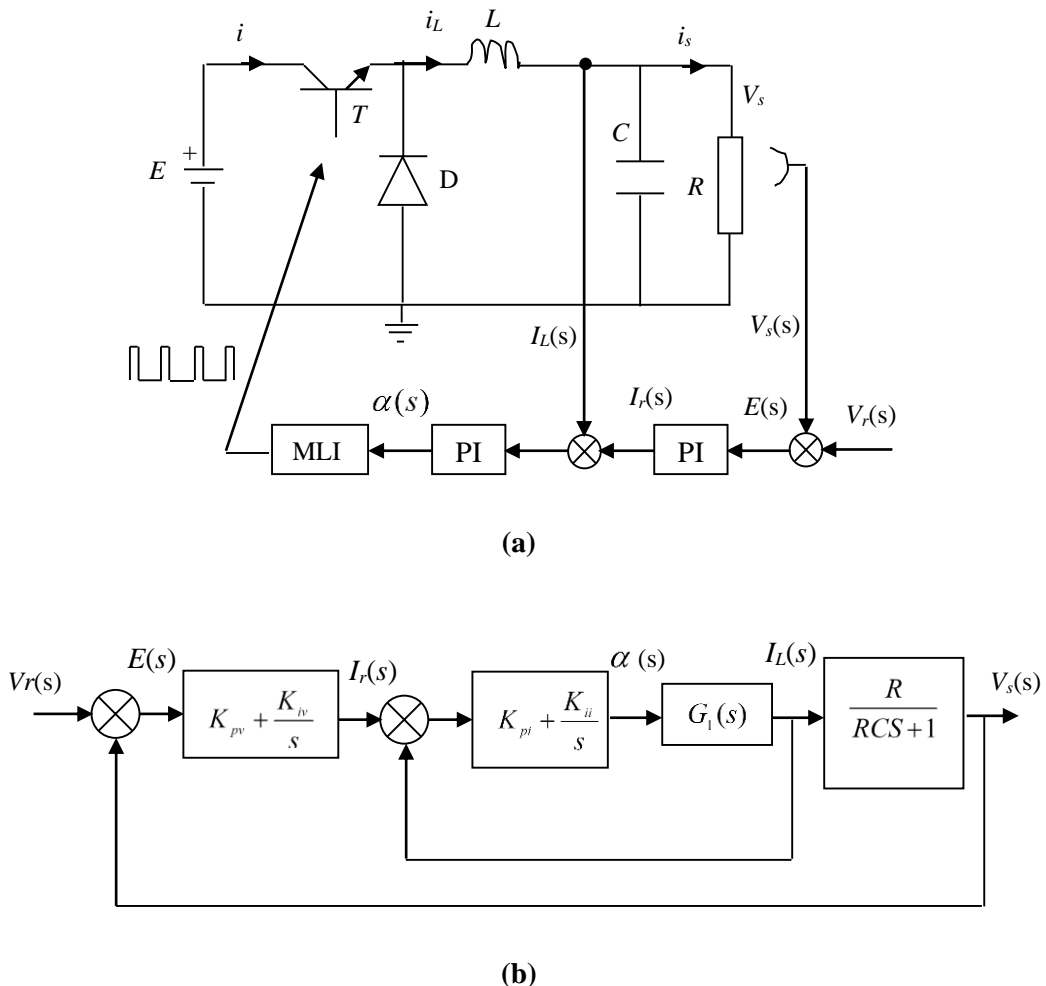


Figure. 2. 7 : Mode de contrôle en courant

(a) Convertisseur plus régulateurs

(b) Schéma fonctionnel

2. 4 Microcontrôleurs

Un microcontrôleur (en notation abrégée μc) est un circuit intégré qui rassemble les éléments essentiels d'un ordinateur : processeur, mémoires (mémoire morte et mémoire vive), unités périphériques et interfaces d'entrées-sorties. En plus de cette configuration minimale, les microcontrôleurs sont dotés d'autres circuits d'interface qui vont dépendre du microcontrôleur choisi à savoir les systèmes de comptage (TIMER), les convertisseurs analogique/numérique (CAN) intégrés, gestion d'une liaison série ou parallèle, un Watch dog (surveillance du programme), une sortie PWM.... Les avancées technologiques en matière d'intégration, ont permis d'implanter sur une puce de silicium de quelques millimètres carrés la totalité des composants qui forment la structure de base d'un ordinateur. Comme tout ordinateur, on peut décomposer la structure interne d'un microprocesseur en trois parties :

- Les mémoires
- Le processeur
- Les périphériques

Les mémoires sont chargées de stocker le programme qui sera exécuté ainsi que les données nécessaires et les résultats obtenus. Le processeur est le cœur du système puisqu'il est chargé d'interpréter les instructions du programme en cours d'exécution et de réaliser les opérations qu'elles contiennent. Au sein du processeur, l'unité arithmétique et logique ALU interprète, traduit et exécute les instructions de calcul.

Les périphériques ont pour tâche de connecter le processeur avec le monde extérieur dans les deux sens. Soit le processeur fournit des informations vers l'extérieur (périphérique de sortie), soit il en reçoit (périphérique d'entrée).

Les PICs sont des composants RISC (Reduced Instructions Construction Set), ou encore composant à jeu d'instructions réduit. Sachant que plus on réduit le nombre d'instructions, plus facile et plus rapide qu'en est le décodage, et plus vite le composant fonctionne.

Pour identifier un PIC, on utilise simplement son numéro :

- Les 2 premiers chiffres indiquent la catégorie du PIC, 16 indique un PIC MidRange.
- Vient ensuite parfois une lettre L, celle-ci indique que le PIC peut fonctionner avec une plage de tension beaucoup plus tolérante.
- Vient ensuite une ou deux lettres pour indiquer le type de mémoire programme :

- ✓ **C** : indique que la mémoire programme est une EPROM ou plus rarement une EEPROM
- ✓ **CR** : pour indiquer une mémoire de type ROM
- ✓ **F** : pour indiquer une mémoire de type FLASH.
- On trouve ensuite un nombre qui constitue la référence du PIC.
- On trouve ensuite un tiret suivi de deux chiffres indiquant la fréquence horloge maximale que le PIC peut recevoir [19].

2. 4. 1 Intérêt des microcontrôleurs

Un microcontrôleur est aussi un système informatique. Sa particularité est qu'il est conçu dans un seul circuit intégré. Par rapport à une carte mère d'ordinateur, les éléments qui constituent un microcontrôleur sont généralement plus simples, leur prix et leurs performances simplifient énormément la conception de système électronique et informatique. On peut encore préciser :

- ✓ Les performances sont identiques à ses concurrents.
- ✓ Très utilisé donc très disponible.
- ✓ Les outils de développement sont gratuits et téléchargeables sur le WEB.
- ✓ Le jeu d'instruction réduit est souple, puissant et facile à maîtriser.
- ✓ Les versions avec mémoire flash présentent une souplesse d'utilisation et des Avantages pratiques indéniables.
- ✓ La communauté des utilisateurs des PICs est très présente sur le WEB.
- ✓ Afin de choisir un pic adéquat à notre projet, il faut prendre en compte plusieurs considérations tel que le nombre d'entrées/sorties, la nécessité d'un convertisseur analogique/ numérique, la rapidité d'exécution ainsi que la taille de la RAM interne et la longueur de programme de l'application. Après ces considérations, nous avons pensé à utiliser le pic16F877A [19].

2. 4. 2 Les caractéristiques du pic16F877A

Le microcontrôleur pic16F877A est un circuit intégré à 40 broches dont les caractéristiques générales peuvent être résumées comme suit :

- ✓ CPU à architecture RISC (8 bits)
- ✓ Mémoire programme de 8 Kmots de 14 bits (Flash),
- ✓ Mémoire donnée de 368 Octets,
- ✓ EEPROM donnée de 256 Octets, - 14 sources d'interruptions
- ✓ Générateur d'horloge de type RC ou quartz (jusqu' à 20 MHz)

- ✓ 05 ports d'entrée sortie-Fonctionnement en mode veille pour réduction de la consommation
- ✓ Programmation par mode ICSP (In Circuit Serial Programming) 12V ou 5V
- ✓ Possibilité aux applications utilisateur d'accéder à la mémoire programme
- ✓ 8 entrées « canaux » du module de conversion analogique numérique 10 bits
- ✓ 2 Comparateurs analogiques programmables avec une référence de tension, Programmable également.
- ✓ Conservation des informations en mémoire vive jusqu'à 1.5v.
- ✓ Module de capture MLI programmable permettant de capturer un signal « logique » en fonction du temps, ou d'offrir un signal MLI (PWM).
- ✓ Timer0 : Timer/Compteur 8 bits avec un pré diviseur 8 bits
- ✓ Timer1 : Timer/Compteur 16 bits avec un pré division de 1, 2, 4, ou 8 ; il peut être incrémenté en mode veille (Sleep), via une horloge externe,
- ✓ Timer2 : Timer 8 bits avec deux diviseurs (pré et post diviseur) - Deux modules « Capture, Compare et PWM » :
 - Module capture 16 bits avec une résolution max. 12,5 ns,
 - Module Compare 16 bits avec une résolution max. 200 ns, - Module PWM avec une résolution max. 10 bits,
- Convertisseur Analogiques numériques multicanal (8 voies) avec une conversion sur 10bits
- Synchronous Serial Port (SSP) SSP, Port série synchrone en mode I2C (mode maitre/esclave), - Universel Synchronous aSynchronousReceiver Transmitter (USART) : Port série universel, mode asynchrone (RS232) et mode synchrone de nouvelles fonctionnalités, comme les gestions de portes «Série». Le PIC 16F877A parmi les plus puissants microcontrôleurs de la gamme « MidRange» chez Micro-chip. Dans notre travail, on s'intéresse au convertisseur analogique/numérique et au Timer2 pour la génération de l'interruption interne qui nous aide à déterminer l'angle de retard souhaité pour la commande [20]. La **Figure. 2. 8** montre le diagramme des pins du pic16F877A.

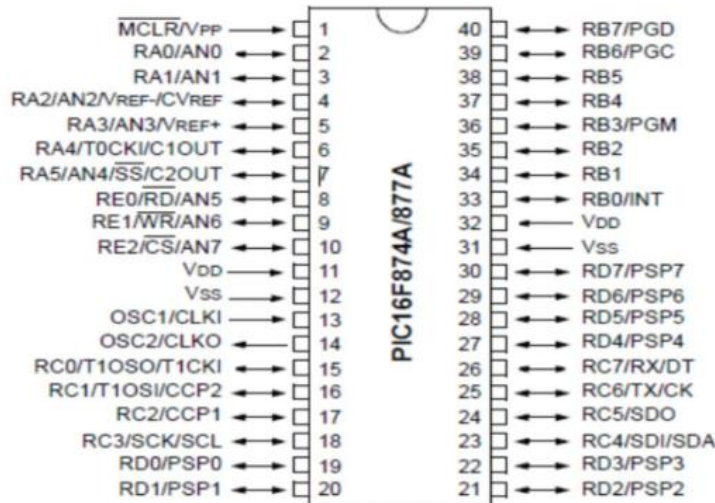


Figure. 2. 8 : Brochage du PIC 16F877A [19].

2. 4. 3 Architecture externe

Le pic16F877A fait partie de la sous famille des 16F87X. Cette branche fait partie intégrante de la famille des Pics MidRange, Le pic16F877A se présente sous la forme d'un boîtier 40 broches. Certaines pattes ont plusieurs fonctions : On dit que les fonctions sont multiplexée [16].

(i) Alimentation « VDD et VSS »

L'alimentation du circuit est assurée par les pattes VDD et VSS. Elles permettent l'ensemble des composants électroniques du PIC de fonctionner. Pour cela on relie VSS à la masse (0 Volt) et VDD à la borne positive de l'alimentation qui doit être bas la plage de tension [3- 6 V].

(i) L'horloge

Deux pates 13 et 14 sont présentées sur le boîtier du pic16F877A. La première nommée OSC1/CLKIN et la deuxième OSC2/CLKOUT. Ces deux broches peuvent être utilisées de plusieurs manières; cela dépend de l'oscillateur ou de l'horloge employés:

XT: version à oscillateur à quartz «standard» fonctionnant jusqu'à une fréquence maximale de 4MHz

HS «High Speed» : version à oscillateur à quartz capable de fonctionner jusqu'à une fréquence maximale de 20MHz.

RC: capable de fonctionner jusqu'à 4MHz mais avec une stabilité de fréquence plus faible que les versions à quartz.

LP «Low Power» : version à quartz également, mais prévue spécialement pour les applications à très faible consommation. C'est donc une version dont la fréquence maximale de fonctionnement est limitée à 20KHz.

MCLR : La broche MCLR (Master Clear) a pour effet de provoquer la réinitialisation du microprocesseur lorsqu'elle est connectée à 0. Lorsque le signal de "RESET" est activé, tous les registres sont initialisés et le compteur programme se place à une adresse spécifique appelée "Vecteur de RESET [20].

2. 4. 4 Architecture interne

Cette architecture nous présente les principaux organes qui composent le microcontrôleur, la **Figure 2. 9** illustre cette architecture :

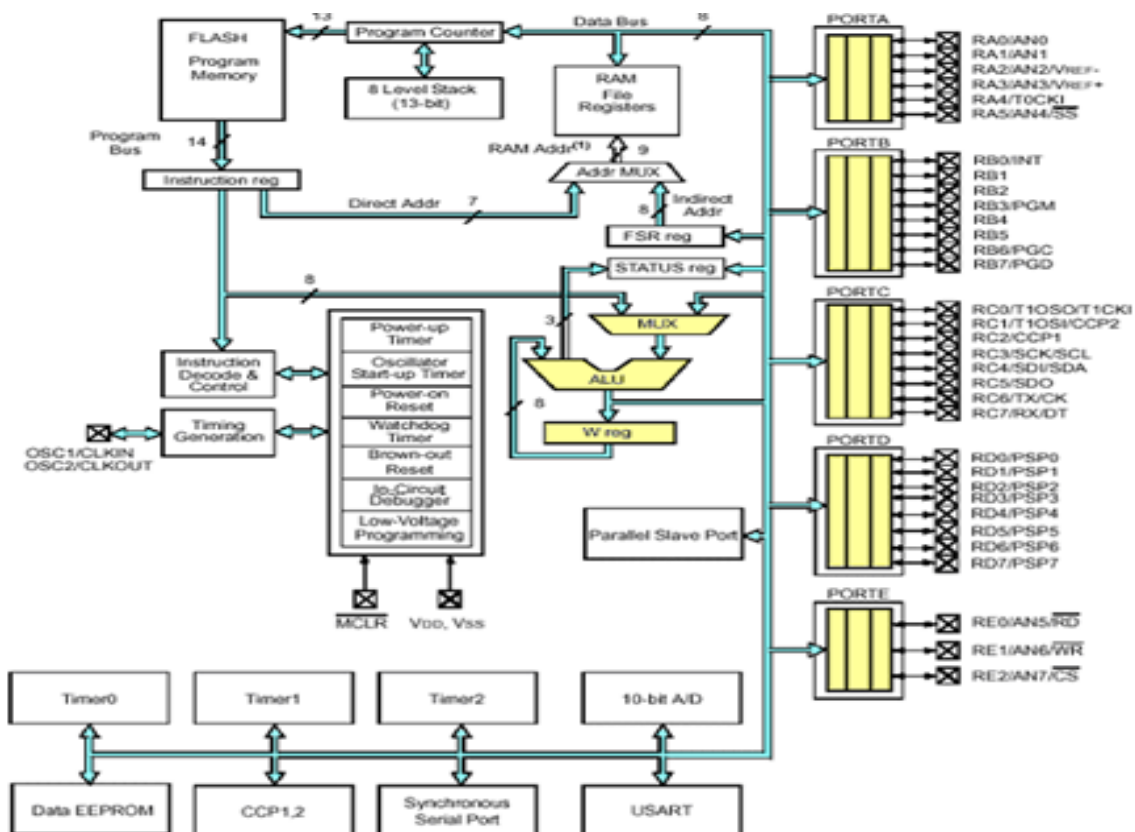


Figure 2. 9 : Architecture interne du pic16F877A [21].

(i) *Timers du pic 16F877A [22]* :

Timer 0 :

C'est un compteur à 8 bits ayant les caractéristiques ci-dessous. Il est incrémenté en permanence soit par l'horloge interne $F_{osc}/4$ (mode timer) soit par une horloge externe appliquée à la broche RA4 du port A (mode compteur).

Le choix de l'horloge se fait à l'aide du bit T0CS du registre OPTION_REG.

- T0CS = 0 horloge interne.
- T0CS = 1 horloge externe appliquée à RA4.
- Dans le cas de l'horloge externe, Le bit T0SE du registre OPTION_REG permet de choisir le front sur lequel le TIMER s'incrémente.
 - T0SE = 0 incrémentation sur fronts montants.
 - T0SE = 1 incrémentation sur fronts descendants.
- Quelle que soit l'horloge choisie, on peut la passer dans un diviseur de fréquence programmable (Prescaler) dont le rapport DIV est fixé par les bits PS0, PS1 et PS2 du registre OPTION_REG. L'affectation ou non du pré diviseur se fait à l'aide du bit PSA du registre OPTION_REG.
 - PSA = 0 on utilise le pré diviseur.
 - PSA = 1 pas de pré diviseur (affecté au chien de garde)
- Le contenu du timer TMR0 est accessible par le registre qui porte le même nom. Il peut être lu ou écrit à n'importe quel moment. Après une écriture, le timer ne compte pas pendant deux cycles machine.
- Au débordement de TMR0 (FF 00), le drapeau INTCON.T0IF est placé à "1". Ceci peut déclencher l'interruption TOI si celle-ci est validée. La (Figure. 2. 10) représente le fonctionnement du Timer

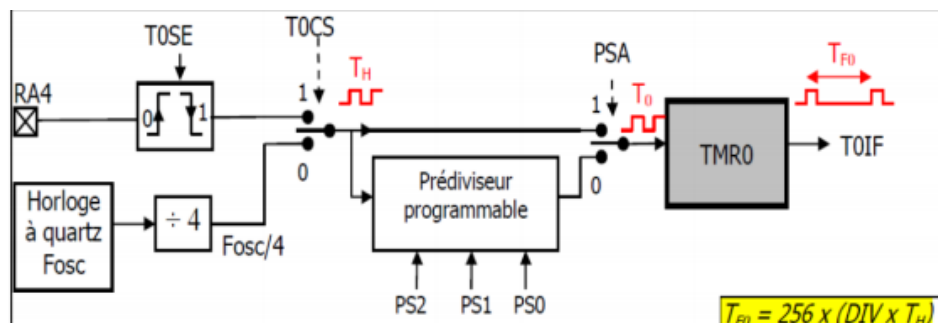


Figure. 2. 10 : Architecture interne du du timer0 du pic 16F877A [21].

En résumé, chaque fois que le compteur complète un tour, le drapeau TOIF se lève. Si on note TH la période de l'horloge source, T0 l'horloge de TMR0 et TF0 le temps qui sépare 2 levées de drapeau successifs

- Sans pré diviseur : $TF0 = 256 T0 = 256 TH$.
- Avec pré diviseur : $TF0 = 256 T0 = 256 \times (DIV \times TH)$.
- Avec pré diviseur et compteur N dans le programme on obtient: $N \times TF0 = N \times 256 \times (DIV \times TH)$.

Timer 1 :

TMR1 est un Timer/Compteur à 16 bits accessible en lecture/écriture par l'intermédiaire des registres 8 bits TMR1H (bank0) et TMR1L (bank0) qui constituent sa partie haute et sa partie basse. On le configure à l'aide du registre T1CON (bank0). La Figure 2.8 représente le fonctionnement du Timer1 (voir la Figure. 2. 11)

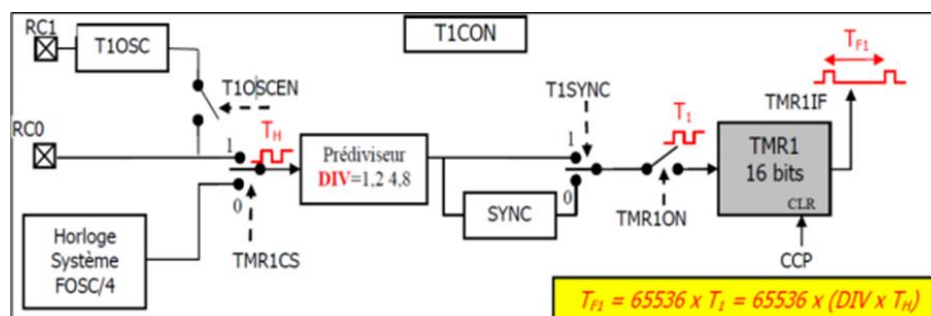


Figure. 2. 11 : Architecture interne du Timer1 du pic 16F877A [21].

Timer 2 :

TMR2 est un timer à 8 bits accessible en lecture écriture et est constitué de :

- Un registre de contrôle T2CON (bank0).
- Un prédiviseur
- Un registre de période PR2 (bank1) accessible en lecture/écriture.
- Un comparateur.
- Un post diviseur (1 à 16)

Le Timer2 est incrémenté par l'horloge interne Focs/4. Il commence à 0 et quand il atteint la valeur du registre PR2, le comparateur génère un signal qui :

- Remet Timer2 à 0.
- Incrémenté le postscaler qui fonctionne comme un diviseur de fréquence.

- Au débordement du postcaler, le drapeau PIR1.TMR2IF est positionné, l'interruption correspondante est déclenchée si elle est validée.
- TMR2 est remis à zéro à chaque RESET.
- Le prescaler et le postcaler sont initialisés à chaque écriture dans TMR2 ou dans T2CON et au RESET du processeur.
- Le fonctionnement de TMR2 est configuré à l'aide du registre de contrôle T2CON : En résumé, Si on note : DIV1 : rapport du pré diviseur. DIV2 : Rapport du post diviseur. P : Valeur placée dans le registre PR2.

Tsy : période de l'horloge système. La périodicité du drapeau TMR2IF est donnée par :

$TF2 = DIV1 \times (P+1) \times DIV2 \times Tsy$ (voir la [Figure. 2. 12](#)).

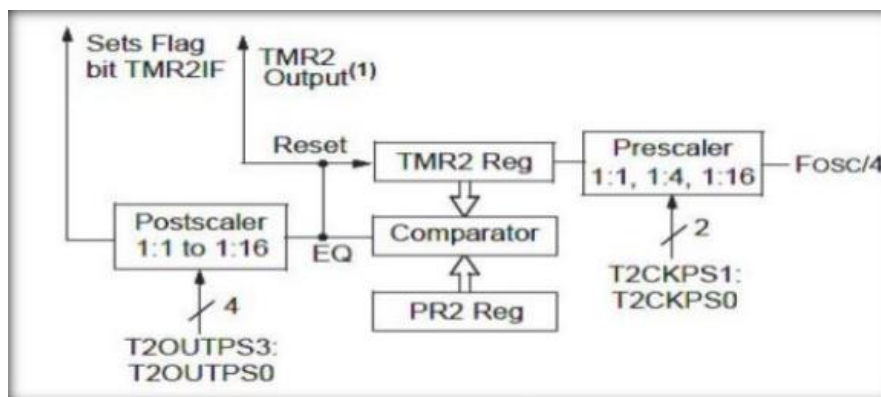


Figure. 2. 12 : Architecture interne du Timer2 du pic 16F877A [21].

(ii) Les interruptions

Le pic16F877A possède 15 sources d'interruptions. Les plus importantes à connaître, car ce sont les plus utilisées en pratique, sont :

- **TMR0I** : Dépassement du TIMER0 « débordement le passage de 255 à 0 »
- **TMR2I** : Contenu du PR2 du TIMER2 « débordement le passage de la valeur qui contient dans le registre PR2 à 0 »
- **INT** : Interruption extérieure RB0
- **RBI** : Changement d'état du port B « RB7 : RB4 »
- **PSPI** : Lecture / Ecriture sur le port parallèle
- **ADI** : Convertisseur Analogique / Numérique

- **TXI** : Emission sur le port RS232
- **RCI** : Réception sur le port RS232
- **SSPI** : Bus SPI / I²C
- **CCP1I** : Capture / Compare / PWM
- **CCP2I** : Capture / Compare / PWM
- **EEI** : Ecriture dans EEPROM
- **CMI** : Comparateur
- **BCLI** : Collision sur Bus [15].

(iii) Les ports d'entré/sorties

Le pic16F877A dispose 5 PORT « A, B, C, D, E ». Tous ces ports sont bidirectionnels. La plupart des lignes de Ports ont une double fonction (Voir la **Figure. 2. 13**).

Port A : Les broches port A, excepté RA4, sont multiplexées, avec les entrées du convertisseur analogique numérique (AN0. AN4).La broche RA4 est multiplexé avec l'entrée d'horloge externe du timer0 (RA4/T0CKI).

- Port B : Le port B peut être programmé pour un tirage à 5V (pull up) de toutes ses lignes que l'on peut mettre ou non en service en mode entrée uniquement. Elles sont automatiquement désactivées quand le port est configuré en sortie. En mode entrée, chaque broche du PORTB doit être maintenue à un niveau haut par l'intermédiaire de résistances de 10 k pour ne pas déclencher d'interruptions imprévues. Cette possibilité d'interruption sur un changement d'état associé à la fonction de tirage configurable sur ces 4 broches, permet l'interfaçage facile avec un clavier [15].

Cela rend possible réveil du PIC en mode SLEEP par un appui sur une touche du clavier.

- Port C : Le port C est partagé avec liaisons, les timers 1 et 2 et les modules CCP.
- Port D et E : En plus de leur utilisation comme PORTS E/S; les ports D et E, permettent au microcontrôleur de travailler en mode PSP (Parallèle Slave Port) c'est-à-dire, qu'il peut être interfacé avec un autre microprocesseur. Dans ce cas le PORTD représente le bus de données et le PORTE les signaux de contrôle (RD\, WR\ et CS\).Le PORTE peut être aussi, configuré en mode analogique pour former avec le PORTA les 8 entrées du convertisseur analogique numérique. Par défaut, le PORTE est configuré comme port analogique, et donc, comme pour le PORTA [20].

(iv) Convertisseur analogique numérique

Notre 16F877A travaille avec un convertisseur analogique/numérique qui permet un échantillonnage sur 10 bits. Il se compose de (Voir la **Figure. 2. 14**):

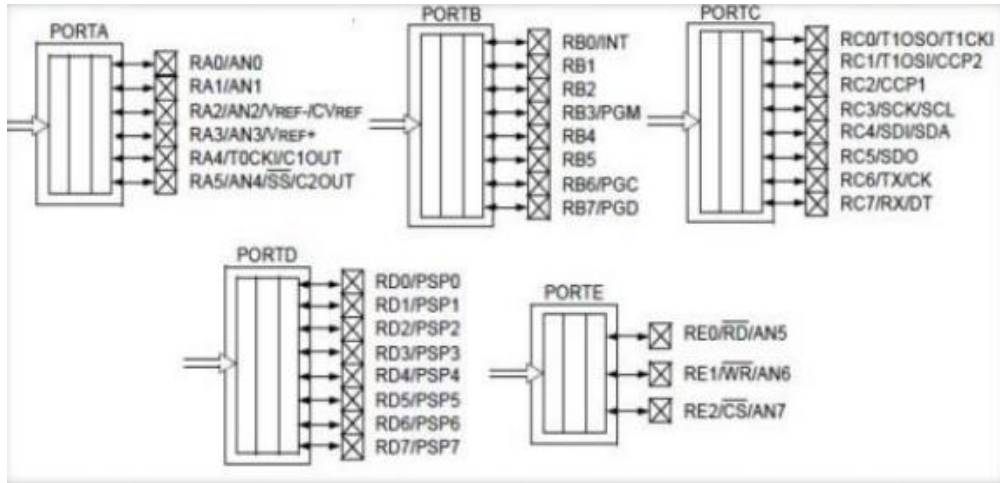


Figure. 2. 13 : Les différents PORT de PIC16F877A [21].

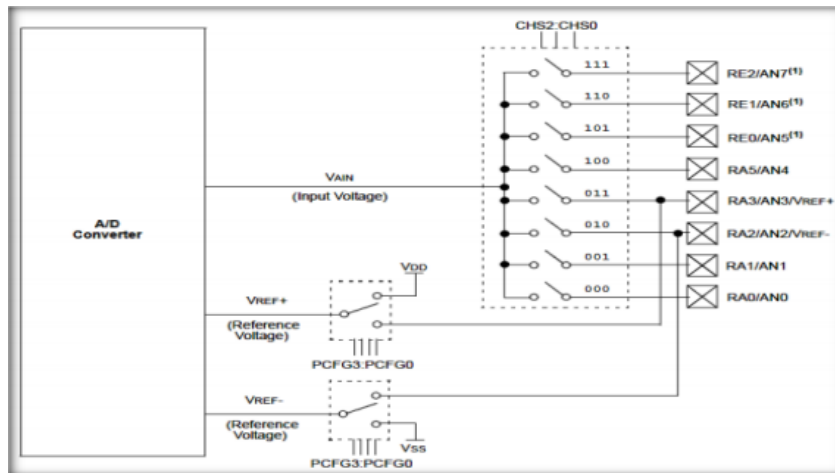


Figure. 2. 14 : Schéma fonctionnel analogique numérique [21].

(v) Module power control PWM

Le mode PWM a l'option de créer un signal carré reconfigurable en fonction du cycle de service d'onde à une fréquence définie par l'utilisateur. Le logiciel d'application peut modifier le cycle ou la période de service en modifiant la valeur écrite en registre des fonctions [22]. En mode PWM, la broche CCP1 produit jusqu'à une sortie PWM de résolution 10 bits.

Depuis la broche CCP1 est multiplexée avec le verrou de données PORTC, le bit TRISC doit être autorisé à faire le CCP1 un pin de sortie [23].

La fonctionnalité du module PWM est présentée par la **Figure. 2. 15** [23].

Une production du signal PWM (voir Figure. 2. 10) à une base de temps (période) et un temps que la production est élevée (Duty cycle). Les étapes suivantes doivent être prises lors de la configuration le module CCP pour l'opération PWM [23] :

1. Définissez la période PWM en écrivant au registre PR2.
2. Définissez le cycle de service PWM en écrivant au CCP1L s'inscrire et CCP1CON bits.
3. Faire de la goupille CCP1 une sortie en TRISC bit.
4. Définissez la valeur de prescale TMR2 et activez timer2 en écrivant à T2CON.
5. Configurez le module CCP1 pour le fonctionnement de PWM.

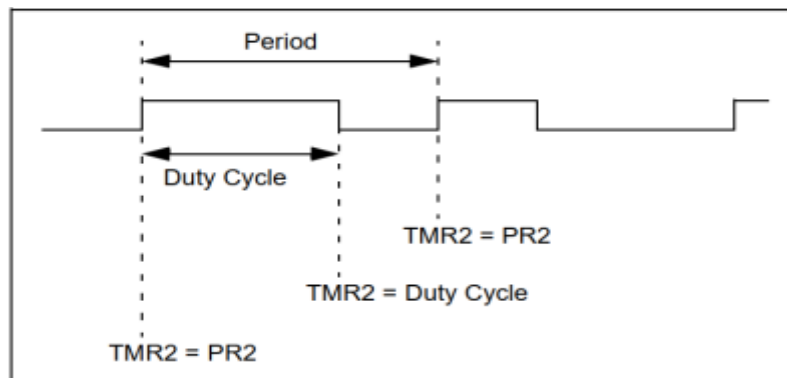


Figure. 2. 15 : Sortie PWM [23]

Le module Motion Feedback est un périphérique conçu pour les applications de rétroaction de mouvement. Avec le module PWM power control, il fournit une variété de solutions de contrôle pour un large éventail de moteurs électriques. Le module se compose en fait de deux sous-modules [23] :

- ✓ Module de capture d'entrée (IC)
- ✓ Interface encodeur de quadrature (QEI)

Le module PCPWM (power control PWM) simplifie la mise en œuvre de la tâche de la génération des impulsions MLI pour les applications de commande des moteurs et de conversion de puissance électrique. En particulier, le contrôle de puissance et de mouvement suivant les applications sont prises en charge par le module PWM :

- Induction AC en trois phases et en une seule phase Moteurs
- Moteurs de réticence commutée

- Moteurs sans brosse DC (BLDC)
- Alimentations non ininterrompues (UPS)
- Plusieurs moteurs à brosse DC

Ce mode offre les caractéristiques suivantes :

- Jusqu'à 8 broches de sorties MLI avec 4 générateurs de rapport cyclique. Les broches peuvent fonctionner en pair pour donner un contrôle demi-point.
- Résolution jusqu'à 14 bits, selon la période MLI
- Génération des MLI suivant des triangulaires en dent de scie ou symétriques.
- Génération du temps mort réglable entre les MLI en mode pair.

2. 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé quelques notions et caractéristiques de la régulation des systèmes statiques et dynamiques. Quelques définitions et principes de fonctionnement de la régulation PI a été exposées. En plus, le dimensionnement de la régulation PI cascadée du hacheur back présenté dans le Chapitre 1 est également adopté utilisant des méthodes pour des systèmes de premier ordre et de deuxième ordre. Puis, nous avons mis en évidence les architectures interne et externe du pic16F877A et ses caractéristique et cela tout en mettant en relief les différentes actions et les structures de ce dernier. Dans le Chapitre suivant, nous allons discuter les résultats de simulations Matlab et Proteus destinées pour la régulation PI en boucle fermée du hacheur survolteur.

CHAPITRE 3 :

Simulations de la Commande PI du Hacheur Dévolteur

Résumé :

Dans ce Chapitre, nous allons lancer nos simulations Matlab et Proteus en fonction de certaines valeurs de la résistance de charge et de la consigne de sa tension. A cet effet, les blocks nécessaires de Simulink/Matlab sont branchés et les valeurs des paramètres du filtre LC et les correcteurs PI sont adaptées. Lors de la simulation Proteus, le courant de charge est capté à partir de la tension aux bornes de la résistance shunt et conditionné par un amplificateur opérationnel.

Sommaire du Chapitre :

- 3. 1 Introduction
- 3. 2 Simulations Matlab
- 3. 3 Simulations Proteus
- 3. 4 Conclusion

3. 1 Introduction

Le rôle essentiel de la commande en boucle fermée est de maîtriser l'évolution d'une ou plusieurs grandeurs physiques à partir d'une ou plusieurs variables de contrôle et ceci dans un environnement perturbé. Ces perturbations sont de nature externe (perturbation sur la mesure, perturbation sur la commande, etc) ou interne au système (erreur du modèle, incertitude paramétrique) et généralement non-mesurable. La commande de processus se fait par l'introduction dans la chaîne de commande d'un algorithme de contrôle ayant des performances satisfaisantes pour s'affranchir des perturbations. Cet algorithme de contrôle est appelé un correcteur ou parfois un régulateur [Safroui]. Les algorithmes de contrôle pour synthétiser un correcteur sont nombreux. Parmi les régulateurs, on cite le régulateur PID, le régulateur retour d'état, le régulateur flou, etc.

Dans cette section, nous allons simuler la commande PI du circuit hacheur série présenté dans le Chapitre 1. Les résultats sont obtenus en boucle fermée utilisant des logiciels Matlab/Simulink et Proteus. A partir de plusieurs essais de la tension de référence et de la résistance du récepteur, on va mettre en évidence le fait que la régulation de la tension s'effectue après un certain temps de réponse.

3. 2 Simulations Matlab

Dans le Chapitre 1, nous avons expliqué le principe de fonctionnement du hacheur série et de l'importance du rapport cyclique pour déterminer la valeur de la tension sortant du circuit et comment la contrôler à l'aide du signal MLI. Le logiciel Matlab est un logiciel commercial de calcul interactif. Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes linéaires et non-linéaires, etc. Il permet de calculs matriciels à syntaxe simple, il peut être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques, grâce à ses fonctions spécialisées. Aussi, il possède de bonnes capacités graphiques pour présenter des résultats ou pour créer des applications. Il peut être intégré avec d'autres langages à savoir C, FORTRAN, VHDL, etc. Il fonctionne dans plusieurs environnements tels que l'UNIX/X, le Windows et le Macintosh. Le schéma blocks montrant les fonctionnalités du Matlab est présenté par la **Figure. 3. 1**.

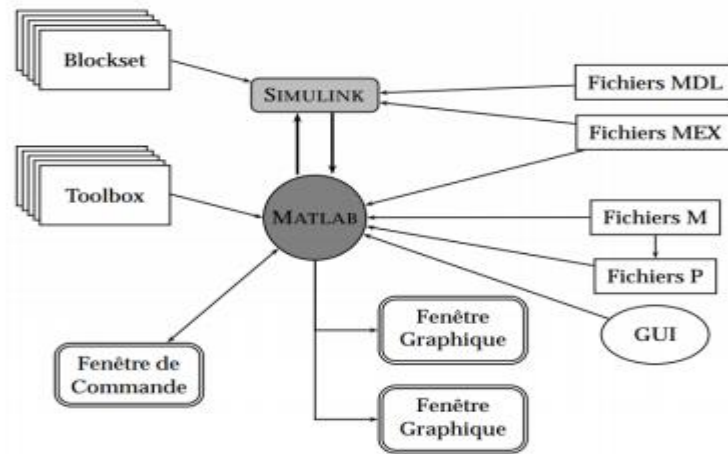


Figure. 3. 1 : Environnement Matlab et ses fonctionnalités.

L'ensemble du circuit hacheur dévolteur et la chaîne de la commande PI cascadée est conçu comme détaillées dans la [Figure. 4. 2](#). Nous avons choisi un temps d'échantillonnage de $T_e = 0.00001\text{sec}$ et les paramètres de chaque correcteur sont adaptés de telles sorte que la réponse de la tension de sortie maintienne une forme oscillante amortie (voir la [Table. 3. 1](#)). Un intervalle de simulation de 2 sec a été considéré dans les expériences qui se suivent.

Table. 3. 1 : Paramètres des correcteur PI, $T_e = 0.00001$

Régulateur PI	Paramètre	Matlab
Tension	K_p	2
	K_i	10
Courant	K_p	5
	K_i	200

La [Figure. 3. 3](#) illustre l'évolution des grandeurs électriques pour une charge de type résistive, $R = 50\Omega$ est deux valeurs de la tension référence de 10V et 30V. Il est clair que la poursuite de la tension mesurée (à commandée) par rapport à la tension de référence est effectuée avec un temps de réponse petit. La [Figure. 3. 4](#) montre la commande du convertisseur DC/DC à partir d'une valeur maximale puis une valeur minimale (étude de l'asservissement) de la tension de référence. La précision de la commande PI est remarquable puisque l'erreur

statique en régime permanent tend vers zéro. Pareillement, deux autres cas d'étude sont examinés dans cette section comme présentés dans les **Figures. 3.5** et **3.6**, mais avec des valeurs différentes de la résistance du récepteur, $R = 75\Omega$ et $R = 150\Omega$. La convergence de la tension mesurée vers la tension de consigne est assurée par les correcteurs PI. En plus, l'allure du courant mesuré et l'allure du courant de référence se rapprochent bien en régime permanent. Dans ces figures, il est bien noté que la limitation du courant à la sortie du correcteur PI de tension est appliquée à 3A (saturation du courant de référence). A partir de ces simulations Matlab, nous pouvons constater que le changement de la valeur de la résistance de la charge influe sur le temps de réponse et le premier dépassement de la tension de sortie du hacheur.

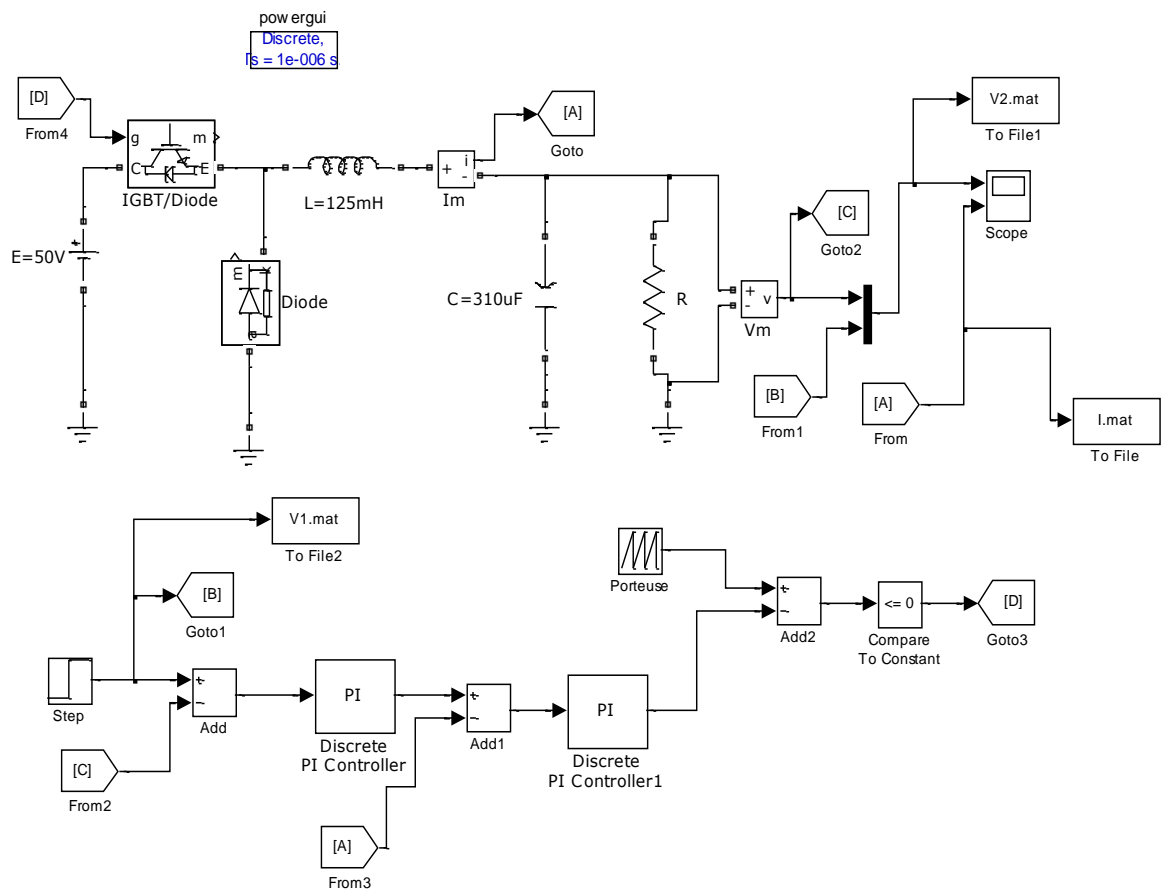


Figure. 3.2 : Schéma blocks de la correction PI cascadée du hacheur dévolteur

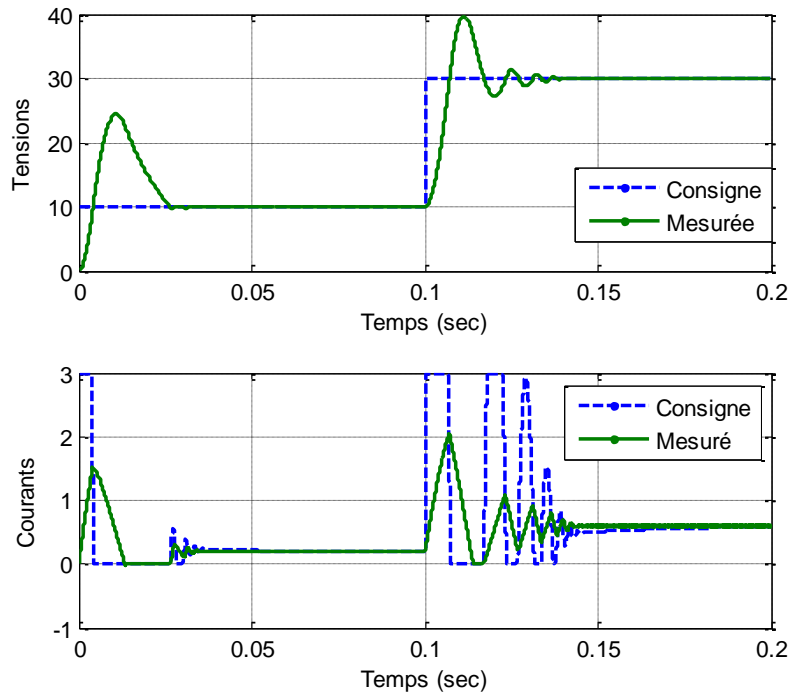


Figure. 3. 3 : Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 50\Omega$, $V_r = 10V$ et $30V$

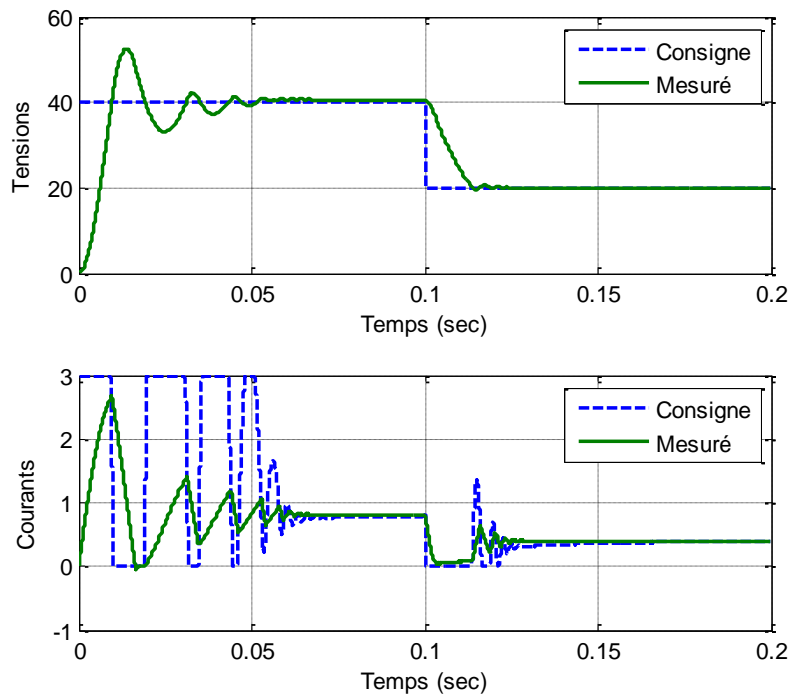


Figure. 3. 4 : Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 50\Omega$, $V_r = 40V$ et $20V$

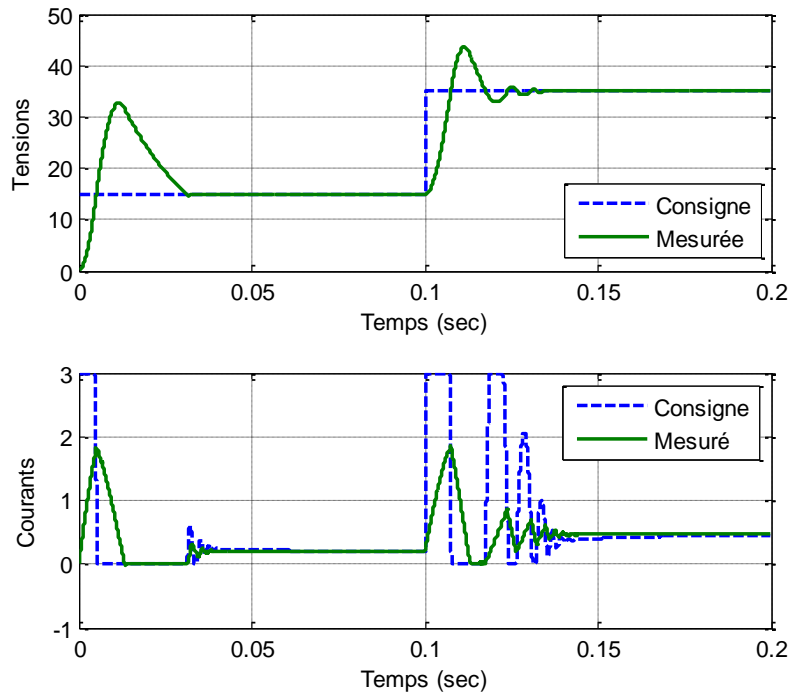


Figure. 3. 5 : Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 75 \Omega$, $V_r = 15V$ et $35V$

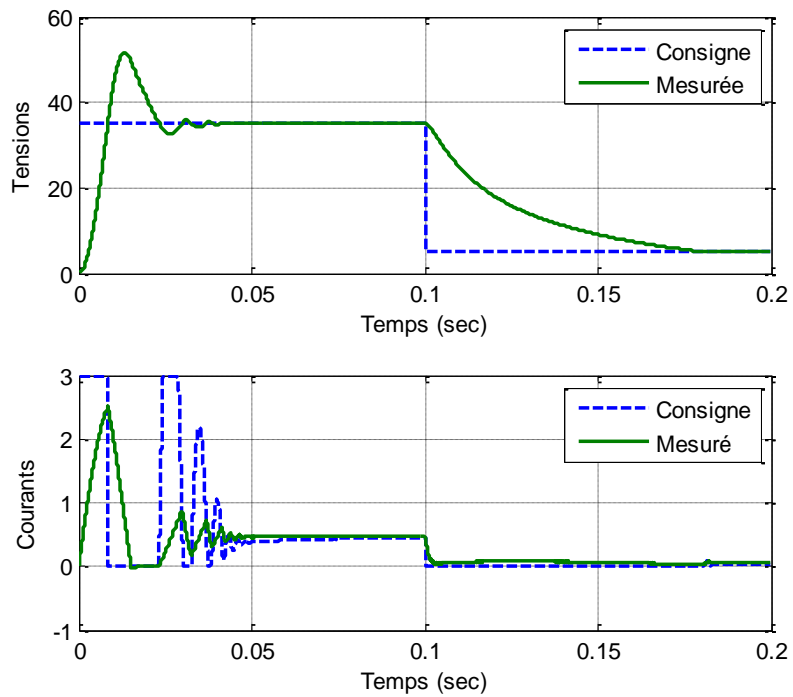


Figure. 3. 6 : Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 75 \Omega$, $V_r = 35V$ et $5V$

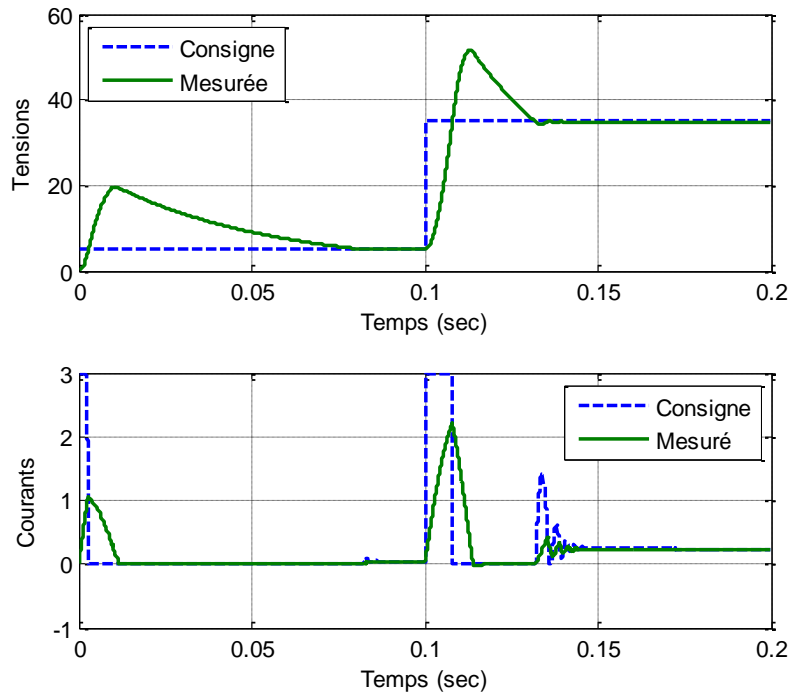


Figure. 3. 7 : Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 150\Omega$, $V_r = 5V$ et $35V$

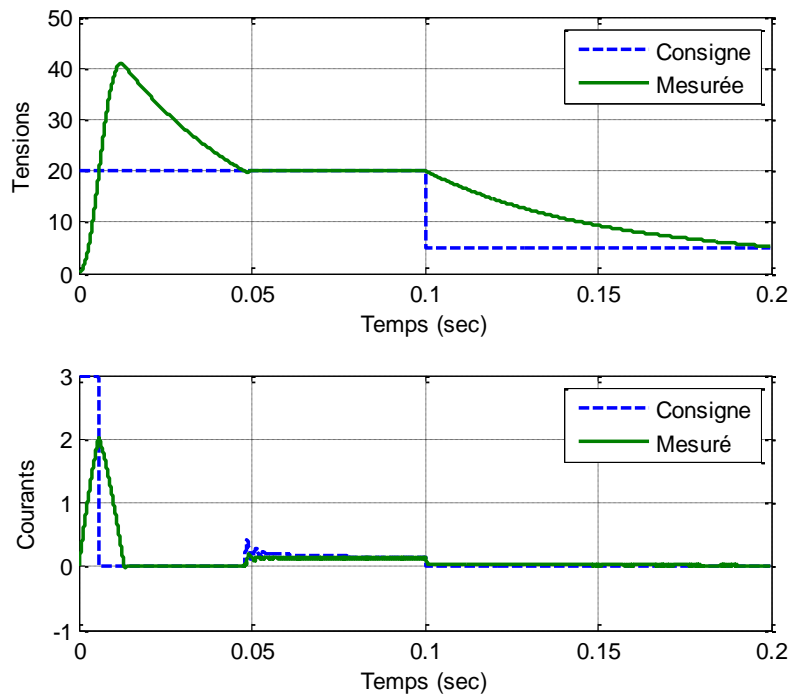


Figure. 3. 8 : Allures des tensions (V) et des courants (A) pour $R = 150\Omega$, $V_r = 20V$ et $5V$

3. 3 Simulations Proteus

Avant de réaliser la plateforme matérielle de notre projet (le rôle du Chapitre 2), il est mieux de tester en simulations Proteus le code CCS développé pour la commande PI cascadée (voir l'Annexe B). Ceci est réalisé après la programmation du pic16F877A et le branchement de différents composants dans les deux circuits électriques à savoir le circuit de commande et le circuit de puissance. Dans cette partie de notre travail, nos simulations ont été effectuées à l'aide de l'utilisation de trois logiciels ; CCSPICC, MPLAB et ISIS Proteus.

- L'environnement CCSPIC est utilisé pour la création du fichier source (*.c)
- L'environnement MPLAB est exploité pour le calcul du temps d'exécution la programmation du pic, etc.
- Programmation du pic16F877A via le programmeur PICKit 3 de microchip.
- L'environnement ISIS Proteus est fait pour la réalisation et la simulation du circuit électrique.
- Illustration des signaux simulés au moyen de l'oscilloscope virtuel ou autres.

Dans la simulation Proteus, le traitement de la commande PI est exécuté numériquement. Alors, la fonction de transfert du correcteur PI numérique est obtenue en appliquant la transformation bilinéaire. D'où

$$C(z) = K_p + \frac{K_i}{s} \Big|_{s=\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})}} \quad (3.1)$$

$$= K_p + \frac{TK_i(1+z^{-1})}{2(1-z^{-1})}$$

Avec $C(z) = 2K_p + TK_i + (TK_i - 2K_p)z^{-1}$, l'équation récurrente à programmer devient

$$i(n) = (2K_p + TK_i)e(n) + (TK_i - 2K_p)e(n-1) \quad (3.2)$$

Où $e(n)$ est l'erreur à l'instant n et $i(n)$ est le courant de référence.

Les valeurs des paramètres de la régulation PI sont obtenues en fonction de plusieurs tests sur la plateforme de simulations Proteus (voir la Table. 3. 2). Le schéma électrique de la simulation Proteus est montré par la Figure. 3. 9. Dans ce dernier, nous avons utilisé un diviseur de tension pour capter l'image de la tension de sortie. D'où

$$V_m = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \alpha E \quad (3.3)$$

Table. 3. 2 : Paramètres des correcteurs PI, $T_e = 0.0004$

Régulateur PI	Paramètre	Proteus
Tension	K_p	0.5
	K_i	0.1
Courant	K_p	0.3
	K_i	0.15

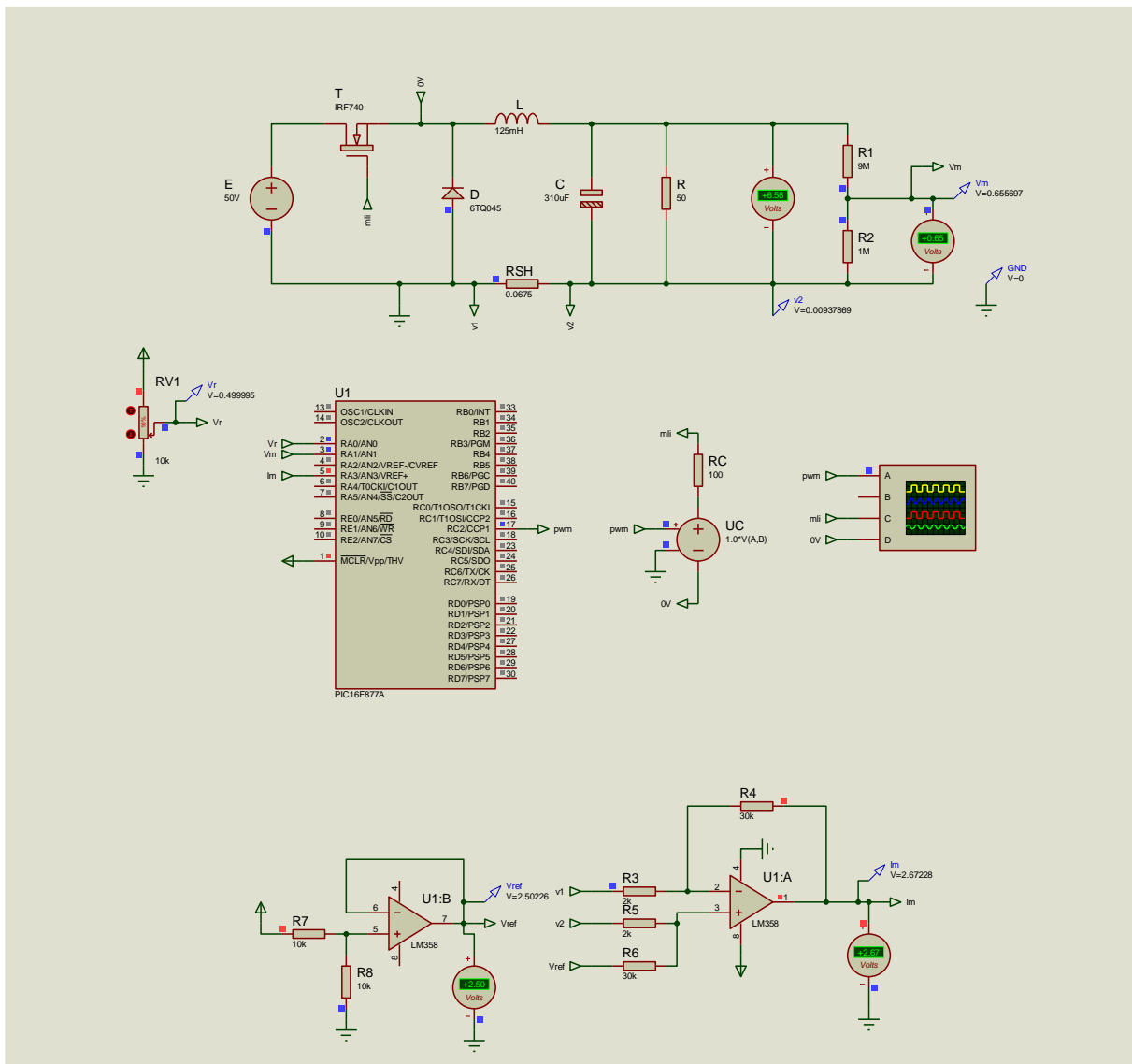


Figure. 3. 9 : Circuit électrique pour la simulation Proteus

Où α est le rapport cyclique, $E = 50V$ est la tension d'alimentation, $R_1 = 1 M\Omega$ et $R_2 = 100 k\Omega$. Pour $0 < \alpha E < 50V$, on arrive à mesurer $0 < V_m < 5V$ puisque le pic16F877A accepte cette intervalle de la tension.

Les composants nécessaires pour cette application sont mentionnés dans la **Figure. 3. 9**. La mesure de courant à commander est effectuée à l'aide de la mesure de la tension ($V_2 - V_1$) aux bornes de la résistance shunt, $R_{shunt} = 0.0675 \Omega$ (voir **Figure. 3. 10 (a)**). La **Figure. 3. 10 (b)** est un montage suiveur à base d'amplificateur opérationnel LM358 qui divise la tension $+5V$ en deux, $V_{ref} = 2.5V$ en gardant l'adaptation des impédances entrée/sortie. La **Figure. 3. 10 (c)** délivre une tension V_o entre $2.5V$ et $5V$ qui prend l'information du courant de charge. D'où

$$V_o = V_{ref} + \frac{R_4}{R_3} (V_2 - V_1) \quad (3.4)$$

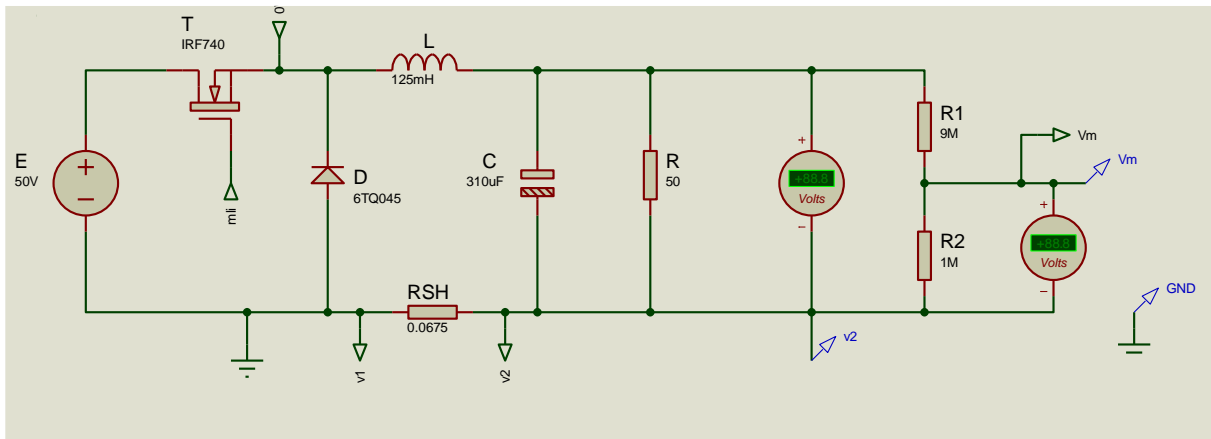
Où $R_4 = 30 k\Omega$, $R_3 = 2 k\Omega$ et $V_2 - V_1 = R_{shunt} .I_m$. Ces valeurs doivent garantir $0 < V_o < 5V$ (c'est une entrée du pic). Pour un courant nul de la charge, $V_o = 2.5V$ et pour un courant max de $2A$, $V_o = 4.52V$. A partir de (3.4), le courant mesuré en (A) devient

$$I_m = (V_o - V_{ref}) \frac{R_3}{R_4 R_{shunt}} \quad (3.5)$$

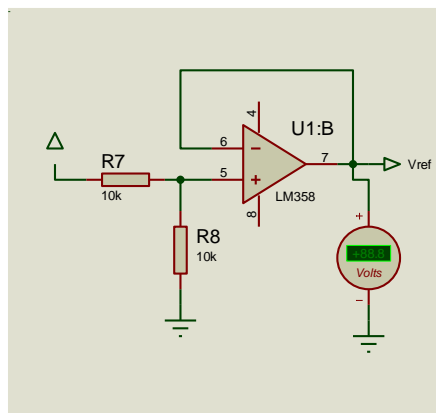
La tension V_{ref} est utilisée dans (3.5) pour assurer le fonctionnement de l'ampli-op dans une plage linéaire. Elle est utilisée également pour la lecture du courant dans le pic (calcul du signal MLI, affichage LCD, etc).

La **Figure. 3. 11** montre la commande PI de la tension de sortie du hacheur dévolteur pour $R = 50 \Omega$ et trois valeurs de la consigne, V_r . On remarque que la tension mesurée démarre par quelques oscillations amorties autour de V_r et tends vers à la fin du compte à sa référence. Le courant réel, $I_r = (V_2 - V_1) / R_{shunt}$ et le courant mesuré utilisant (3.5) sont illustrés dans cette figure. Ce dernier suit régulièrement I_r , ce qui confirme la consistance du capteur de courant à base d'ampli-op.

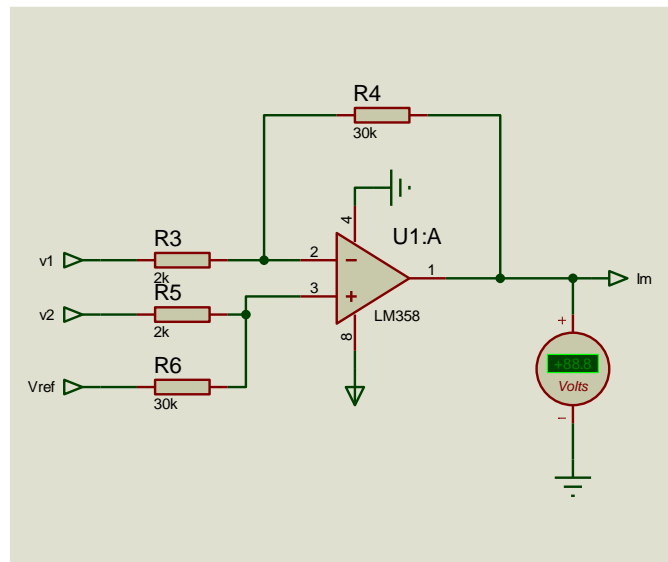
Les **Figures. 3. 12** et **3.13** offrent les résultats de simulations pour $R = 75 \Omega$ et $R = 150 \Omega$. Les oscillations en régime transitoire sont observées et les valeurs finales de la grandeur à commandée poursuivent les consignes. En plus, les courants réel et mesuré sont presque confondus dans les deux régimes de la commande PI. La simulation Proteus montre aussi la déformation de la réponse en fonction de la valeur de la résistance de la charge sélectionnée.



(a)

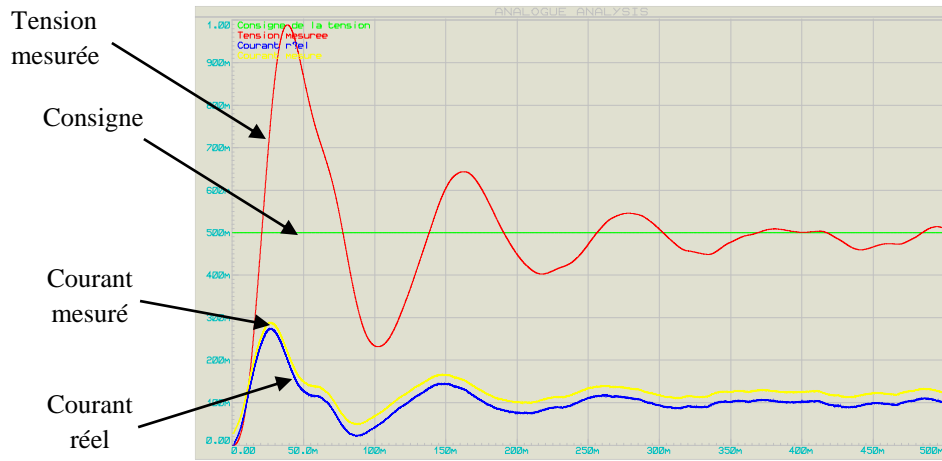


(b)

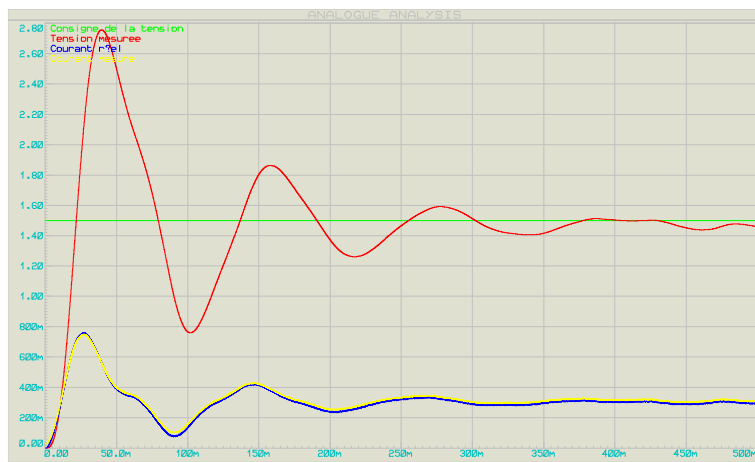


(c)

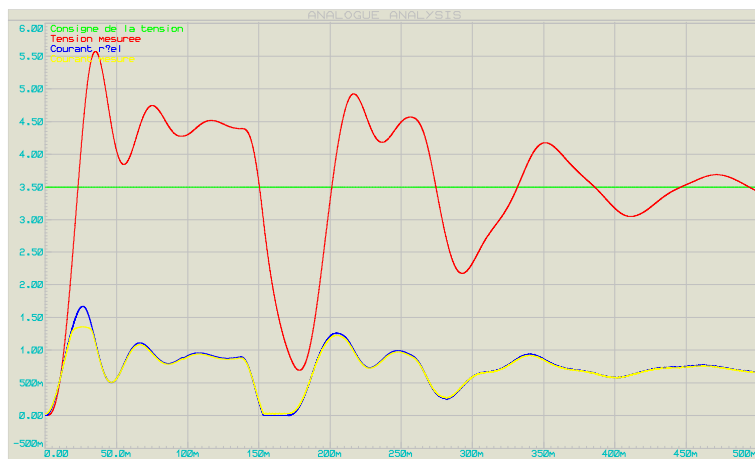
Figure. 3. 10 : Mesures de la tension et du courant de la charge



(a)

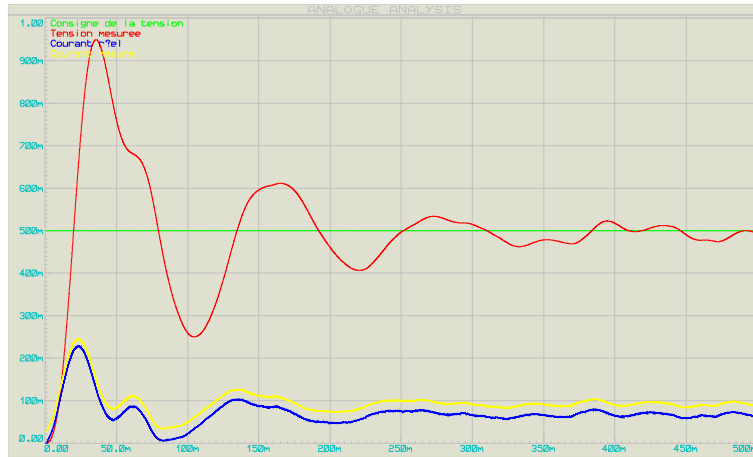


(b)

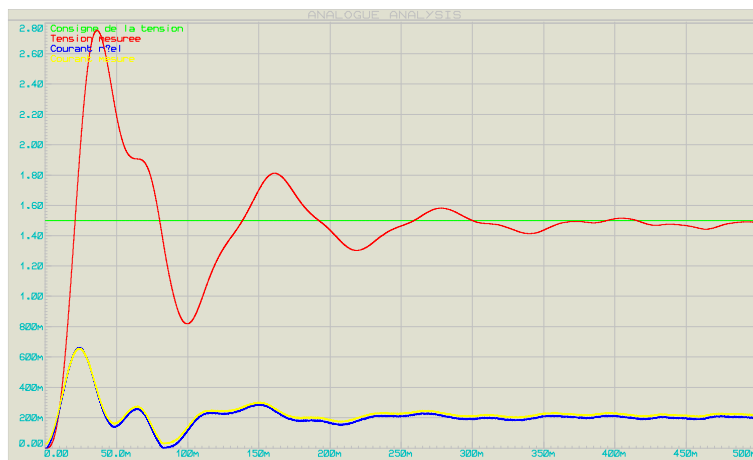


(c)

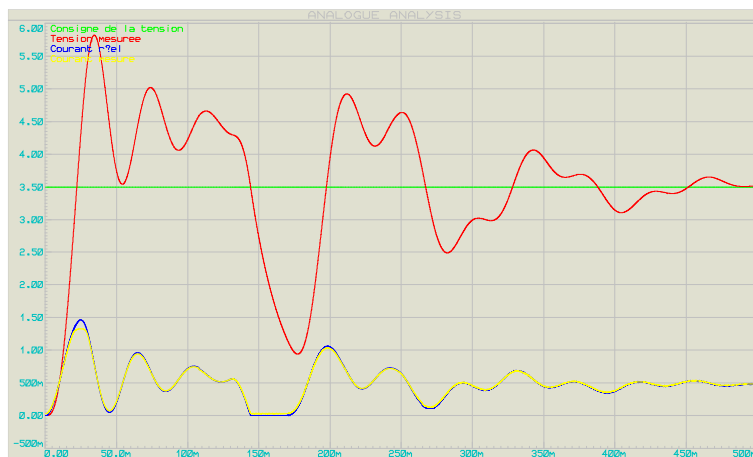
Figure. 3. 11 : Régulation PI pour $R = 50\Omega$, $V_r = 10\%$ (a), 30% (b) et 70% (c)



(a)

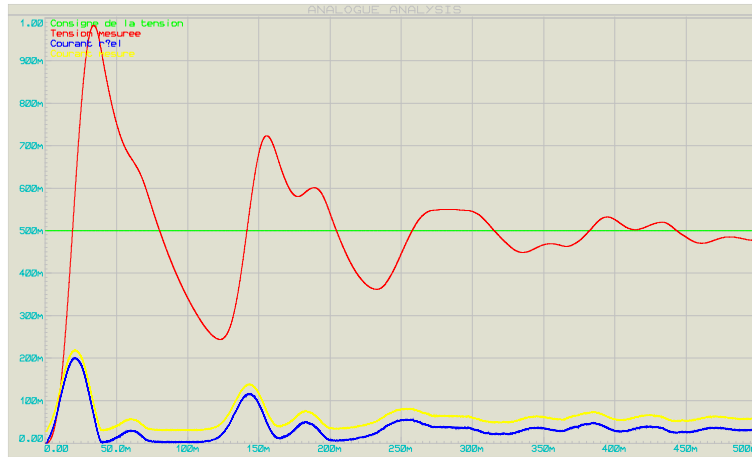


(b)

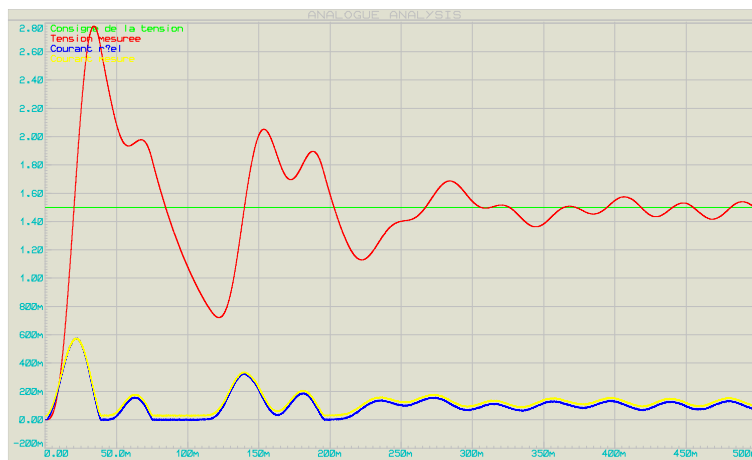


(c)

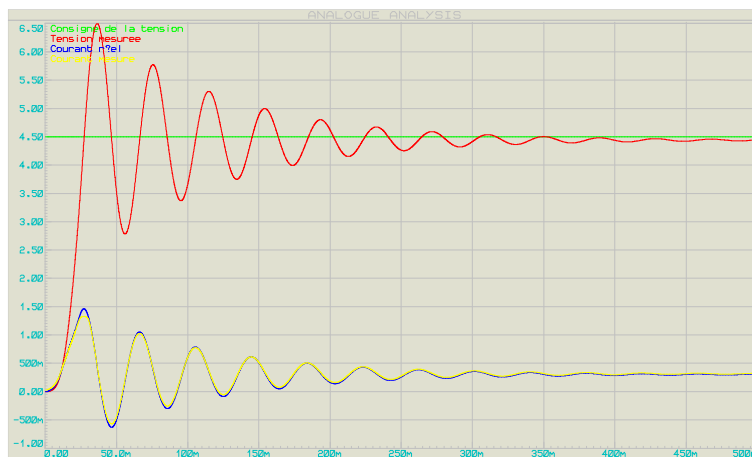
Figure. 3. 12 : Régulation PI pour $R = 75 \Omega$, $V_r = 10\%$ (a), 30% (b) et 70% (c)



(a)



(b)



(c)

Figure. 3. 13 : Régulation PI pour $R = 150\ \Omega$, $V_r = 10\%$ (a) , 30% (b) et 90% (c)

3. 5 Conclusion

Nous avons effectué dans ce Chapitre les simulations Matlab et Proteus de la commande PI du hacheur dévolteur. Les paramètres des régulateurs PI de la tension et du courant ont été adaptés en fonction des conditions considérées dans la simulation Matlab et la simulation Proteus. Les résultats illustrés montrent que les correcteurs de type PI disposent la capacité de maintenir en régime permanent la tension de charge à sa valeur de référence en dépit du changement de la charge (étude de robustesse) et du changement de la consigne (étude d'asservissement). Dans toutes les expériences de simulations Proteus, on n'a pas pu diminuer le premier dépassement de la réponse de tension. Ce phénomène peut être dû aux problèmes de calculs numériques des deux régulateurs PI. On a aussi remarqué que la charge influe fortement sur la réponse de la tension.

CHAPITRE 4 :

Validation Expérimentale

Résumé :

Pour évaluer pratiquement les performances de la commande PI du hacheur back, nous considérons dans ce Chapitre les détails de la réalisation de trois parties ; la partie alimentation, la partie commande et la partie puissance. L'algorithme de la commande PI est implémenté numériquement utilisant le pic16F877A. L'acquisition des données de sortie, la mise en marche de l'application et les résultats des essais pratiques sont effectués. Enfin, des commentaires sur les résultats expérimentaux trouvés sont également exprimés.

Sommaire du Chapitre :

- 4. 1 Introduction
- 4. 2 Conception logicielle
- 4. 3 Conception matérielle
- 4. 4 Résultats expérimentaux
- 4. 5 Application à la variation de vitesse du moteur DC
- 4. 6 Conclusion

4. 1 Introduction

Dans le cadre de notre projet, le hacheur dévolteur peut y avoir intervention d'un interrupteur commandé (transistor de puissance), c'est-à-dire qu'on diminuera la tension d'entrée à l'aide d'un circuit de puissance adapté qui sera développé plus tard dans ce chapitre. La plate-forme matérielle sur laquelle nous prévoyons de mettre en œuvre notre programme CCS est un système basé sur un microcontrôleur pic16F877A. Pour réaliser ce système, nous devons concevoir une interface de puissance isolée (utilisation d'un opto-coupleur) permettant de piloter la commande PI du hacheur back.

Dans ce chapitre, nous présentons une description succincte de la carte de commande réalisée. Puis, nous présentons les résultats obtenus lors de la validation expérimentale de la loi de commande PI développée. La commande à distance FM est aussi conçue pour varier la consigne de la tension. Comme indiqué dans l'introduction générale, nous allons essayer de mettre en évidence l'application pratique de ceux qu'ils présentent en simulations Matlab et Proteus dans le Chapitre 3. Nos essais ont été effectués au sein du laboratoire de département d'Electronique, Université Mohamed Boudiaf-Msila.

4. 2 Conception logicielle

Le système à concevoir comporte trois parties principales comme montrées dans la **Figure. 4. 1**. La partie alimentation prépare trois tensions continues +5V, +12V et +50V. A l'aide d'un potentiomètre et des mesures (feedback) du courant et de la tension de sortie, la partie commande pilote l'interface de puissance par un signal MLI. A partir d'une tension de +50V, la partie puissance alimente la charge pendant des instants ajustés par la commande PI.

Avant de présenter les détails de conception matérielle de notre projet, il est souhaitable d'élaborer quelques configurations utiles des modules du pic16F877A via le compilateur CCSPICC. Le code CCS de la commande PI que nous avons développé est présenté dans l'**Annexe B**.

4. 2. 1 Configuration du module LCD

Cette configuration mène à consommer 7 pins du pic16F877A pour obtenir un affichage de deux lignes avec 16 caractères du driver LCD16x2. Le port B du pic16F877A a été choisi pour ce genre d'affichage, mais ça n'empêche pas d'utiliser d'autres pins du microcontrôleur, puisque l'emplacement du driver LCD16x2 par rapport au pic16F877A dans la carte détermine pratiquement le bon choix des pins.

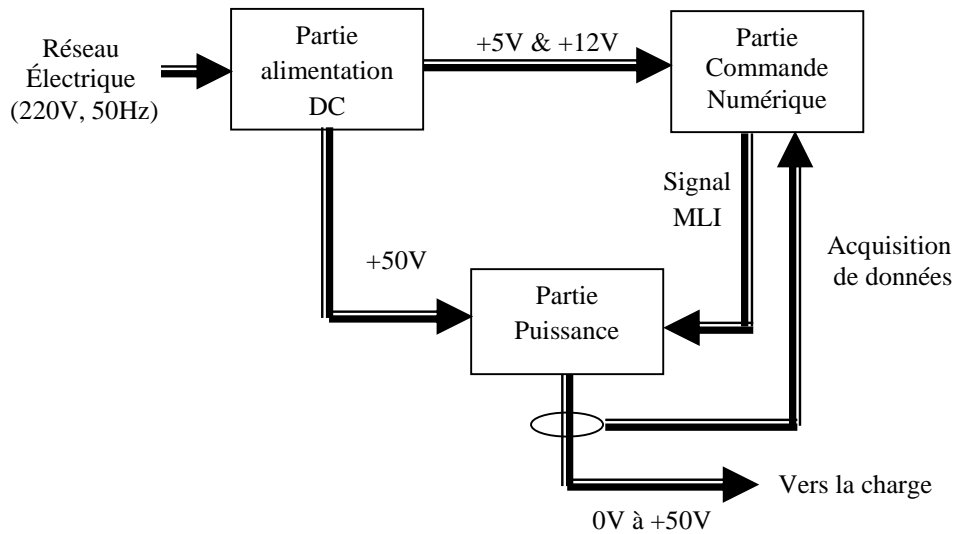


Figure. 4. 1 : Schéma fonctionnel de la commande du hacheur back

```
//LCD 16/2 configuration
#define LCD_ENABLE_PIN PIN_B4
#define LCD_RS_PIN PIN_B6
#define LCD_RW_PIN PIN_B5
#define LCD_DATA4 PIN_B3
#define LCD_DATA5 PIN_B2
#define LCD_DATA6 PIN_B1
#define LCD_DATA7 PIN_B0
```

4. 2. 2 Configuration du module ADC :

Le microcontrôleur pic16F877A dispose 8 canaux ADC (Analogue to Digital Convertir). Nous avons choit une résolution de 8 bits du module ADC, ce qui signifie que la valeur analogique après la conversion est stockée sous la forme d'un nombre de 8 bits qui varie entre 0 à 256. Les instructions suivantes configurent les pins 'AN0' 'AN1' et 'AN2' comme des entrées analogiques ; la cosigne de la tension (V_r), la tension mesurée (V_m) et le courant mesuré (I_m) respectivement.

```
#device ADC=8
setup_adc_ports (AN0_AN1_AN3);
setup_adc (ADC_CLOCK_DIV_2);
```

4. 2. 3 Configuration du module Timer2 (signal MLI)

Le microcontrôleur PIC16F877A contient deux modules CCP. A travers de ces modules, nous pouvons générer deux signaux MLI (PWM1 est lié à CCP1 et PWM2 est lié à CCP2). La configuration du timer2 du pic16F877A est utilisée pour fixer la période du signal MLI. Pour une fréquence du Crystal de 20MH, cette configuration est la suivante :

```
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,249,1);
//50.0 us overflow, 50.0 us interrupt
enable_interrupts(INT_TIMER2);
enable_interrupts(GLOBAL);
setup_ccp1(CCP_PWM);
set_pwm1_duty(0);
```

Avec les paramètres ci-dessus, la fréquence du signal MLI devient,

$$f_{MLI} = \frac{20.1000}{4(249 + 1)} = 20 \text{ kHz} \quad (4.1)$$

2. 4. 4 Configuration du module Timer0 (temps d'échantillonnage)

La mise à jour de la commande MLI est effectuée par l'interruption interne 'RTTC' qui calcule le temps d'échantillonnage. Nous avons configuré le timer0 à 409 μs puisque le temps de calcul du correcteur PI prend 200 μs . Cette dernière a été trouvé par l'application 'stopwatch' du logiciel MPLAB.

```
setup_timer_0 (RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_8|RTCC_8_bit);
//409 us overflow
Enable interrupts (INT_RTCC);
```

Avec les paramètres ci-dessus, la période d'échantillonnage est par l'équation suivante :

$$T_e = \frac{4.8.256}{20} = 409.6 \mu s \quad (4.2)$$

La **Figure. 4. 2** éclaire le temps de calcul du rapport cyclique, la période de découpage du signal MLI et le temps d'échantillonnage, T_e .

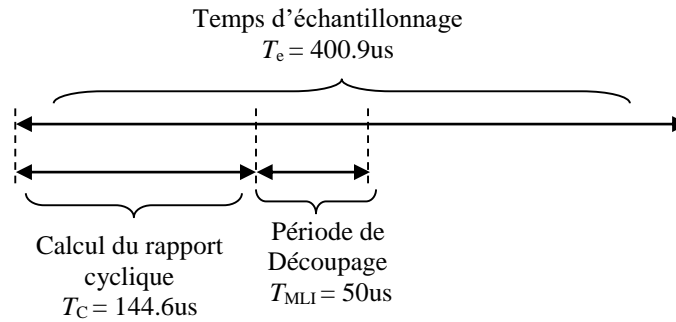


Figure. 4. 2 : Les temps utilisés dans la commande PI

2. 4. 5 Calcul de la tension de référence

C'est la valeur de la consigne de la tension de commande souhaitée que nous mettons dans le programme CCS. Le pin 'AN0' reçoit une tension entre 0 et 5V et un coefficient de 50/256 est dédié pour adapter la consigne entre 0 et 50V. A cet effet, on a établi la configuration suivante :

```
set_adc_channel(0); //Acquisition de la tension de référence
delay_us(10);
Vr = 0.1953*read_adc(); //0.1953=50/256
```

4. 2. 6 Mesure de la tension et du courant de charge

L'acquisition des valeurs de la tension et du courant du récepteur est très importante pour effectuer le processus de correction PI. Les pins 'AN1' et 'AN3' reçoivent également des tensions entre 0 et 5V. Un coefficient de 50/256 et la formule (3.5) donnée dans le Chapitre 3 sont dédiées pour mesurer la tension et le courant réelles respectivement.

```
set_adc_channel(1); //Acquisition de tension mesurée
delay_us(10);
Vm = 0.1953*read_adc();
set_adc_channel(3); //Acquisition du courant mesuré
delay_us(10);
Im = 0.8*(0.018*read_adc()-2.3148); //Im=(v0-vref)R2/(R1*Rsh) où
R2=32k, R1=1k et Rsh=0.0625
```

4. 3 Conception matérielle

Dans ce projet, nous avons réalisé une seule carte qui réunit les trois parties montrées dans la **Figure. 4. 1**. En commençant par la liste des composants, les détails de conception matérielle de l'ensemble des parties sont présentés par la suite.

4. 3. 1 Listes des composants

La liste des composants que nous avons utilisés pour cette réalisation est donnée par la **Table. 4. 1**. Ensuite, on va présenter le routage de la carte sous ARES toujours à l'aide du logiciel Proteus.

4. 3. 2 Typo de la carte

Nous avons choisi une largeur de pistes de 30th pour le circuit de commande et une largeur de 50th pour le circuit de puissance, ce qui est notamment suffisant pour notre courant qui est au maximum de 1A. Nous avons aussi dû augmenter le diamètre des pastilles pour les diodes et les résistances car celles de Proteus n'étaient pas assez grosses, donc nous avons créé un nouveau package en plus de celui qui existé déjà dans la librairie Proteus. La présente réalisation possède deux modes de commande ; Commande par une référence analogique (potentiomètre) et commande par une référence numérique (Récepteur FM).

Le circuit électrique préparé pour le routage ARES (voir **Figure. 4. 4**) est schématisé dans la **Figure. 4. 3**. La face en bas de typo est montrée par la **Figure. 4. 5**. La carte finale réalisée ainsi que la description de quelques composants est donnée par la **Figure. 4. 6**.

4. 3. 3 Description des parties de la carte

Dans cette section, nous allons élaborer quelques clarifications des sous circuits utilisés dans notre carte.

(i) Alimentations

Nous avons installé premièrement une alimentation électrique stable pour le pic16F877A de +5V et l'opto-coupleur de +12V. C'est pour cela que nous avons utilisé deux types de régulateurs de tension 'L7805' et 'L7812' dans les montages montrés par la **Figure. 4. 8**. Un transformateur à double sorties isolées de 9VAC, et 17 VAC est utilisé pour alimenter les régulateurs de tensions ci-dessus. Deux autres transformateurs sont branchés en séries pour augmenter la tension vers 50VAC, 2A (voir **Figure. 4. 7**). La **Figure. 4. 9** est conçue via un redresseur double alternance et un condensateur de haute capacité (800uF) pour obtenir une alimentation de +50V à l'entrée du hacheur back.

Table. 4. 1 Liste des composants de la carte de commande en boucle fermée.

Ordre	Composant	Référence	Quantité	Observation
01	Microcontrôleur	Pic16F877A	01	
02	Crystal	20MHz	01	
03	Condensateur	22pF	02	Céramique
04	Afficheur LCD	16x2	01	
06	Potentiomètre	20K Ω	02	
07	Bouton poussoir	NO	02	
08	Resistance	4.7k Ω	02	
09	Potentiomètre	10K Ω	01	
10	Régulateur de tension	N7805	01	
11	Régulateur de tension	N7805	01	
12	Condensateur	470uF, 16V	04	Chimique
13	Resistance	1k Ω	10	
14	Connecteur	T-block04	01	
15	Connecteur	SIL05	01	
16	Connecteur	T-block02	02	
17	Récepteur FM	FS1000A, 433MHz	01	
18	Opto-coupleur	4N37	01	
19	Transistor	IRF740, 10A	01	
20	Condensateur	470uF/50V	02	Chimique
21	Diode de puissance	1N4148	03	
22	Ampli-op	LM358	01	
23	Résistance shunt	0.27 Ω	04	
24	Résistance	1K Ω	06	
25	Résistance	32K Ω	02	
26	Résistance	2.2k Ω	02	
27	Résistance	1.2k Ω	02	
28	Résistance	100 Ω	01	
29	Résistance	100k Ω	01	
30	Résistance	9M Ω	01	
31	Inductance	102mH	01	
32	Pont de diodes	10A	01	
33	Led	Rouge	04	

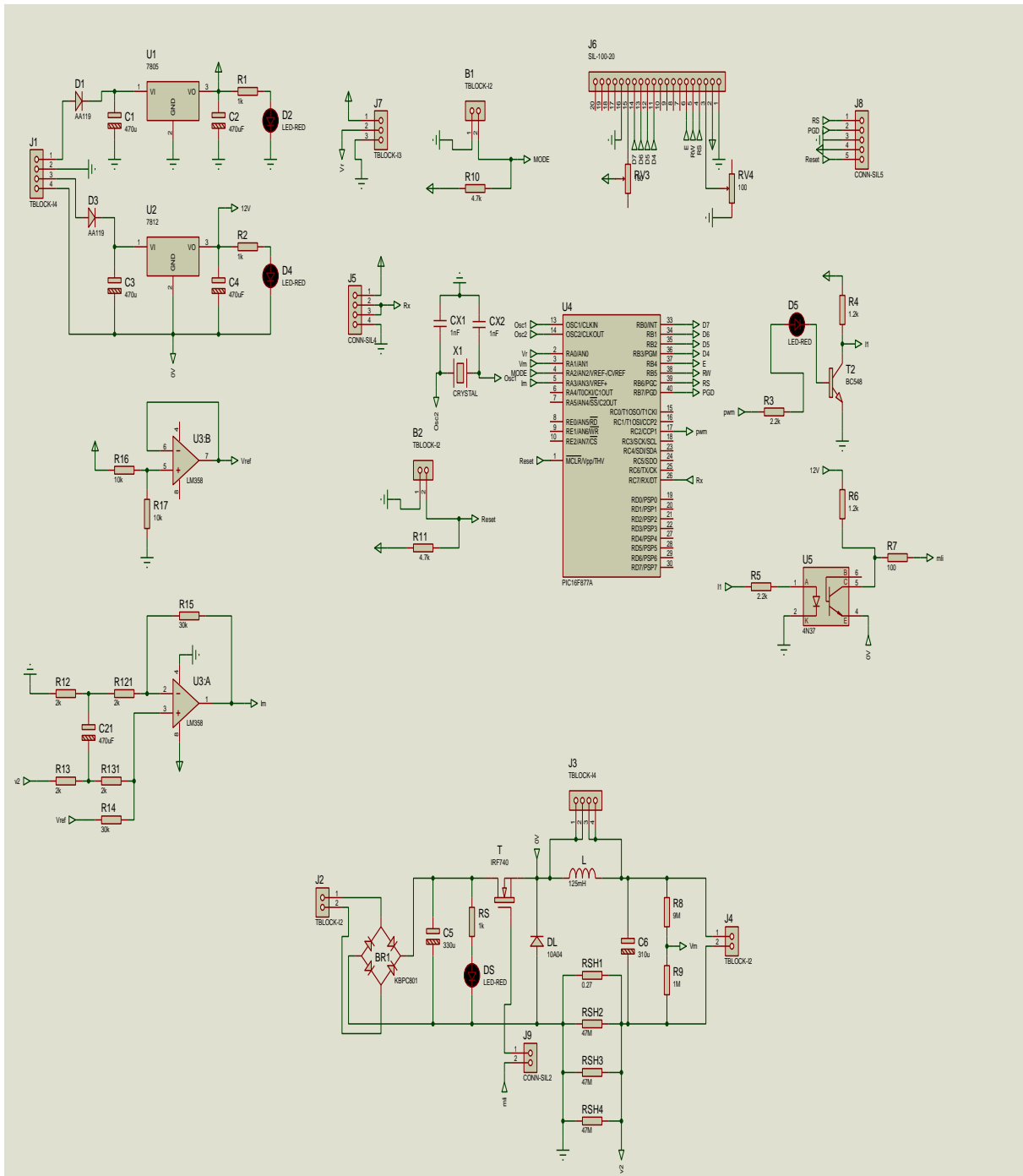


Figure. 4. 3 : Circuit électrique conçu à partir de la liste des composants.

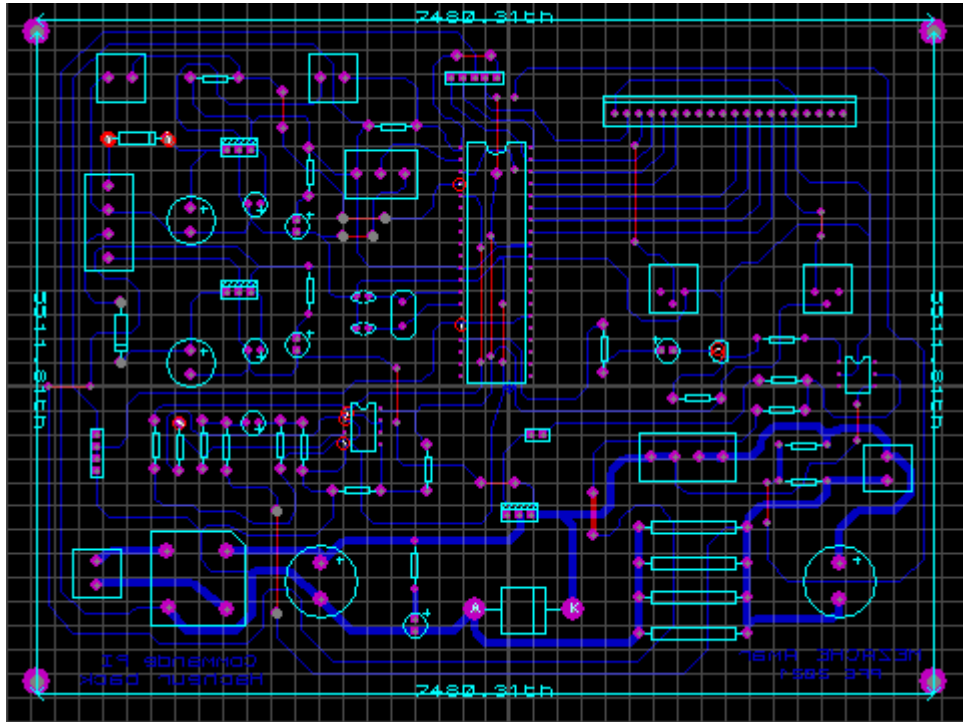


Figure 4. 4 : Circuit routage (typo de la carte).

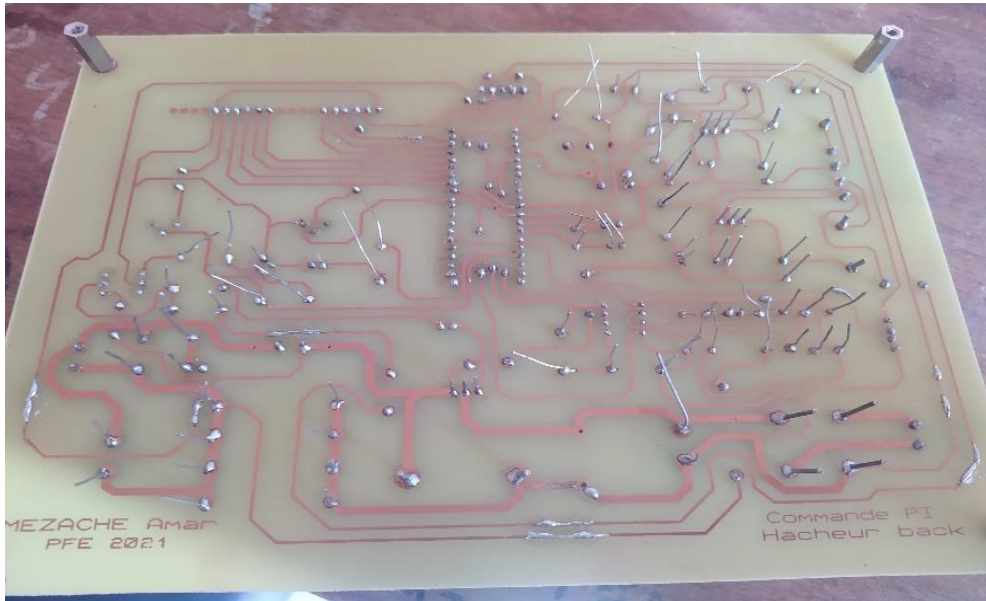


Figure. 4. 5 : Face de pistes en cuivre en bas de la carte (Bottom copper)

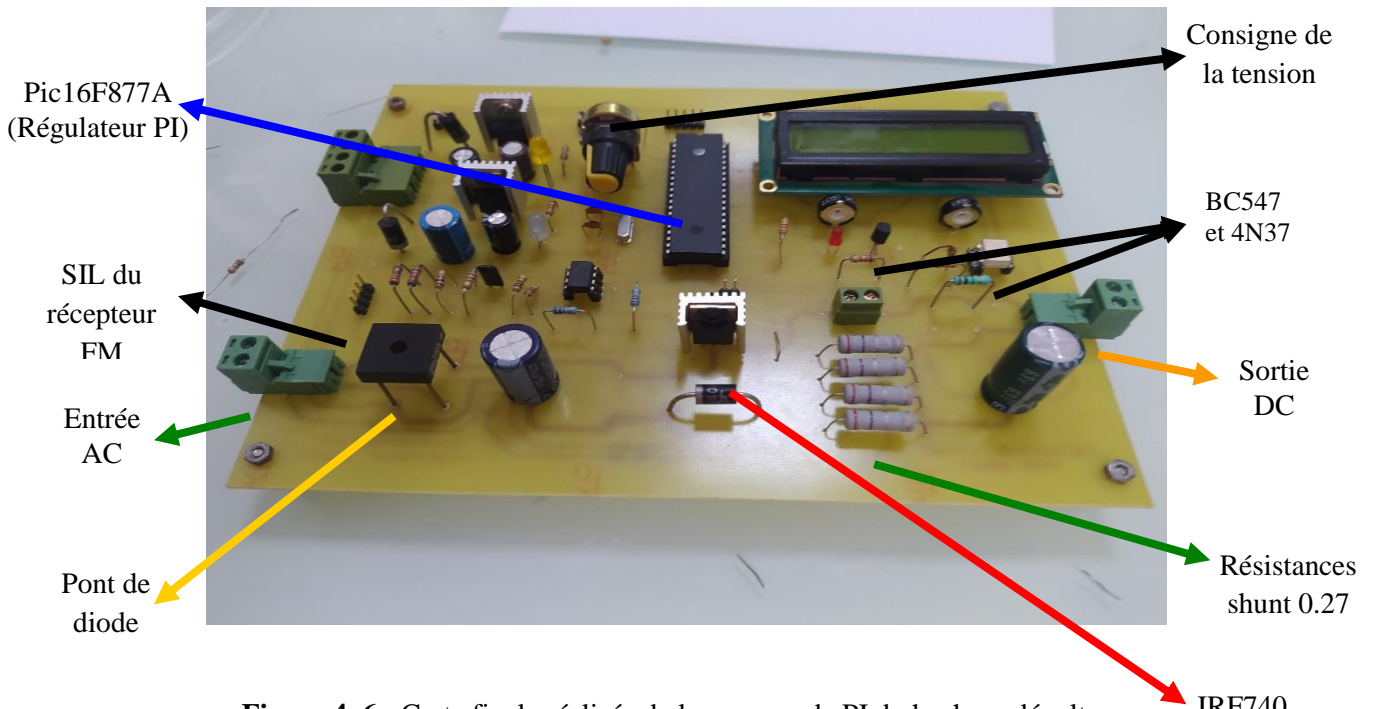


Figure 4. 6 : Carte finale réalisée de la commande PI du hacheur dévolteur.

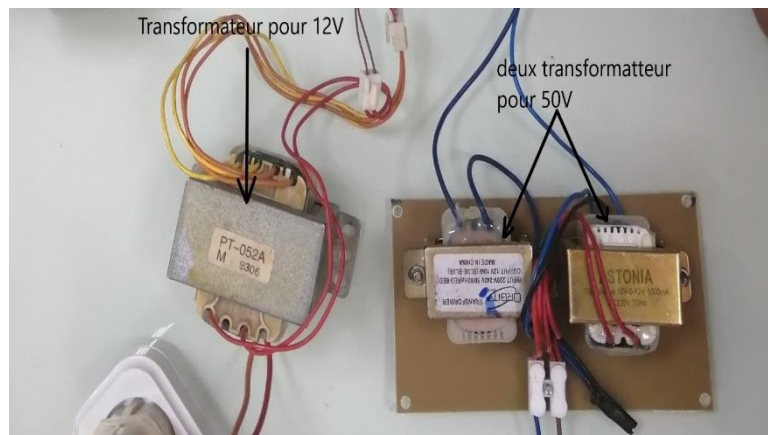


Figure. 4. 7 : Transformateurs d'alimentation.

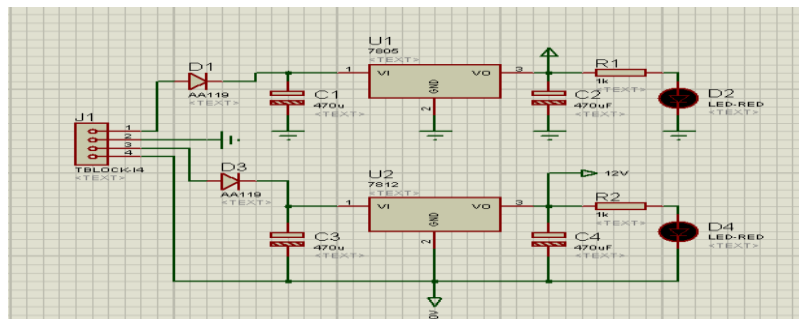


Figure. 4. 8 : Montage de l'alimentation du pic16F877A (+5V) et l'opto-coupleur (+12V).

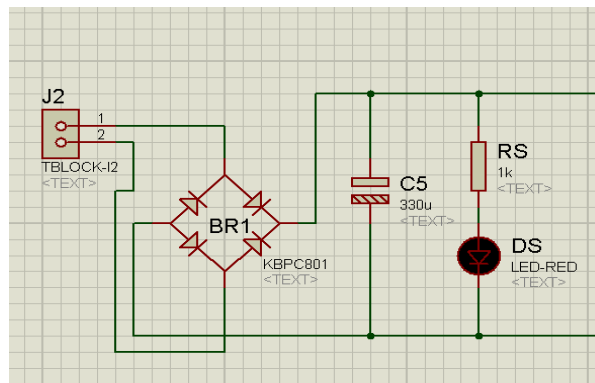


Figure. 4. 9 : Montage de l'alimentation du hacheur dévolteur +50V.

(ii) Isolation optique

Nous avons utilisé dans notre carte un transistor BC547 et un opto-coupleur 4N37 pour inverser deux fois le signal MLI et obtenir une isolation optique du circuit de commande et du circuit hacheur dévolteur (voir **Figure 4. 10**). Cette isolation a deux objectifs ; le premier est de protéger la partie commande et le deuxième est de séparer le point de masse de la commande MLI (la source du transistor MODFET IRF740) par rapport au point commun des mesures est des signaux entrées/sorties du pic16877A.

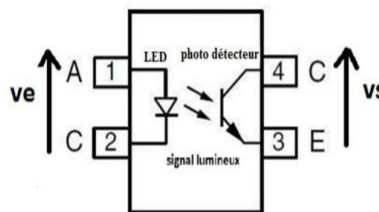
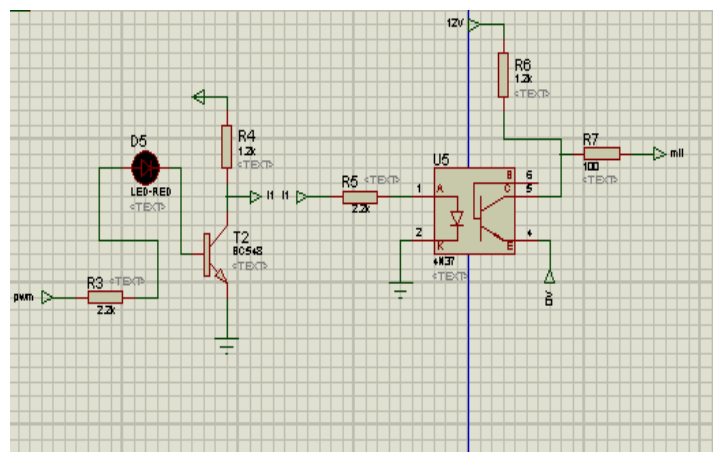


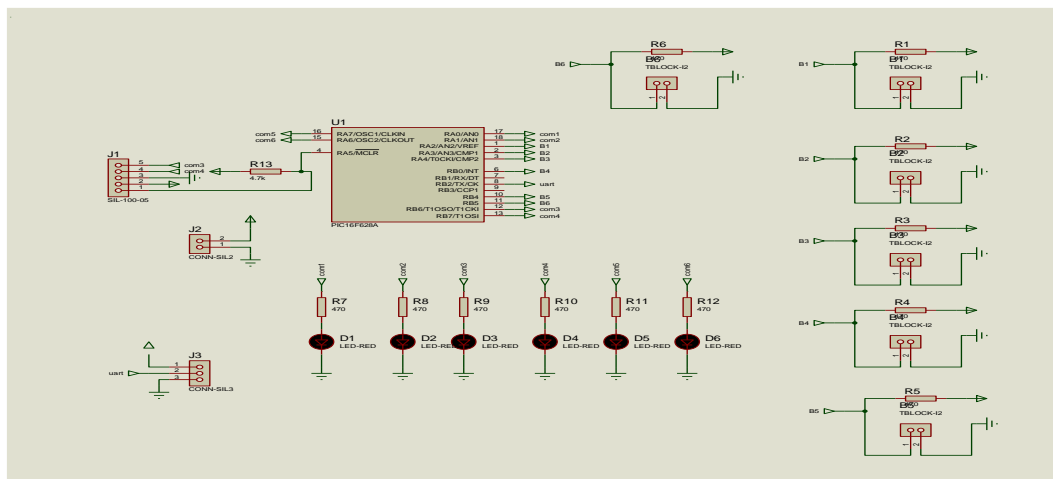
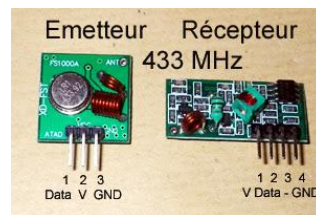
Figure. 4. 10 : Brochage de l'opto-coupleur 4N37.

(iii) Commande radio FM

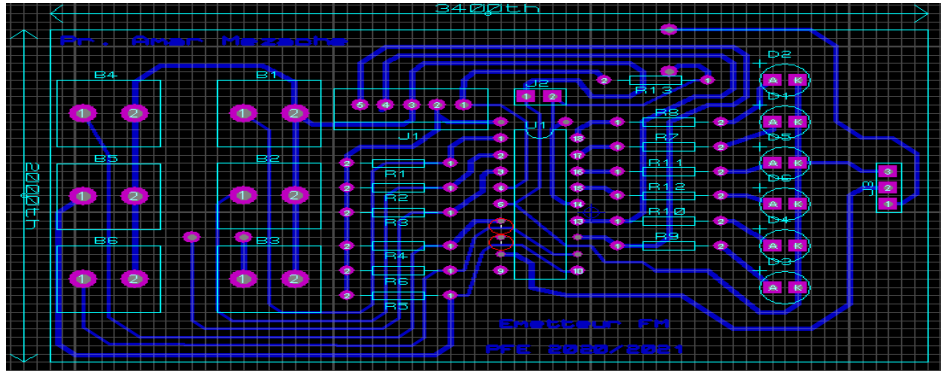
Ce système de transmission radioélectrique se compose de deux parties, un émetteur et un récepteur FM 433MHz de référence 'FS1000A'. Le signal porteuse est un signal HF numérique de fréquence 433 MHz et le signal BF à transmettre est un code spécifique UART à 8 bits. Le pin 'Tx' du pic16F628A est utilisé dans le circuit émetteur qui interprète les entrées numérique (actions des positions de deux boutons poussoirs) sous forme d'un code UART bien défini. Nous avons choisi les codes hexadécimaux '0x43' et '0x52' pour augmenter et diminuer numériquement la consigne. Nos codes CCS pour l'émission et la réception FM sont délivrés dans l'Annexe C. La **Figure. 4. 11** donne le schéma réalisé du circuit émetteur FM. Le récepteur est conçu sur la carte de notre de commande comme mentionné dans la **Figure. 4. 6**.

(iv) La charge

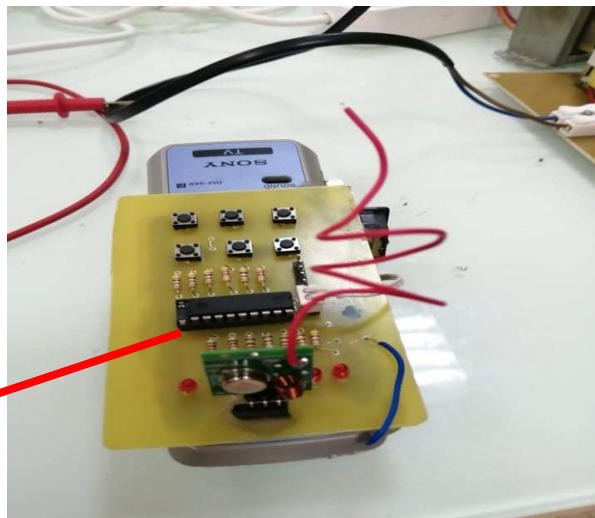
Le circuit hacheur dévolteur débite la puissance électrique DC dans un récepteur de type résistive, $R=50, 75$ et 150Ω (voir la **Figure. 4. 12**). Nous avons aussi exploité notre montage comme un variateur de vitesse du moteur DC 35V. A cet effet, on a joué sur la consigne pour faire entrainé un moteur DC par des vitesses variables (changement du potentiomètre ou la commande FM).



(a)

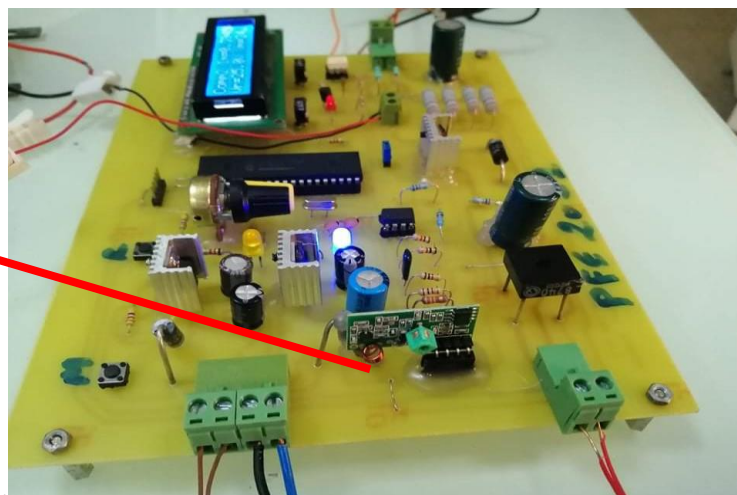


(b)



Emetteur FM

(c)



Récepteur FM

(d)

Figure. 4. 11 : Le circuit électrique (a), le circuit routage (b), le circuit émetteur FM réalisé (c) et le récepteur FM monté sur notre carte de commande PI.

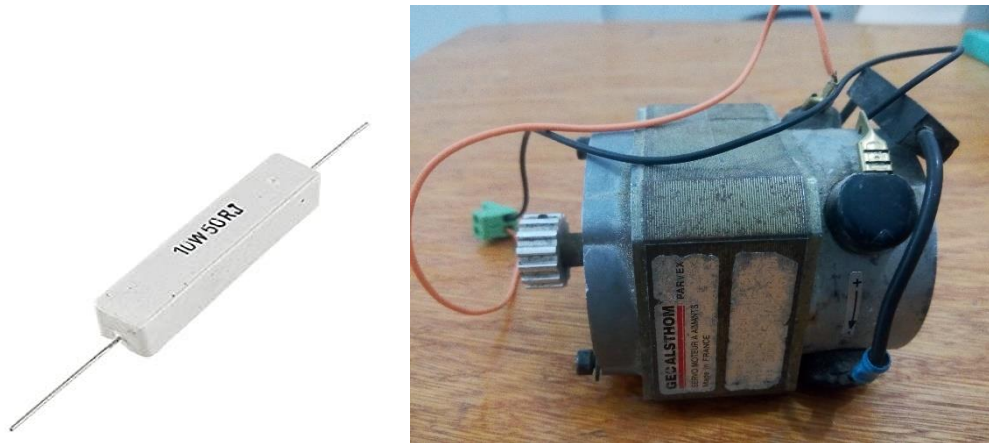


Figure. 4. 12 : Résistance céramique et le moteur DC 35V.

(v) *Filtre*

La **Figure 4. 13** montre deux inductances montées en série de valeur 102mH du filtre de sortie LC. On a fait cette astuce puisque on n'a pas trouvé une inductance de 125mH comme dimensionner dans le Chapitre 1.

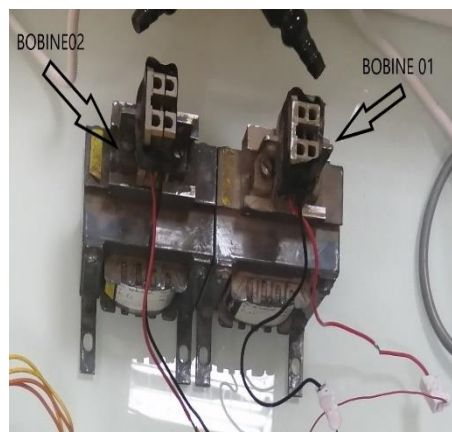


Figure. 4. 13 : Les deux bobines montées en série de 102mH du filtre LC.

4. 4 Résultats expérimentaux

Dans cette section, nous avons fait en marche notre carte de commande PI du hacheur dévolteur. Les paramètres du régulateur PI de tension et du régulateur PI de courant sont montrés par la **Table. 4. 2**. Le signal à l'entrée du hacheur back avant et après le redressement est visualisé par la **Figure. 4. 14**. On remarque que le signal alternatif contient des harmoniques et le signal redressé possède une forme stable. Par la suite, nous discuterons l'efficacité de la régulation PI à partir des résultats obtenus dans ce projet avec différentes valeurs d'une charge de résistive.

Table. 4. 2 : Paramètres des correcteurs PI

Régulateur PI	Paramètre	Théorique Matlab	Pratique
Tension	K_p	2	0.1
	K_i	10	0.001
Courant	K_p	5	0.2
	K_i	200	0.0015



Figure. 4. 14 : Signal d'entrée du hacheur back avant et après le redressement.

(i) Cas d'une charge $R = 50\Omega$

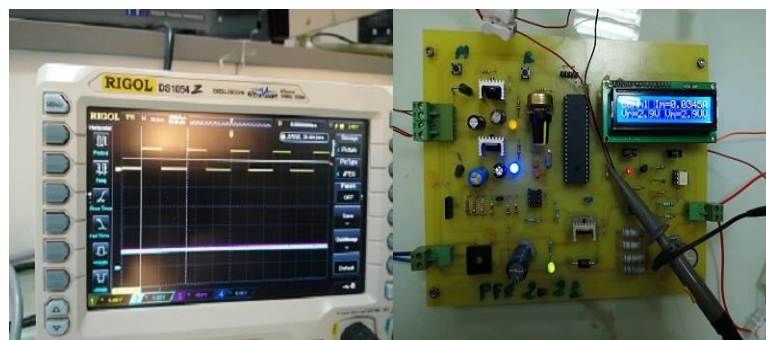
Cette première étude concerne en premier temps la régulation de la tension de sortie à une petite valeur de 2.9V aux bornes d'une charge, $R = 50\Omega$. La **Figure. 4. 15** illustre les formes d'ondes en régime permanent de la tension mesurée et la tension de référence. Il est bien noté que ces grandeurs sont complètement confondues. La forme adaptée du signal MLI est aussi montrée dans cette figure. Lors des mesures, on a remarqué que le temps de réponse est un peu lent puisque, nous avons utilisé un pic16F877A qui possède un temps d'échantillonnage de 0.4ms. La **Figure. 4. 16** délivre les formes d'ondes des grandeurs mesurées. La tension de consigne était fixée à 12.3V. Le contrôle de la tension de sortie est également remarquable. En augmentant maintenant la consigne de la tension de 18.7V et 34.5V dont les signaux mesurés par l'oscilloscope sont montrés par les **Figures. 4. 17** et **4. 18**. Dans cette expérience, on a obtenu une petite erreur statique en régime permanent entre la tension de sortie et la tension de consigne. Ceci peut être dû au manque de puissance délivrée par les deux transformateurs.

(ii) Cas d'une charge $R = 75\Omega$

Pour tester encore l'efficacité de notre commande PI implémentée pour une charge de 75Ω , nous avons effectué les mêmes mesures que précédemment. Pour des petites valeurs de la tension de référence ($V_r = 6.8V$ et $18.7V$) de consigne, la commande est vraiment acceptable comme montrés dans les **Figures. 4. 19** et **4. 20**. Les **Figures. 4. 21** et **4. 22** montrent une petite différence entre les signaux de consigne et de sortie du hacheur dévolteur pour $V_r = 29.6V$ et $34.5V$. Nous avons effectué plusieurs changements des paramètres des régulateurs mais ce genre de problème persiste. Ceci est probablement dû à la saturation des calculs des correcteur PI (signal MLI).

(iii) Cas d'une charge $R = 150\Omega$

Pour une charge élevée, $R = 150\Omega$, les **Figures. 4. 23** et **4. 24** visualisent le train d'impulsion du signal de commande MLI et les signaux des tensions du circuit hacheur back. Nous avons observé les mêmes constatations que pour les cas de $R = 50\Omega$ et $R = 75\Omega$. La différence entre la consigne et la grandeur à commandée est montrée par les **Figures. 4. 25** et **4. 26**. Cette anomalie peut être due à la caractéristique non-linéaire de l'ensemble du convertisseur DC/DC. Dans les expériences ci-dessus, l'afficheur LCD affiche 3 valeurs réelles ; le courant mesuré, la tension de consigne et la tension mesurée aux bornes de la charge. Après chaque réglage, on a observé dans l'afficheur LCD que les deux dernières sont toujours identiques pour quelques soient la valeur de la tension de référence entre (0V et 35V).



Signal MLI

Tensions de sortie et consigne

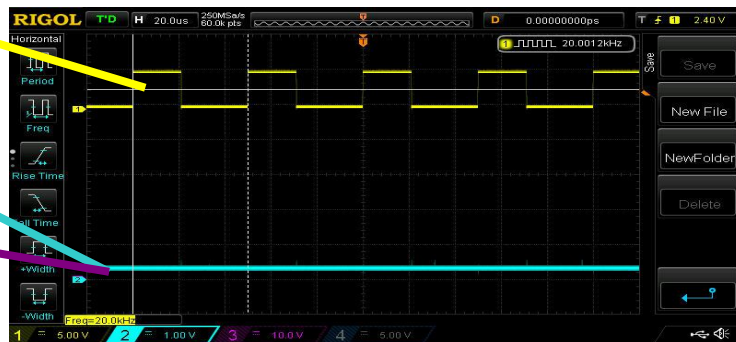
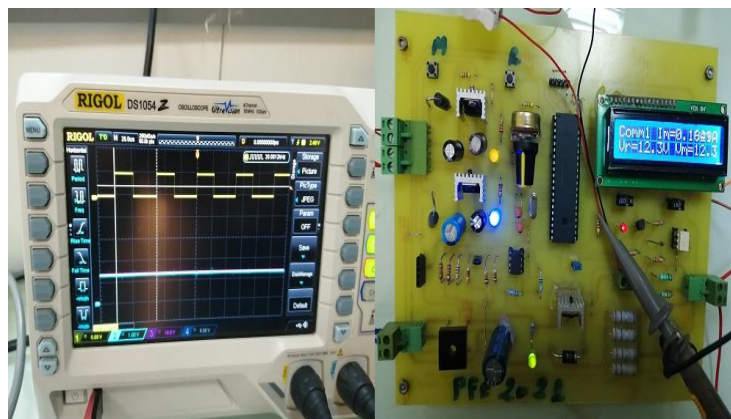


Figure. 4. 15 : Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 50\Omega$ et $V_r = 2.9V$.



Signal MLI

Tensions de sortie et consigne

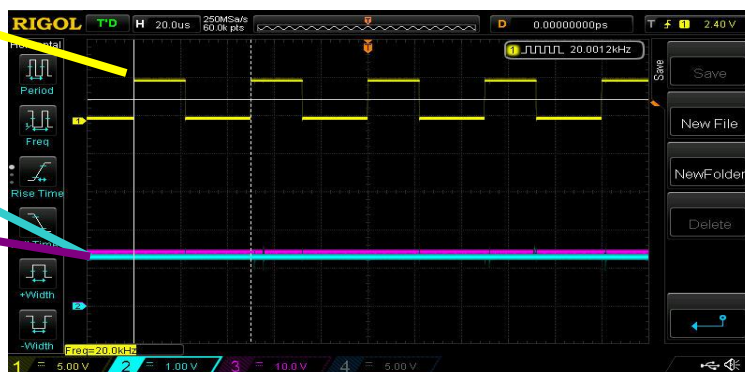


Figure. 4. 16 : Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 50\Omega$ et $V_r = 12.3V$.

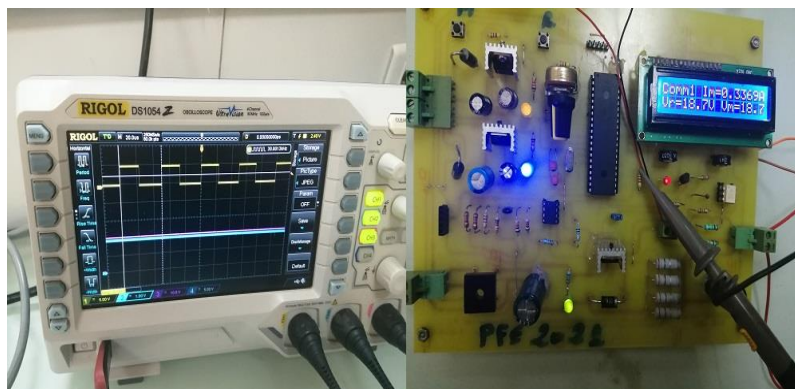




Figure. 4. 17 : Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 50\Omega$ et $V_r = 18.7V$.

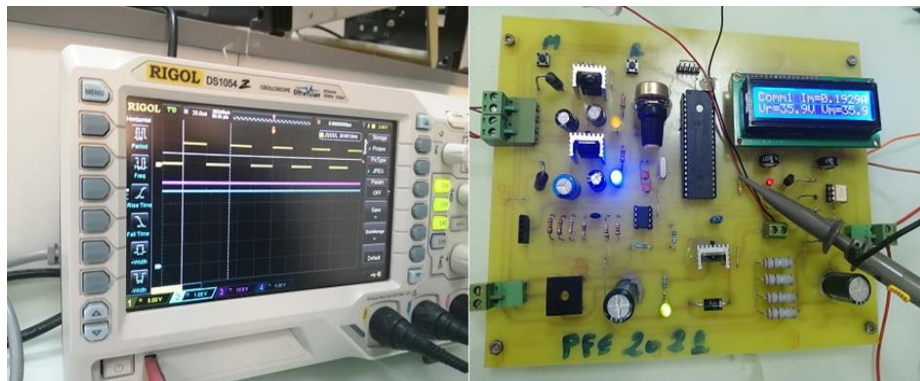


Figure. 4. 18 : Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 50\Omega$ et $V_r = 34.5V$.





Figure. 4. 19 : Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 75\Omega$ et $V_r = 6.8V$.

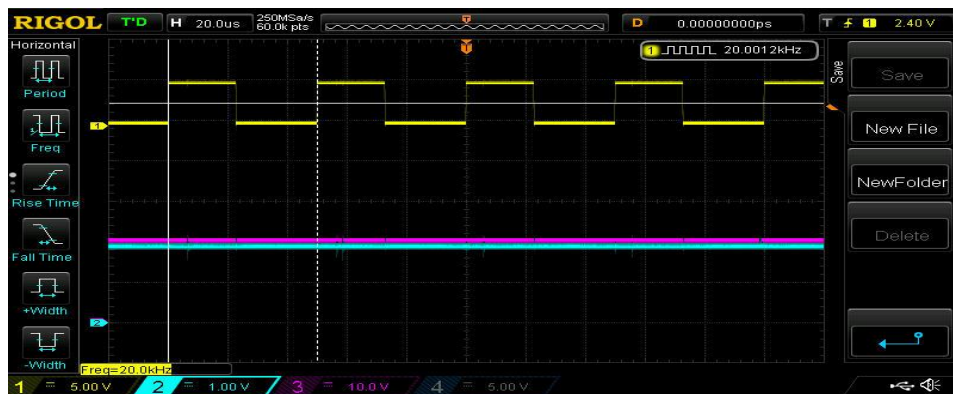
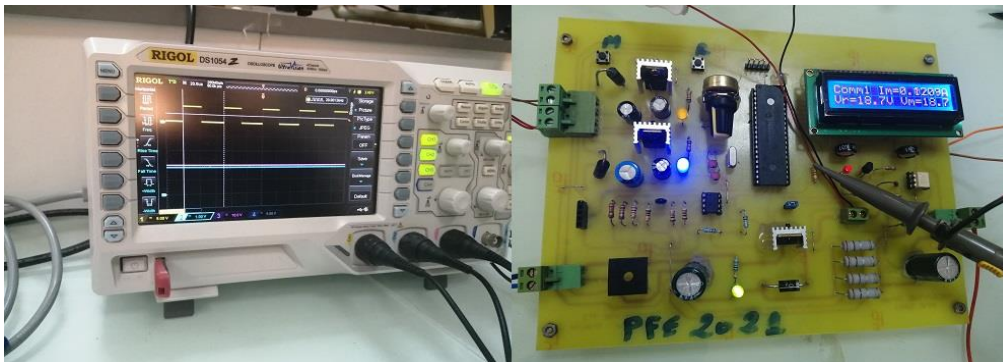
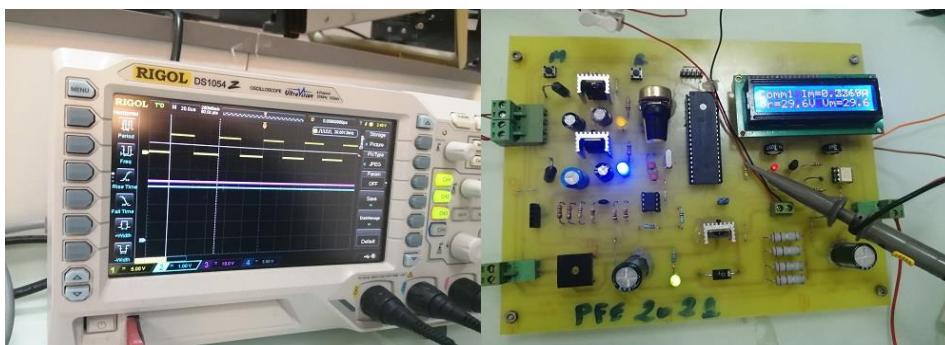


Figure. 4. 20 : Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 75\Omega$ et $V_r = 18.7V$.



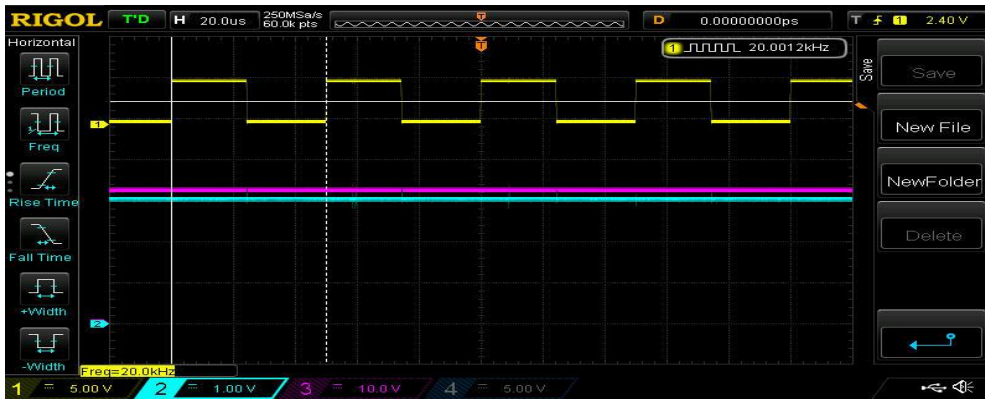


Figure 4. 21: Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 75\Omega$ et $V_r = 29.6V$.



Figure 4. 22: Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 75\Omega$ et $V_r = 34.5V$.

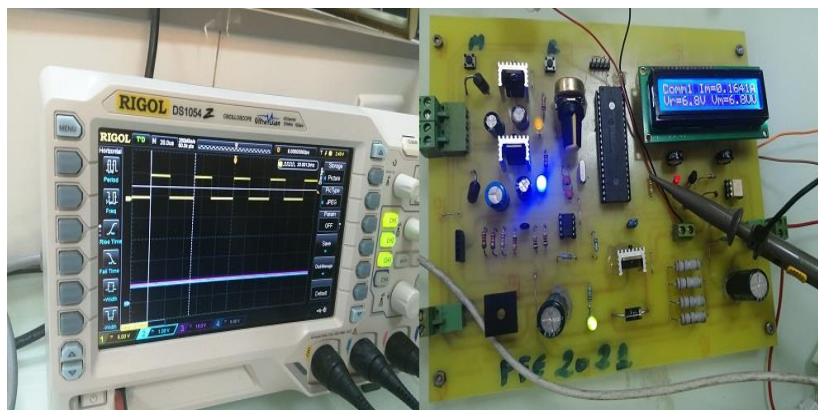




Figure 4. 23: Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 150\Omega$ et $V_r = 6.8V$.

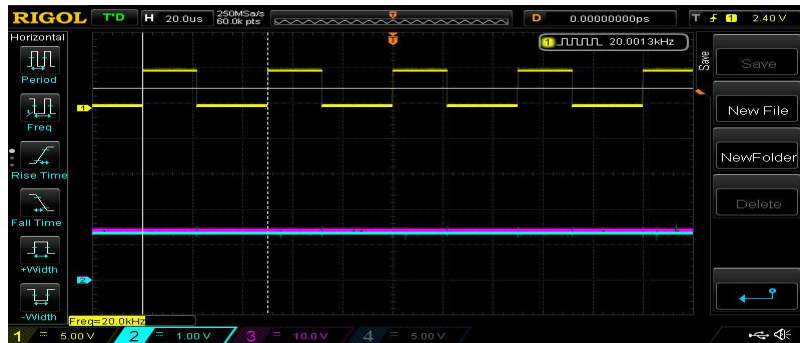
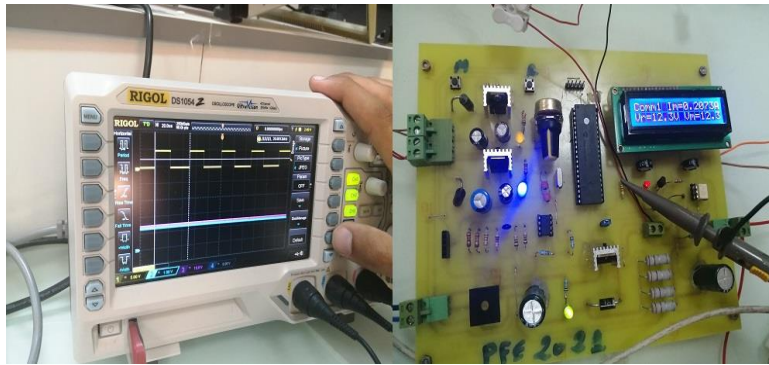
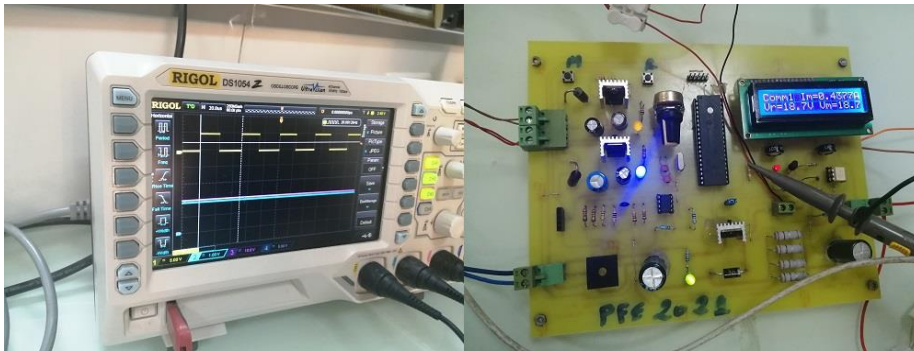


Figure 4. 24: Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 150\Omega$ et $V_r = 12.3V$.



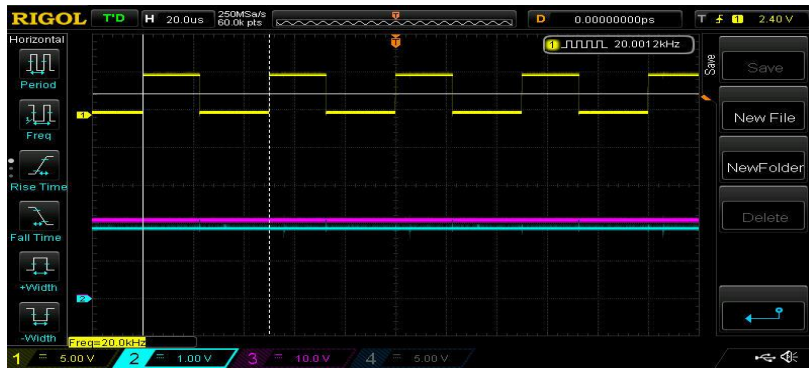


Figure 4. 25: Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 150\Omega$ et $V_r = 18.7V$.

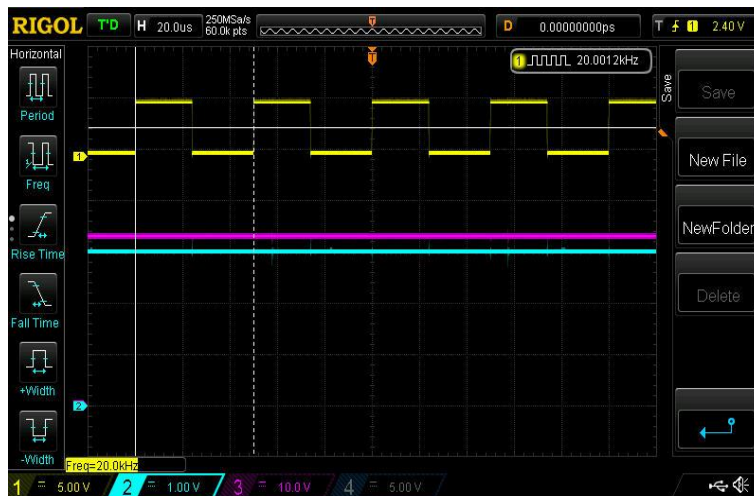


Figure 4. 26: Signaux de la tension de sortie et la commande MLI pour $R = 150\Omega$ et $V_r = 29.6V$.

4. 5 Application à la variation de vitesse du moteur DC

Le montage réalisé est testé comme un variateur de vitesse en boucle ouverte du moteur DC (Figure. 4. 27). Il suffit seulement de changer la consigne de la tension qui mène à changer immédiatement la tension aux bornes du moteur. On peut alors augmenter et abaisser la vitesse où le courant mesuré du moteur est affiché par le driver LCD.



Figure 4. 27: Variateur de vitesse du moteur DC

4. 6 Conclusion

Dans ce Chapitre, nous avons présenté les deux parties essentielles pour la conception de notre carte de commande PI du hacheur dévolteur à savoir la partie logicielle dédiée par le développement du code CCS PIC et la partie matérielle dédiée par l'utilisation du pic16F877A. Les étapes de conception des différents circuits par le logiciel Proteus sont bien expliquées. La régulation PI cascadée qui utilise deux boucles de correction PI imbriquées de la tension et du courant de sortie a été effectuée avec succès. La conformité des signaux expérimentaux par rapport aux signaux de simulation Proteus et Matlab a été remarquée. Enfin, on peut conclure que la légère différence entre la grandeur de commande et la grandeur à commander est vraisemblablement due aux erreurs de mesures par l'oscilloscope puisque l'afficheur LCD offre toujours des valeurs semblables des deux tensions.

Conclusion Générale :

Notre travail a porté sur la modélisation et la commande du convertisseur DC-DC nommé hacheur dévolteur par la commande PI en tension et en courant cascades. Le modèle moyen permet d'avoir une expression analytique linéaire que peut présenter le convertisseur. Nous avons implanté et validé expérimentalement la stratégie de commande PI. Cette loi de commande a montré son efficacité sous différentes valeurs de la charge (résistive ou moteur DC). Elle assure aussi la stabilité du système avec des performances acceptables au niveau du temps de réponse et dépassement. Les parties suivantes ont été réalisées dans ce travail :

Dans la première partie de notre travail, nous avons abordé en premier lieu quelques notions de base et le principe de fonctionnement de quelques types des hacheurs. En ce qui concerne les dimensionnements des processus de filtrage et de réglage, nous avons concentré sur le hacheur dévolteur puisque notre sujet du mémoire aborde sa réalisation pratique de la commande PI à base des microcontrôleurs. Les modèles mathématiques qui relient la tension de sortie, le courant de la bobine et le rapport cyclique sont données qui possèdent des fonctions de transferts du premier et de deuxième ordre. L'architecture de la commande PI cascade est aussi présentée à la fin de ce Chapitre.

Dans la deuxième partie de notre travail, nous avons abordé quelques notions et caractéristiques de la régulation des systèmes statiques et dynamiques. Quelques définitions et principes de fonctionnement de la régulation PI a été exposées. En plus, le dimensionnement de la régulation PI cascade du hacheur back présenté dans le Chapitre 1 est également adopté utilisant des méthodes pour des systèmes de premier ordre et de deuxième ordre. Puis, nous avons mis en évidence les architectures interne et externe du pic16F877A et ses caractéristique et cela tout en mettant en relief les différentes actions et les structures de ce dernier. Dans le Chapitre suivant, nous allons discuter les résultats de simulations Matlab et Proteus destinées pour la régulation PI en boucle fermée du hacheur survolteur.

Nous avons effectué dans la troisième partie de notre travail, les simulations Matlab et Proteus de la commande PI du hacheur dévolteur. Les paramètres des régulateurs PI de la tension et du courant ont été adaptés en fonction des conditions considérées dans la simulation Matlab et la simulation Proteus. Les résultats illustrés montrent que les correcteurs de type PI disposent la capacité de maintenir en régime permanent la tension de charge à sa valeur de référence en dépit du changement de la charge (étude de robustesse) et du changement de la

consigne (étude d'asservissement). Dans toutes les expériences de simulations Proteus, on n'a pas pu diminuer le premier dépassement de la réponse de tension. Ce phénomène peut être dû aux problèmes de calculs numériques des deux régulateurs PI. On a aussi remarqué que la charge influe fortement sur la réponse de la tension.

Dans la quatrième partie de notre travail, nous avons présenté les deux parties essentielles pour la conception de notre carte de commande PI du hacheur dévolteur à savoir la partie logicielle dédiée par le développement du code CCS PIC et la partie matérielle dédiée par l'utilisation du pic16F877A. Les étapes de conception des différents circuits par le logiciel Proteus sont bien expliquées. La régulation PI cascadée qui utilise deux boucles de correction PI imbriquées de la tension et du courant de sortie a été effectuée avec succès. La conformité des signaux expérimentaux par rapport aux signaux de simulation Proteus et Matlab a été remarquée. Enfin, on peut conclure que la légère différence entre la grandeur de commande et la grandeur à commander est vraisemblablement due aux erreurs de mesures par l'oscilloscope puisque l'afficheur LCD offre toujours des valeurs semblables des deux tensions.

Comme perspectives, on propose les travaux suivants dans le futur :

- Puisque la valeur de la résistance de la charge influe sur la réponse du convertisseur, l'utilisation des correcteurs de type PI autoréglage est souhaitable.
- L'implémentation de la commande floue peut améliorer en plus les performances.
- Pour remédier le problème du temps de calcul, il est souhaitable de considérer la réalisation du hacheur dévolteur au moyen d'un pic18F4550. Ce dernier possède une fréquence de 48MHz d'horloge au lieu 20MHz.

Annexe A

Code CCSPICC pour la commande en courant PI cascadée du hacheur back :

```
#include <16F877A.h>
#device ADC=8

#FUSES NOWDT           //No Watch Dog Timer
#FUSES NOBROWNOUT     //No brownout reset
#FUSES NOLVP          //No low voltage prgming, B3(PIC16) or B5(PIC18) used for I/O
#use delay(crystal=20MHz)
#use rs232(baud=2400,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8,stream=PORT1)
//LCD 16/2 configuration
#define LCD_ENABLE_PIN PIN_B4
#define LCD_RS_PIN PIN_B6
#define LCD_RW_PIN PIN_B5
#define LCD_DATA4 PIN_B3
#define LCD_DATA5 PIN_B2
#define LCD_DATA6 PIN_B1
#define LCD_DATA7 PIN_B0
#include <lcd.c>
#include <math.h>
#define PIN_MODE PIN_A2
int mode=0;
int i=0,a,k=0,Vrr[10]={5,10,15,20,25,30,35,40,45,50};
float Vr,Vm,Im,duty,Err1,Err2,s1=0,s2=0,dt,Ir,Err2p=0,
Kpv = 0.1,
Kiv = 0.001,
Kpi = 0.2,
Kii = 0.0015;
//Kd = 0.1;

#INT_RTCC
```

```

void RTCC_isr(void)
{
k++;
switch(mode)
{
case 0:
Err1 = Vr-Vm;
s1 = s1 + Err1;
Ir = Kpv*Err1+Kiv*s1;
//duty = Ir;
//if (Ir < 0) Ir = 0;
//if (Ir > 100) Ir = 100;
Err2 = Ir-Im;
s2 = s2 + Err2;
duty = Kpi*Err2+Kii*s2;//+Kd*(Err2-Err2p);
if (duty<0) duty = 0;
if (duty>250) duty = 250;
set_pwm1_duty((int)(duty));
Err2p = Err2;
break;

case 1:
Err1 = Vr-Vm;
s1 = s1 + Err1;
Ir = Kpv*Err1+Kiv*s1;
//duty = Ir;
//if (Ir < 0) Ir = 0;
//if (Ir > 100) Ir = 100;
Err2 = Ir-Im;
s2 = s2 + Err2;
duty = Kpi*Err2+Kii*s2;//+Kd*(Err2-Err2p);
if (duty<0) duty = 0;
if (duty>250) duty = 250;
set_pwm1_duty((int)(duty));

```

```

    Err2p = Err2;
break;
}
}
#INT_RDA
void RDA_isr(void)
{
    a=getc();
}

void main()
{
    setup_adc_ports(AN0_AN1_AN3);
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_2);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_8|RTCC_8_bit);    //409 us overflow
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,249,1);                    //50.0 us overflow, 50.0 us interrupt
    enable_interrupts(INT_RTCC);
    enable_interrupts(INT_RDA);
    enable_interrupts(GLOBAL);
    setup_ccp1(CCP_PWM);
    set_pwm1_duty(0);
    output_float(PIN_MODE);
    lcd_init();
    lcd_gotoxy(1,1);lcd_putc("Com_Hacheur_back");
    lcd_gotoxy(1,2);lcd_putc(" 0V<Tension<45V");
    delay_ms(500);

while(1)
{
    if(!input(PIN_MODE))
    {
        mode++;
        if(mode==2) mode=0;
        delay_us(10);
    }
}
}

```

```

while(!input(PIN_MODE));
}

switch(mode)
{
case 0:
    set_adc_channel(0);      //Acquisition de la tension de référence
    delay_us(10);
    Vr = 0.1953*read_adc();  //0.1953=50/256

    if (k == 200)
    {
        lcd_gotoxy(1,1);printf(lcd_putc,"Comm1 Im=%1.4fA",Im);
        lcd_gotoxy(1,2);printf(lcd_putc,"Vr=%2.1fV Vm=%2.1fV",Vr,Vm);
        k=0;
    }
    break;

case 1:
    if (a==0x43 )
    {
        Vr = Vrr[i];
        if (i>9) {i=9;}
        i++;
        delay_ms(150);
    }
    if (a==0x52 )
    {
        if (i==0) {i=0;}
        Vr = Vrr[i];
        delay_ms(150);
        i--;
    }
}

```

```

if (k == 200)
{
    lcd_gotoxy(1,1);printf(lcd_putc,"Comm2 Im=%1.4fA",Im);
    lcd_gotoxy(1,2);printf(lcd_putc,"Vr=%2.1fV Vm=%2.1fV",Vr,Vm);
    k=0;
}
break;
}
set_adc_channel(1);      //Acquisition de tension mesurée
delay_us(10);
Vm = 0.1953*read_adc(); //
set_adc_channel(3);      //Acquisition du courant mesuré
delay_us(10);
Im = 0.8*(0.018*read_adc()-2.3148); //Im=(v0-vref)R2/(R1*Rsh) où R2=32k, R1=1k et
Rsh=0.0625
}
}

```

Bibliographie :

- [1]Hidri.Imed, Support de cours D'électronique de puissance Les convertisseurs DC-DC et DC-AC, Institut supérieur des études technologiques de Nabeul, Département : Génie Electrique.
- [2]H. Bùhler. Convertisseurs Statiques. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1991.
- [3]Leshacheurs:https://pdfprof.com/PDF_Doc_Telecharger_Gratuits.php?q=les+hacheurs+electronique+de+puissance/-26PDF26145-doc6
- [4]A. Jaafari "Contribution à la Modélisation, l'Analyse et l'Optimisation de Lois de Commande pour Convertisseurs DC-DC de Puissance," Thèse de Doctorat, Supélec, 2011.
- [5]Gi. Segulier, "Electronique de puissance", Francis Labrique, Philippe Delarue - Collection Sciences sup - Sciences de l'ingénieur, 415 pages, parution le 19/08/2015 (10^{eme} édition)
- [6]Gi. Segulier, "Electronique de puissance", Francis Labrique, Philippe Delarue - Collection Sciences sup - Sciences de l'ingénieur, 415 pages, parution le 19/08/2015 (10^{eme} édition).
- [7]F. Souleymane et M. Omar, «univ-adrar.edu.dz,» 23 06 2019. [En ligne]. Available: https://dspace.univadrar.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/2272/1/memoire.fine_etude.pdf. [Accès le 2 aout 2020].
- [8]Ali Jaafari "Contribution à la Modélisation, l'Analyse et l'Optimisation de Lois de Commande pour Convertisseurs DC-DC de Puissance," Thèse de Doctorat, Supélec, 2011.
- [9]Haffad salem. Bourdjioua slimane. Réalisation d'un régulateur PID à base d'un microcontrôleur. Promotion 2015
- [10][https://fr.wikipedia.org/wiki/Asservissement_\(automatique\)#Articles_connexes](https://fr.wikipedia.org/wiki/Asservissement_(automatique)#Articles_connexes).
- [11]S.Sekhsokh et K.Oukili «Etude d'une boucle de régulation de niveau», mémoire de master en génie des procédés, école supérieure de technologie _ FES _ 2010/2011.
- [12]Chaki. A. Ghouzroum, A.' Conception et Réalisation des Convertisseurs AC/DC à Base du Microcontrôleur PIC16F877A' Mohamed boudiaf – m'sila, mémoire de master, 2018.
- [13] P.PROUVOST, «Instrumentation et régulation en 30 fichiers», édition Dunod, Paris, France, 2010.
- [14] D.LEQUESNE, «La régulation PID analogique et numérique», édition Eyrolles, France, 2006
- [15]E.Magarotto, «cours de régulation», département de génie chimique et procédés, université de Caen, France, version septembre 2004.

- [16] M.Kareb et L.Gadi, «Étude et implémentation d'une commande PID en utilisant le PIC18F2550 pour le contrôle de vitesse d'un MCC», mémoire de master en automatique, UMMTO, Tizi-Ouzou, 2016.
- [17] V.Tourtchine. Microcontrôleur de la famille PIC. Support de cours & Prise en main du logiciel MPLAB-
- [18] Saadi, R. Salhi, N. : 'Réalisation de carte à microcontrôleur pour le contrôle de bras manipulateur via un pc, mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2010.
- [19] PIC16F87XA Data Sheet: <http://www.microchip.com>.
- [20] PIC16F877A images : <http://www.oumnad.123.fr/Microcontrolleurs/PIC16F877.pdf>
- [21] Microship fiche technique, « PIC18F2331/2431/4331 Datasheet ».
- [22] www.Microchip.com, CCP Module Implementation and Functionality.
- [23] Emetteur récepteur radio :
<https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89metteur%C3%A9cepteur>

Résumé :

L'électronique de puissance occupe une place très importante dans beaucoup d'applications industrielles. Les hacheurs servent à convertir l'énergie électronique continue constante en une énergie électrique réglable. Dans ce travail, on a commandé en boucle fermée le hacheur dévolteur par le compensateur PI. Un filtre de type LC est placé à la sortie du circuit pour garantir une tension constante. Le code CCS du correcteur PI a été implanté dans le microcontrôleur pic16F877A. Les mesures de la tension et du courant de charge ont été affichées et commentés. Nous avons trouvé que la tension et le courant de charge ont les mêmes formes d'ondes à celles présentées en simulations. La robustesse de la commande a été examinée en fonction de la variation de la résistance de sortie.

Mots clés :

Hacheur série, Microcontrôleur PIC16F877A, Signal MLI, Correcteur PI.

Abstract:

Power electronics occupy a very important place in many industrial applications. Choppers are used to convert constant continuous electronic energy into adjustable electrical energy. In this work, the step-down chopper was controlled in a closed loop by the PI compensator. An LC type filter is placed at the output of the circuit to guarantee a constant voltage. The CCS code of the PI corrector has been implemented in the pic16F877A microcontroller. The load voltage and current measurements were displayed and commented on. We have found that the charge voltage and current have the same waveforms as those shown in simulations. The robustness of the control was examined as a function of the variation of the output resistance.

Mots clés :

Serial chopper, PIC16F877A microcontroller, PWM signal, PI corrector.

المخلص:

تحتل إلكترونيات الطاقة مكانة مهمة للغاية في العديد من التطبيقات الصناعية. تستخدم المروحيات لتحويل الطاقة الإلكترونية المستمرة إلى طاقة كهربائية قابلة للتعديل. في هذا العمل ، تم التحكم في مفرمة التنحي في حلقة مغلقة بواسطة معوض PI. يتم وضع مرشح من النوع LC عند خرج الدائرة لضمان جهد ثابت. تم تنفيذ كود CCS لمصحح PI في متحكم

pic16F877A. تم عرض قياسات جهد الحمل والتيار والتعليق عليها. لقد وجدنا أن جهد الشحن والتيار لهما نفس أشكال الموجة مثل تلك الموضحة في المحاكاة. تم فحص متانة عنصر التحكم كدالة لتغير مقاومة الخرج.

الكلمات المفتاحية :

المحول، متحكم PIC16F877A, المصحح PI ,الإشارة PWM .