

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par

- *Rouabah Bilal*
- *Lagoune Brahim*

Intitulé

***Etude et simulation d'un micro réseau à courant continu
fournissant une charge puissance constante***

Soutenu le : 15 / 09 / 2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Zebiri Fouad</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Chouadar adel</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Ben henniche Abd elhak</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Merabet Elkhier</i>	<i>Pr</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

***Etude et simulation d'un micro réseau à courant
continu fournissant une charge puissance constante***

Présenté par :

ROUABAH BILAL

signature

LAGOUNE BRAHIM

signature

Avis favorable du Président du Jury

Zebiri Fouad

Signature

Année Universitaire 2021/2022

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux :

Mes chères frères et sœurs

Ma chère femme (Z)

Tous mes amis (e)s : Aissa, Hamza, Riadh et Abderrahmane

Mon binôme Brahim et à toute sa famille

Tous mes collègues de la promotion 2021/2022

Tous ceux qui m'aiment et qui m'ont encouragé

Rouabah Bilal

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux :

Mes chères parents

Mon cher frère et mes chères sœurs

Ma chère femme (A)

Tous mes amis (e)s : Riadh, Aissa, Ayoub, Hamza et Aymen

Mon binôme Bilal et à toute sa famille

Tous mes collègues de la promotion 2021/2022

Tous ceux qui m'aiment et qui m'ont encouragé

Lagoune Brahim

Résumé

Le travail qui est traité dans ce mémoire de fin d'étude est basé sur le micro-réseau en général et c'est considéré le convertisseur l'élément le plus important dans ce réseau.

En premier étape nous allons présenter les avantages et les inconvénients d'un micro-réseau, puis le charge de puissance constante (CPL). Ensuite, nous montrons le convertisseur abaisseur (modélisation et simulation), et discuter les résultats dans le logiciel MATLAB/Simulink.

ملخص

ان العمل الذي يتم معالجته في مذكرة التخرج هاته يستند بشكل عام الى الشبكة الصغيرة (الدقيقة) ويعتبر المحول هو العنصر الاكثر اهمية في هاته الشبكة .

في الخطوة الاولى نقوم بتقديم مزايا و عيوب الشبكة الدقيقة بالاضافة الى حمل الطاقة المستمر .

بعد ذلك نتطرق الى عرض محول التنزيل في الشبكة (النمذجة والمحاكات) ثم نقوم بمناقشة النتائج في برنامج ماطلاب .

SOMMAIRE

Chapitre I	Micro réseau DC	3
<i>I.1</i>	<i>Introduction</i>	3
<i>I.2</i>	<i>Micro-Réseaux ou micro-grids</i>	3
<i>I.2.1</i>	<i>Avantages et inconvénients des micro-réseaux</i>	4
<i>I.2.2</i>	<i>Configuration d'un micro-réseau</i>	5
<i>I.2.3</i>	<i>Micro-réseau à charge de puissance constante (CPL)</i>	6
<i>I.3</i>	<i>Charge de puissance constante (CPL)</i>	7
<i>I.4</i>	<i>Convertisseurs DC-DC</i>	9
<i>I.4.1</i>	<i>Types des convertisseurs DC-DC</i>	11
<i>I.5</i>	<i>Convertisseur abaisseur (Buck converter)</i>	11
<i>I.5.1</i>	<i>Schéma électrique du convertisseur abaisseur</i>	12
<i>I.5.2</i>	<i>Principe de fonctionnement du convertisseur abaisseur :</i>	12
<i>I.5.3</i>	<i>Equation régissant le circuit du convertisseur abaisseur :</i>	13
<i>I.5.4</i>	<i>Formes d'onde du convertisseur (Buck) :</i>	15
<i>I.5.5</i>	<i>Avantages et inconvénients du convertisseur abaisseur :</i>	15
<i>I.6</i>	<i>Conclusion</i>	16
Chapitre II	Modélisation et Simulation du convertisseur abaisseur	18
<i>II.1</i>	<i>Introduction</i>	18
<i>II.2</i>	<i>Modélisation mathématique d'un convertisseur abaisseur</i>	18
<i>II.2.1</i>	<i>Modèle instantané de convertisseur abaisseur</i>	19
<i>II.2.2</i>	<i>Mode de conduction continu</i>	19
<i>II.3</i>	<i>Modèle moyen</i>	23
<i>II.4</i>	<i>Simulation de convertisseur DC-DC</i>	25
<i>II.4.1</i>	<i>Principe de fonctionnement de la simulation du convertisseur abaisseur</i>	26
<i>II.4.2</i>	<i>Modèle MATLAB Simulink dans la simulation d'un convertisseur abaisseur :</i>	26

SOMMAIRE

II.4.3	Modèle de convertisseur abaisseur de source et de charge :	29
II.5	<i>Régulateur PID</i> :	30
II.5.1	Actions proportionnelle, intégrale et dérivée (Correcteur PID) :	31
II.5.2	Les trois principaux types de style de contrôle PID	31
II.5.3	Les trois types peuvent également être étudiés en boucle (ouverte et fermée).....	32
II.5.4	Modèle mathématique du convertisseur abaisseur avec PID	34
II.5.5	Rôle du régulateur	37
II.5.6	Commande du convertisseur abaisseur par un régulateur PI.....	37
II.6	<i>Principe de la commande PWM</i>	37
II.7	<i>Test en boucle fermée</i>	39
Chapitre III	Simulation et résultats à charge de puissance constante (CPL)	43
III.1	<i>Introduction</i>	43
III.2	<i>Simulation du micro-réseau approvisionnement a CPL</i>	43
III.2.1	Le schéma de simulation	44
III.2.2	Résultats de simulation	44
III.3	<i>Conclusion</i>	50

Liste des figures

Figure I.1: Micro-Réseaux « μG » [2]	4
Figure I.2: Configuration typique d'un micro-réseau autonome [3].	6
Figure I.3: Convertisseur DC-DC avec charge résistive fonctionne comme une (CPL).	8
Figure I.4: Courbe V - I du convertisseur de charge.....	9
Figure I.5: Topologie du Convertisseur DC-DC Buck &Boost	10
Figure I.6: Convertisseur abaisseur (Buck).	12
Figure I.7: Circuits équivalents du convertisseur abaisseur : (a) M fermé, (b) M ouvert.	13
Figure I.8: Signaux typiques du convertisseur abaisseur	15
Figure II.1 : Circuit équivalent de convertisseur Buck	19
Figure II.2 : Schéma de convertisseur abaisseur (Buck), lorsque M est à l'état ON.....	20
Figure II.3 : Schéma de convertisseur abaisseur (Buck), lorsque M est à l'état OFF.	21
Figure II.4 : Courant d'inductions continues et sa valeur moyenne [6].....	24
Figure II.5 : Modèle MATLAB Simulink dans la simulation d'un convertisseur abaisseur	27
Figure II.6 : réponse de courant (IL).....	27
Figure II.7 : Zoom réponse de courant (IL).....	28
Figure II.8 : Réponse de tension de sortie Vs.....	28
Figure II.9 : Zoom Réponse de tension de sortie Vs.....	28
Figure II.10 : convertisseur abaisseur de source connecte au CPL	29
Figure II.11 : Schéma d'un régulateur PID [8].....	30
Figure II.12 : Contrôleur PID pour un convertisseur DC/DC abaisseur.	36
Figure II.13 : Commande d'un hacheur abaisseur utilisant PID.	37
Figure II.14 : MLI schéma avec signaux d'entrée et sortie.....	38
Figure II.15 : Circuit du convertisseur abaisseur implémenté avec MATLAB /Simulink.	39
Figure II.16 : la tension de sortie Vs (R=10 Ω).....	40
Figure II.17 : Zoom la tension de sortie Vs (R=10 Ω).....	40
Figure II.18 : Réponse de courant IL (R=10 Ω).....	40
Figure II.19 : Zoom de courant IL	41
Figure III.1 : Simulation sur MATLAB d'un micro-réseau avec (CPL).	44
Figure III.2 : Réponse de courant IL2.....	44
Figure III.3 : Zoom de courant IL2.....	45
Figure III.4 : La tension de sortie Vs2	45
Figure III.5 : Zoom de la tension de sortie Vs2.....	46
Figure III.6 : Le rapport cyclique (d1)	46
Figure III.7 : Le rapport cyclique (d2).	47
Figure III.8 : Chute de tension de sortie Vs2 pour (R=10)	47

Liste des tableaux

Tableau 1 ; Des paramètres de convertisseur dévolteur.....	26
Tableau 2 : Paramètres d'un convertisseur dévolteur(Buck).	39
Tableau 3 : Les paramètres d'un micro-réseau approvisionnement CPL.....	43

Liste des abréviations

PID : Proportionnelle Intégrateur Dérivateur.

MLI : Modulation à Largeur d'Impulsion.

AC : Courant alternatif

DC : Courant contin

MCC : Mode de conduction continue.

DC-DC : Conversion continue / continue.

PV : Panneau photovoltaïque.

μG : Micro Grid

PWM : Pulse Width Modulation

Symboles

x : Vecteur d'état
L : Inductance
C : Condensateur
R : Charge
V_e : Tension d'entrée
V_s : Tension de sortie
V_d : Tension directe de diode
R_L : Résistance interne de l'inductance L
i_L : Courant d'inductance
M : Interrupteur
I_s : Le courant de charge
V_c : Tension du condensateur
V_{ref} : Tension de référence
T : Constante de temps
P_{out} : Limite de sortie proportionnelle
K_p : Amplification proportionnelle
E : Erreur et délai
I_{out} : Limite de sortie intégrée
K_i : Amplifier l'intégration
D_{out} : Limite de sortie différentielle
K_d : Amplification différentielle

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Aujourd'hui, comme on le sait, les besoins mondiaux en énergie électrique augmentent jour par jour, et au présent dans notre société cette énergie est devenue très importante et fondamentale, car il est utilisé dans tous les domaines de la vie quotidienne. On remarque toujours des nouvelles techniques dans le monde de production d'énergie.

L'histoire de la production d'électricité depuis le premier jour en 1879 par l'électricien Thomas Edison à Manhattan et en passant par l'Europe et avec la découverte de nouvelles technologies de production d'énergie, qu'elle soit éolienne ou solaire et même nucléaire en 1963, mais la demande de ça augmente

En fait, le développement technologique de l'énergie électrique plus confiné à la seule loi de la demande, mais est devenu une solution aux problèmes de pollution et l'effet de serre.

Nous constatons que l'énergie renouvelable est la meilleure et la plus fine en termes de moins de défauts, moins de coût, ainsi que son reflet positif sur la nature. Malgré tous ces avantages de l'énergie solaire et éolienne, ils ont encore des obstacles. En plus le rendement de cette énergie est resté toujours faible car l'utilisation dans les zones isolées et décentralisées

Et pour tirer le meilleur parti de l'énergie électrique, ce dernier a été intégré dans les réseaux électriques. Parmi les réseaux électriques, on retrouve le micro-réseau qui est une version miniature d'un réseau électrique classique. L'électricité est fournie directement à un groupe d'utilisateurs de la production nationale.

Ainsi, un micro-réseau est un sous-système connecté uniquement au réseau public en un point. Cette connexion agit comme un interrupteur qui permet de "déconnecter" le micro-réseau du réseau général. En cas de panne, par exemple, il peut temporairement fonctionner de manière autonome.

Pour fonctionner, un micro-réseau doit comprendre trois éléments de base :

1. Une installation locale de production d'électricité pour assurer son indépendance en cas de déconnexion du réseau public, en complément d'un système de production de secours (groupe électrogène).

2. Système de stockage : batteries, réserves d'eau pour stockage pompé, et à l'avenir, super condensateurs et stockage chimique de la chaleur latente ;

3. Système de gestion intelligent pour assurer un équilibre continu entre la production et la demande d'électricité.

Le travail présenté dans cette mémoire basé sur le micro-réseau connecté au CPL, c'est ce que proposent en trois chapitres:

1. Dans le premier chapitre nous allons afficher le micro-réseau en général (définition, avantages, inconvénients et sa relation avec CPL)

2 . Dans le deuxième chapitre nous présentant le convertisseur abaisseur DC-DC (principe de fonctionnement, modélisation, simulation, et sa connexion avec PID)

3. Dans le troisième chapitre nous avons présenté la simulation générale d'un micro-réseau et résultats finals.

Chapitre I :
Micro-réseau DC

Chapitre I Micro réseau DC

I.1 Introduction

Un micro-réseau est défini comme une composante d'un réseau intelligent. Ce dernier est constitué de consommateurs, de micro-ressources énergétiques aussi bien que les systèmes de stockage locaux, Ça peut marcher avec ou sans participation d'autres systèmes.

La mise au point de micro-réseaux est une grande promesse pour le secteur de l'énergie par de nombreux bénéfices, tels que la réduction du réchauffement climatique ,pollution de l'environnement, sécurité, qualité et durabilité performance...[1], et le convertisseur DC/DC considéré comme l'élément le plus important d'un micro-réseau.

Dans ce chapitre, nous aurons différents types de convertisseurs DC / DC, c'est-à-dire à charge de puissance constante (CPL), parmi ces types, nous expliquerons le hacheur abaisseur.

I.2 Micro-Réseaux ou micro-grids

Les micro-réseaux sont de petits systèmes énergétiques avec des sources d'énergie (génération distribuée), un stockage et des charges qu'ils peuvent utiliser lorsqu'ils sont connectés au secteur ou non (mode îlot). Ils maintiennent en temps réel l'équilibre énergétique entre consommation et production, notamment grâce à la gestion du stockage, et s'assurent que tous les stocks (variables pertinentes) sont maintenus robustes et dans les réserves opérationnelles. Le concept micro-réseau offre une solution viable pour intégrer une énergie plus durable dans le réseau de distribution existant. Dans le même temps, les micro-réseaux peuvent alimenter des charges locales et sensibles, puis cette fonctionnalité, associée à la possibilité de fonctionnement en mode ilote et connecté, augmente la fiabilité du réseau électrique du point de vue charge/client [9].

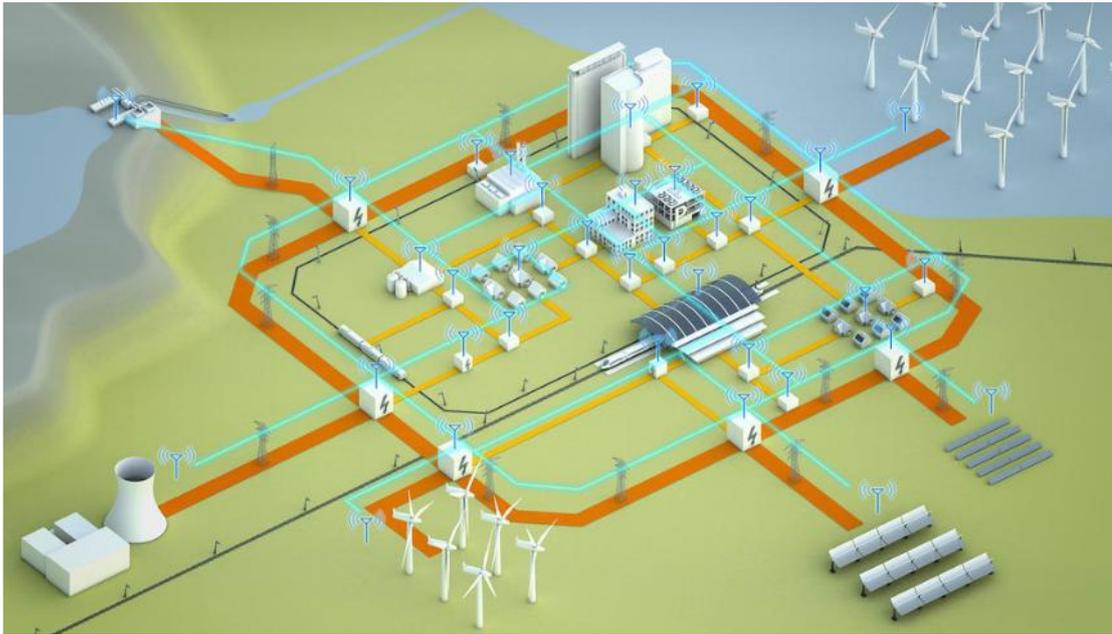


Figure I.1: Micro-Réseaux « μ G » [2]

I.2.1 Avantages et inconvénients des micro-réseaux

Parmi les avantages et inconvénients que nous pouvons rencontrer, nous avons :

Avantage :

- Isolement contre toute interruption ou défaillance du réseau électrique.
- Amélioration du rendement énergétique, de l'énergie et de la fiabilité.
- Réduire les émissions de gaz pouvant contribuer à lutter contre les changements climatiques.
- Réduire la distance physique et électrique entre les microcentrales et les charges, qui contribuent à une diminution des pertes.
- Atteindre l'équilibre offre-demande.

Inconvénient :

- les coûts élevés liés aux installations et aux ressources énergétiques décentralisées.
- Problèmes techniques liés à un manque d'expérience technique
- Absence de normes: comme il s'agit d'un domaine assez nouveau les normes ne le sont pas.

- pas encore disponibles pour résoudre les problèmes de fonctionnement et de protection.
- Il n'est pas encore possible de résoudre des problèmes d'exploitation et de protection.

I.2.2 Configuration d'un micro-réseau

Les micro-réseaux peuvent être définis comme des sous réseaux de basse tension incluant des consommateurs, des générateurs décentralisés et des systèmes de stockage locaux. Les micro-réseaux sont destinés à alimenter des charges électriques pour une petite communauté tel que les cités universitaire, les sites industriels et commerciaux, les villages, etc. Les générateurs ou micro-source employés dans un micro-réseau sont généralement renouvelables. Ils englobent un large éventail de technologies telles que : les panneaux photovoltaïques, la biomasse ou encore l'énergie éolienne.

L'énergie solaire n'étant pas disponible à tout moment (par exemple la nuit, les jours nuageux) il est donc nécessaire d'équiper notre réseau par des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie en surplus. Les micro-réseaux peuvent fonctionner en deux modes : autonome et raccordé au réseau.

En mode autonome, ils apparaissent comme une solution pour alimenter en énergie électrique les sites isolés.

En mode raccordé au réseau, ils sont normalement connectés au réseau principal de distribution, mais sont capables de s'isoler de ce dernier en cas de perturbation dans le réseau principal.[1]

La Figure (I.2) met en avant la configuration typique d'un micro-réseau autonome. Cette structure offre la possibilité d'opérer en îlot isolé ou connecté au réseau commun. Sa construction varie en fonction des besoins et des contraintes liées à l'application.

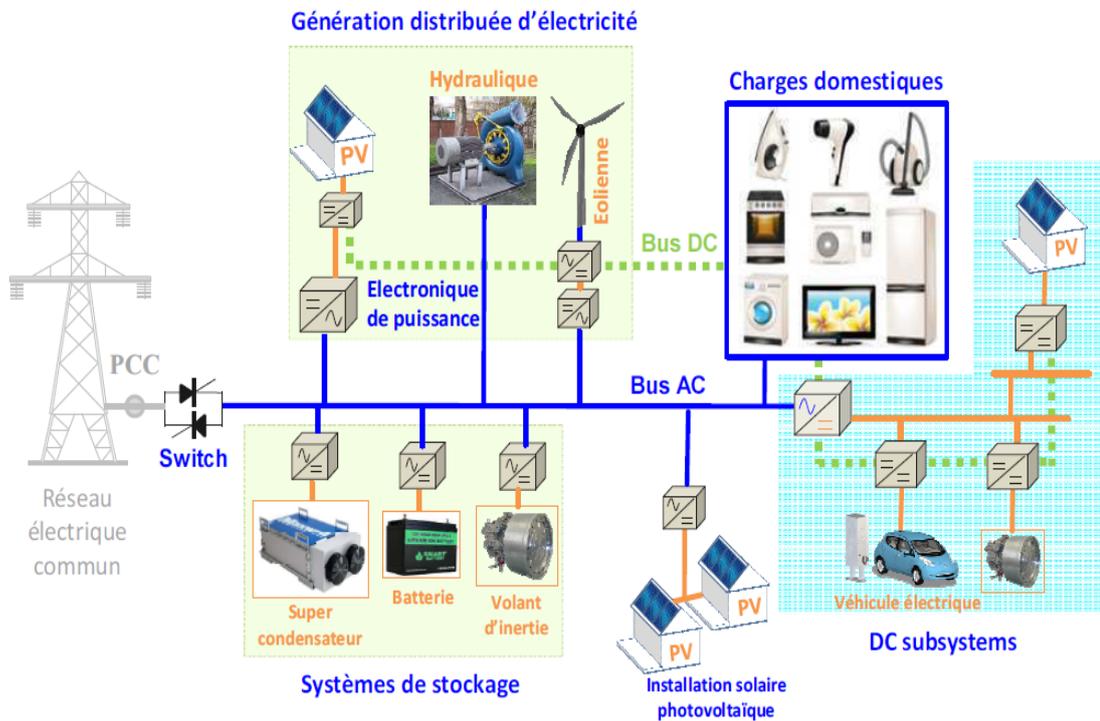


Figure I.2: Configuration typique d'un micro-réseau autonome [3].

I.2.3 Micro-réseau à charge de puissance constante (CPL)

À mesure que la technologie progresse, les applications des appareils électroniques de puissance se multiplient, augmentant les charges de puissance constantes (CPL) à un rythme alarmant, ce qui a plus d'effets sur la stabilité du système d'alimentation, en particulier dans les systèmes de puissance répartie comme les systèmes de micro-réseaux. La majorité des systèmes de micro-réseau ont des charges du côté de la production. Ainsi, la gestion de la stabilité côté charge est essentielle dans les systèmes de micro-réseau, c'est pourquoi nous avons choisi la compensation côté charge. En outre, la compensation latérale de charge est une compensation ponctuelle de charge, ce qui signifie qu'elle peut être obtenue à tout moment. Les charges de micro-réseau sont classées en deux types : les charges contrôlables et les charges critiques. Les charges contrôlables comprennent les bornes de recharge pour véhicules électriques, les thermopompes et les centres de données, ainsi que les systèmes de sécurité. Les charges contrôlables comprennent les bornes de recharge des véhicules électriques, les pompes à chaleur, etc., tandis que les charges critiques comprennent les centres de données et les systèmes de sécurité.

Les charges critiques sont constituées de charges de puissance constantes et de charges de courant constantes (CPL). Les (CVL) nécessitent une attention particulière pour un rendement optimal. Ces charges sensibles du côté de la charge sont le meilleur moyen de compenser le fonctionnement du système stable. Il est recommandé d'utiliser la compensation côté charge des CPL dans les applications de micro-réseau. Instabilité causée par la combinaison de CPL et de CVL. De plus, nous pouvons utiliser cette pratique pour gérer le phénomène d'effondrement de tension, combiner toutes les CPL en une seule branche. Dans ce cas, nous n'indemnisons que lorsque c'est nécessaire.

De plus, le bus/alimentateur du micro-réseau est constitué de plusieurs sources intermittentes avec une tension/génération variable. Par conséquent, il est difficile et coûteux d'offrir une compensation du côté de la ligne d'alimentation ou par l'intermédiaire de circuits intermédiaires. Le système proposé est également capable de compenser les techniques dans les circuits secondaires ou intermédiaires. Il a fallu tenir compte de ces perturbations. En outre, il est possible de mettre en place un dispositif de compensation du côté chargement. Etre portable, ce qui est un avantage significatif par rapport aux circuits d'alimentation ou intermédiaires méthode de compensation [13].

I.3 Charge de puissance constante (CPL)

Certains systèmes d'alimentation nécessitent un multi convertisseur qui fournit au système diverses formes d'alimentation et de tension ; est connu comme un système électronique de puissance multi convertisseur.

Ce type de système se compose d'un grand nombre de dispositifs électroniques de puissance de configurations appropriées, en cascade, empilés et distribués pour les charges et l'alimentation afin d'obtenir le bon fonctionnement requis. Le type d'électronique de puissance à convertisseurs multiples est un système en cascade. le convertisseur illustré à la figure (I.3), composé d'un convertisseur de source qui fournit une tension régulée au système (certains sont appelés convertisseurs en amont ou moniteurs de tension) et d'un second convertisseur qui convertit la tension du secteur à la valeur et à la fréquence appropriées de chaque charge. Le multi convertisseur dispose de nombreuses instructions d'utilisation différentes pour connecter les composants du multi convertisseur.

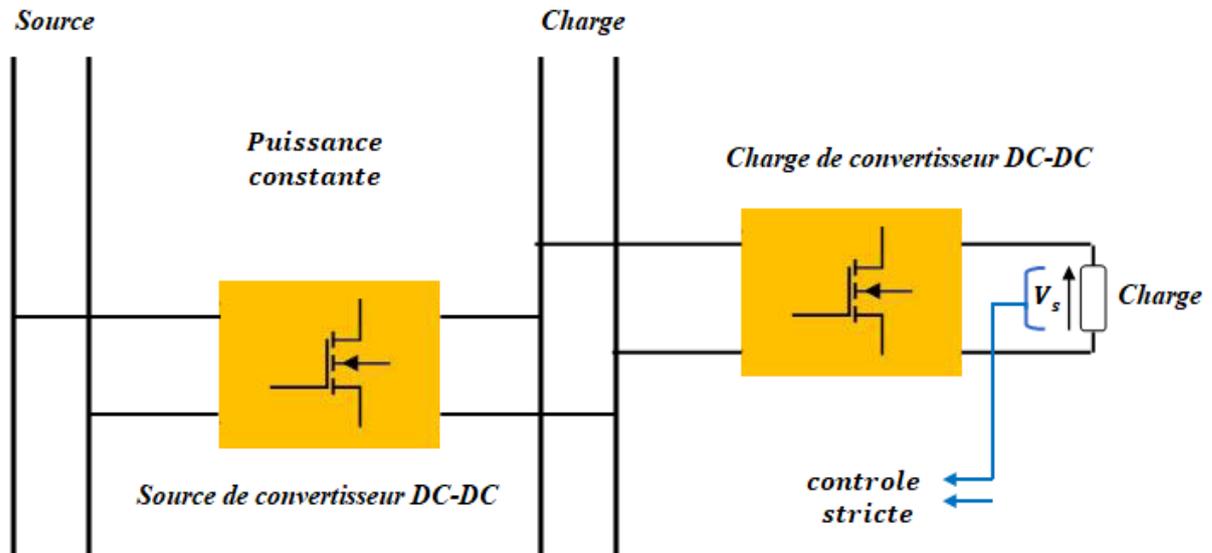


Figure I.3: Convertisseur DC-DC avec charge résistive fonctionne comme une (CPL).

Les transducteurs de charge (multi convertisseur de deuxième étage) sont supposés avoir des caractéristiques de charge de puissance constante lorsqu'ils sont étroitement contrôlés, ce qui signifie que le transducteur a une réponse rapide et une petite ondulation de sortie. ; par conséquent, le convertisseur agit comme un CPL dans leur contrôle

Bande passante. Les charges à puissance constante (CPL) signifient que la puissance de sortie du variateur est constante, c'est-à-dire que la tension de sortie diminue lorsqu'il y a de petites différences dans la valeur réelle (augmentant la valeur réelle), ce qui signifie que lorsque la puissance perdue est appliquée à le circuit, la puissance de sortie et la puissance d'entrée sont identiques. En fait, le convertisseur se comporte comme un CPL lorsqu'il a un contrôle en boucle fermée et comme une charge résistive dans une boucle ouverte, comme le montre la figure (I.4). Les convertisseurs d'électronique de puissance sont susceptibles d'avoir des propriétés CPL lorsque cette tension de sortie est supérieure à la tension de référence. Tension(V_C); en d'autres termes, le convertisseur fonctionne comme une charge résistive de démarrage, mais comme une CPL si elle est supérieure à la valeur de la tension de référence(V_C) .

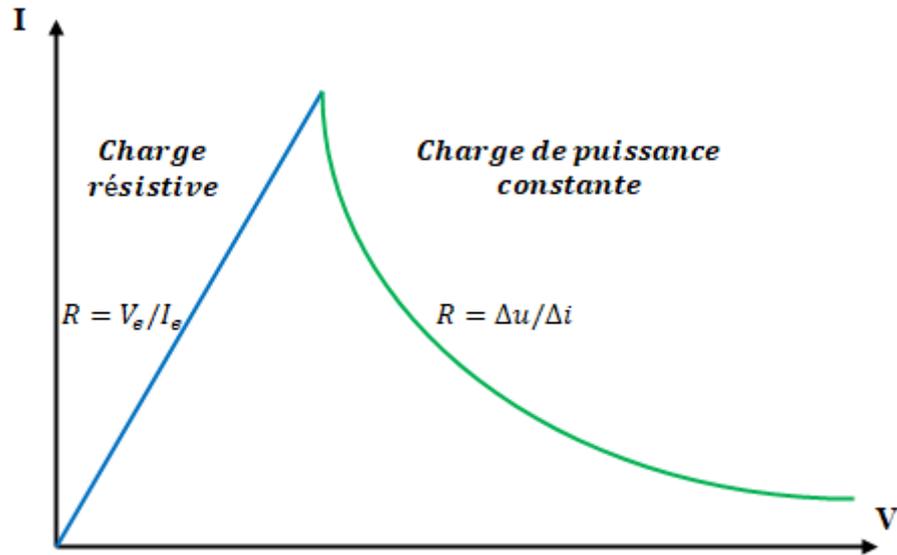


Figure I.4: Courbe V - I du convertisseur de charge

De nombreuses charges, telles que les entraînements motorisés ou les charges électroniques à commandes fixes, agissent comme une charge constante d'énergie.

Un exemple est un convertisseur DC-DC, qui fournit une charge électrique et est strictement contrôlé pour maintenir la tension de sortie définie par la charge, comme illustré à la figure(I.3). La puissance de charge est constante lorsqu'il existe une relation linéaire entre la tension et le courant [4].

I.4 Convertisseurs DC-DC

Un hacheur ou convertisseur DC-DC est un dispositif électronique de puissance qui permet d'implémenter un ou plusieurs commutateurs contrôlés afin que la valeur de tension puisse être modifiée. Source de tension continue à haut rendement. La coupe est effectuée à haute fréquence. Si la tension fournie à la sortie est inférieure à la tension appliquée à l'entrée, le hacheur est appelé *déposer* (ou *déposer* ou *déposer*). Sinon ça s'appelle un *booster* (ou *boost* ou *booster*). Certains hacheurs peuvent fonctionner dans les deux sens (*boost* et *buck*). Quelques hélicoptères sont également réversibles : ils peuvent fournir de l'énergie à la charge, Souvent, un moteur à courant continu est utilisé dans ce type d'application, ou dérivé de celui-ci peut être réalisé freiner la machine.

Il existe différentes classifications de convertisseurs DC-DC. L'un d'eux dépend des propriétés isolantes des sections primaire et secondaire. isolation généralement mis en œuvre par un transformateur, qui a une section primaire sur le côté auxiliaire à côté de l'entrée et de la sortie. La chaîne de retour de la boucle de commande est implémenté par un autre transformateur. Alors, La sortie est isolée galvaniquement de l'entrée.

Ces grandes conversions sont très importantes et coûteuses, les convertisseurs DC-DC Aucune séparation n'est préférée [5].

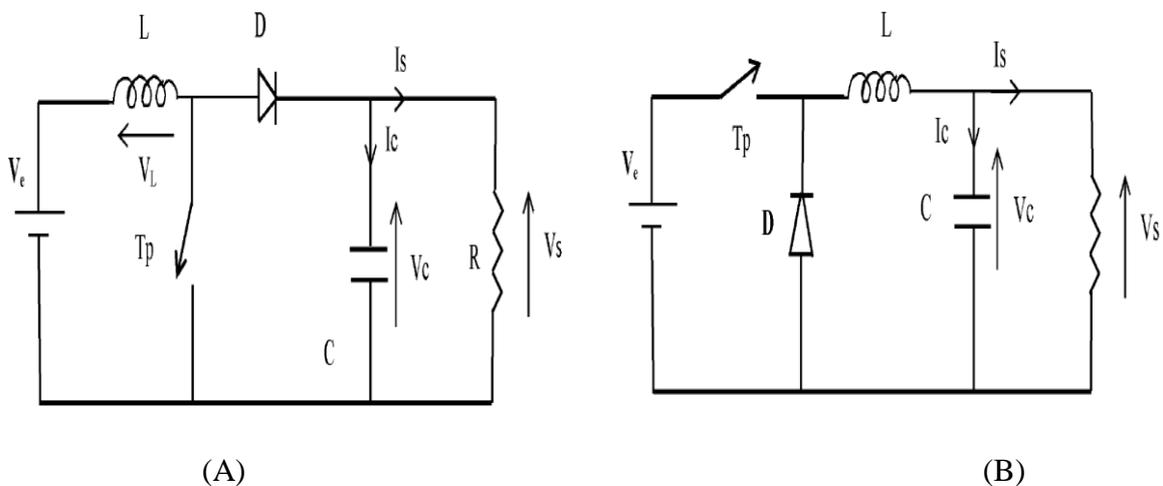


Figure I.5: Topologie du Convertisseur DC-DC / (B)- Buck & (A)- Boost

En général, la conception du convertisseur de puissance revient à s'assurer que ses composants sont intelligents, en particulier les composants passifs, les valeurs des inducteurs et des condensateurs, les deux sont en fait calculés de l'ondulation de courant de l'inductance et de la tension d'ondulation du condensateur. Analyse comportementale pour convertisseur abaisseur montre tel que représenté dans la Figure (I.6) [6].

Le signal de commande de fonctionnement du convertisseur DC-DC est élaboré en passant par une commande MLI (modulation largeur d'impulsion).

Sa fréquence est donnée par la relation suivante :

$$f = \frac{1}{T}$$

I.1

Avec :

f : Fréquence qui est de l'ordre de plusieurs dizaines de kHz ou même plus.

T: la période de cycle de fonctionnement interne

Pendant une durée t_{on} et bloqué pendant le reste de la période T. on définit le rapport cyclique comme suit :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} I \quad I.2$$

C'est en réglant ce rapport cyclique que le contrôleur peut agir sur le convertisseur [7].

I.4.1 Types des convertisseurs DC-DC

Il existe plusieurs topologies pour les convertisseurs DC-DC. Ils sont classés selon en tant que topologie isolée ou non isolée. Topologies d'isolement utilisant des transformateurs l'isolation fonctionne à des fréquences élevées, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. La topologie la plus populaire pour la plupart des applications il existe des flyback, des demi-ponts et des ponts complets. Dans les applications photovoltaïques (PV), Les systèmes couplés au réseau utilisent souvent ces types de topologies lorsque l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sécurité. Les topologies non isolées n'ont pas de transformateur d'isolement. Elles sont généralement utilisées pour l'entraînement des moteurs à courant continu [10].

Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- convertisseurs Abaisseurs (Buck).
- convertisseurs Elévateurs (Boost).
- convertisseurs Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

I.5 Convertisseur abaisseur (Buck converter)

La série de hacheurs (Buck) est un convertisseur statique abaisseur qui permet la conversion d'une tension continue fixe à une basse tension réglable par l'utilisateur, consistant en un interrupteur alimentation à double commande, une diode, une inductance et un condensateur. Exister figure (I.6).

La série de hacheurs peut être utilisée comme variateur de vitesse pour les moteurs à courant continu [8].

I.5.1 Schéma électrique du convertisseur abaisseur

Le schéma du hacheur abaisseur est présenté dans la figure (I.6) .

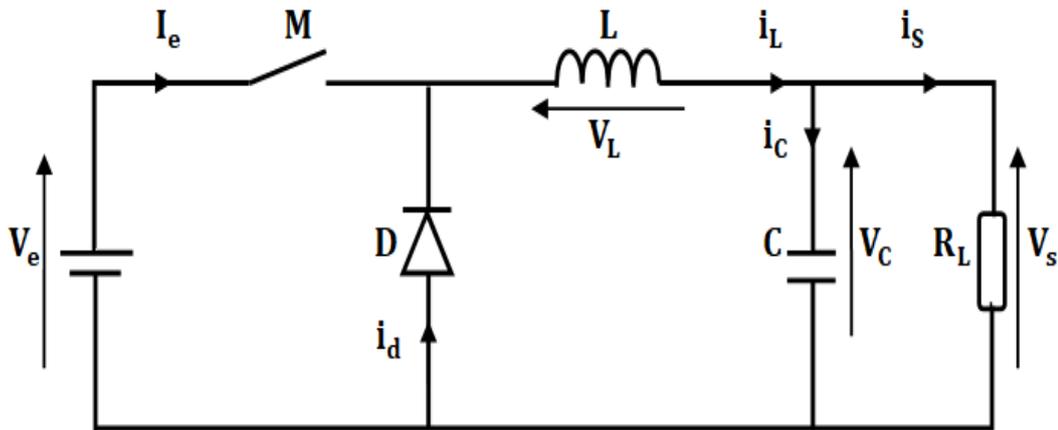


Figure I.6: Convertisseur abaisseur (Buck).

I.5.2 Principe de fonctionnement du convertisseur abaisseur :

Le fonctionnement du circuit peut être divisé en plusieurs étapes :

Le temps 1 démarre lorsque l'interrupteur S se ferme au temps $t = 0$: courant de la source monte suffisamment pour traverser l'inductance, puis au condensateur C et à charge tant que la tension d'entrée est supérieure à la sortie.

Le temps 2 démarre lorsque l'interrupteur S est fermé ($t = \alpha T$) : dans ce cas le courant lorsqu'il traverse la diode D et s'écoule dans le charge et condensateur C .

Si un nouveau cycle démarre avant l'annulation du courant induit, la fonction est se compose uniquement des deux cycles ci-dessus (dans le cas de la ligne continue), Par contre, si le courant induit s'annule pour une nouvelle période, il y a une troisième lorsque le courant induit est nul : l'opération à laquelle nous sommes confrontés est ligne discontinues.

Les Circuits équivalents du convertisseur abaisseur temps 1 et temps 2 sont représentés sur la figure (I.7) et l'allure des tensions et des courants sur la figure (I.8) pour un fonctionnement continu [7].

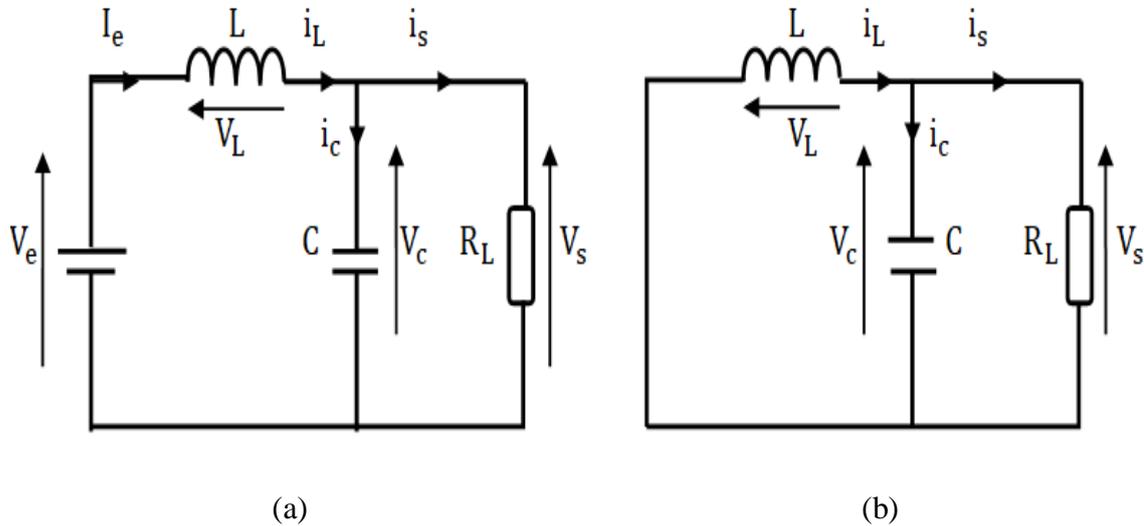


Figure I.7: Circuits équivalents du convertisseur abaisseur : (a) M fermé, (b) M ouvert.

I.5.3 Equation régissant le circuit du convertisseur abaisseur :

➤ Le premier temps ($0 < t < at$) :

$$V_e - V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad \text{I.3}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad \text{I.4}$$

Avec :

V_e : La tension a l'entrée du convertisseur

V_s : La tension de sortie du convertisseur

Avec

$$V_s = \alpha V_e \quad \text{I.5}$$

$$i(t) = \frac{(1-\alpha)V_e}{L}t + I_{\min} \quad \text{I.6}$$

➤ Le deuxième temps ($\alpha t < t < T$)

$$-V_s = -L \frac{di}{dt} \quad \text{I.7}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{\alpha V_e}{L} \quad \text{I.8}$$

$$i(t) = \frac{\alpha V_{PV}}{L}t + I_{\max} \quad \text{I.9}$$

I.5.4 Formes d'onde du convertisseur (Buck) :

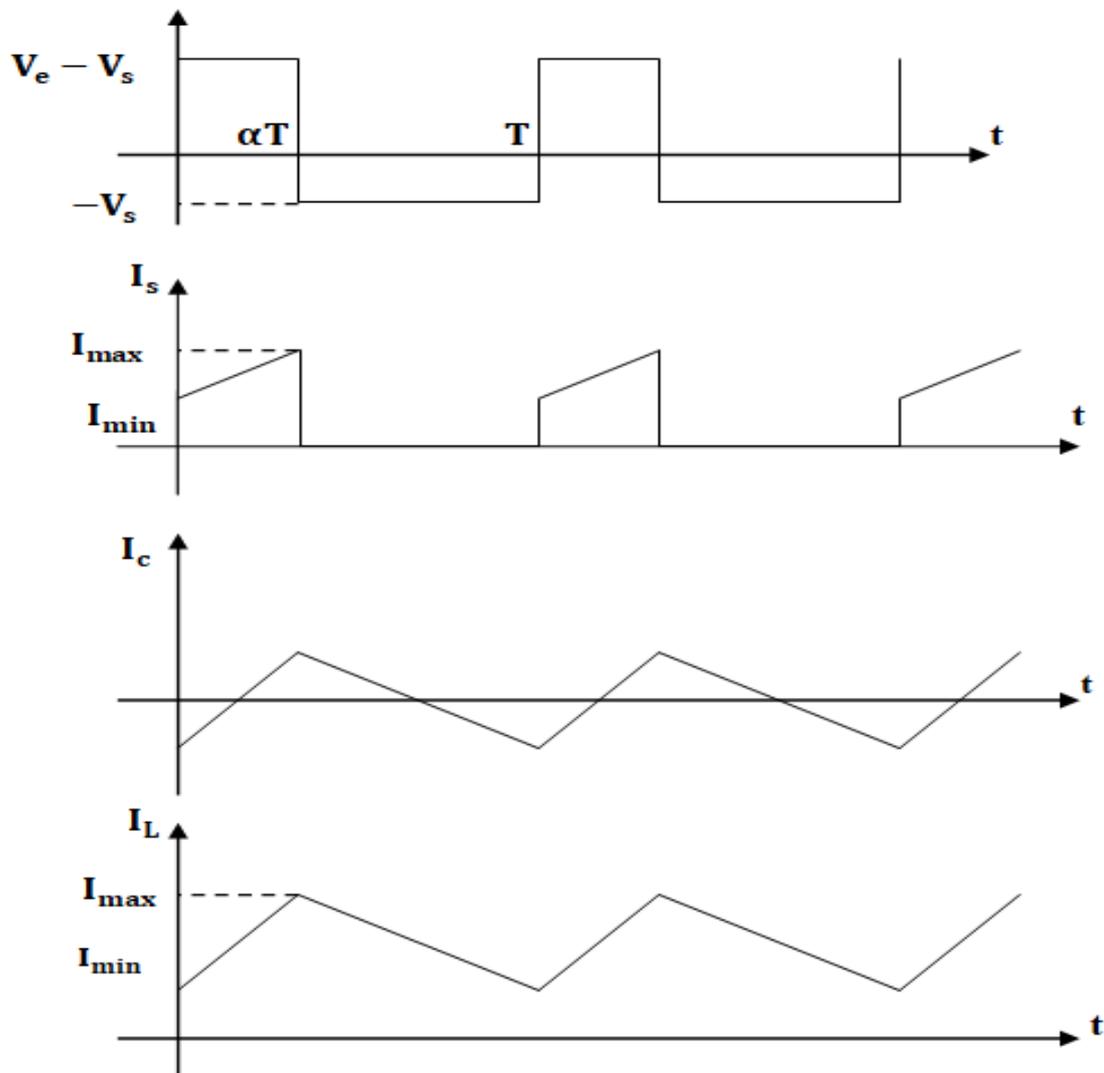


Figure I.8: Signaux typiques du convertisseur abaisseur

I.5.5 Avantages et inconvénients du convertisseur abaisseur :

Avantage :

- Ce convertisseur assure le lissage du courant par l'inductance L.
- Il assure la protection de la charge contre les surintensités on agissant sur l'ouverture et la fermeture du transistor S.

Inconvénients :

- Il ne peut fonctionner lorsque la tension du générateur (PV) est inférieure à la tension de la charge de sorte que l'énergie reçue pendant les périodes à faible éclaircissement est perdue.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous commencerons par définir les micro-réseaux et leurs avantages et inconvénients pour voir la définition d'une charge de puissance constante (CPL).

Ensuite, on passe à la partie la plus importante et délicate de cette étude, qui est la nature du convertisseur de puissance (DC DC), le dernier le plus utilisé dans le micro-réseau est le convertisseur abaisseur (Buck) dans leur définition et principe de opération aux avantages et aux inconvénients.

Alors, nous utiliserons ces informations pour étudier la commande par des approches détaillées dans les prochains chapitres.

CHAPITRE II :

Modélisation et Simulation d'un convertisseur abaisseur

Chapitre II Modélisation et Simulation du convertisseur abaisseur**II.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous avons intéressé beaucoup sur le convertisseur abaisseur DC-DC, sa modélisation mathématique, modèle instantané, modèle générale et aussi bien sa simulation, après nous allons présenter le rôle de régulateur PID dans le commande de ce convertisseur et le PWM

II.2 Modélisation mathématique d'un convertisseur abaisseur

N'importe quel convertisseur de puissance utilise un système de commande. Par exemple, dans un convertisseur continu/continu, la tension de sortie doit typiquement être maintenue constante, indépendante de la tension d'entrée et des variations de la charge. Pour concevoir un tel système de commande, il est important de disposer d'un modèle dynamique du convertisseur. Malheureusement, la compréhension du comportement dynamique du convertisseur est gênée par la nature non-linéaire et le caractère temporel des processus de commutation et de modulation de largeur d'impulsion (PWM). En particulier, il faut savoir comment les variations de la tension d'entrée, du courant dans la charge et le rapport cyclique affectent la tension de sortie.

Les méthodologies analytiques conventionnelles de modélisation consistant à la négligence des certains phénomènes peu influés ont été largement étudiées et décrites dans la littérature. Toutefois, le convertisseur est toujours supposé idéal. Considérer les composants idéaux, sans pertes, simplifie le développement du modèle mais peut parfois conduire à des erreurs dans la prévision des instabilités.

Le modèle appelé « moyen » obtenu en moyennant les deux ou les trois configurations possibles du circuit, selon le mode de fonctionnement (CCM/DCM) considéré, sur une période de découpage. Chaque configuration du circuit d'un convertisseur est représentée par un modèle linéaire à temps continu. Les expressions mathématiques des dynamiques continues sont obtenues en appliquant les lois de Kirchhoff qui décrivent le comportement du convertisseur dans chacune des configurations. Le vecteur d'état des différents modèles est composé par les courants et les tensions des éléments réactifs du circuit qui représentent

l'énergie emmagasinée (tels que les inductances et les condensateurs), et l'entrée des modèles est donnée par la tension d'alimentation V_e et la grandeur de commande correspondant au rapport cyclique d .

Dans ce qui vient on va modéliser le convertisseur dévolteur tenant en considération toutes les pertes inhérentes aux éléments du circuit électrique pour améliorer la précision du modèle; celle-ci consiste habituellement à manipuler des expressions mathématiques complexes [5].

II.2.1 Modèle instantané de convertisseur abaisseur

La figure 1.13 présente le circuit de base équivalent d'un convertisseur dévolteur.

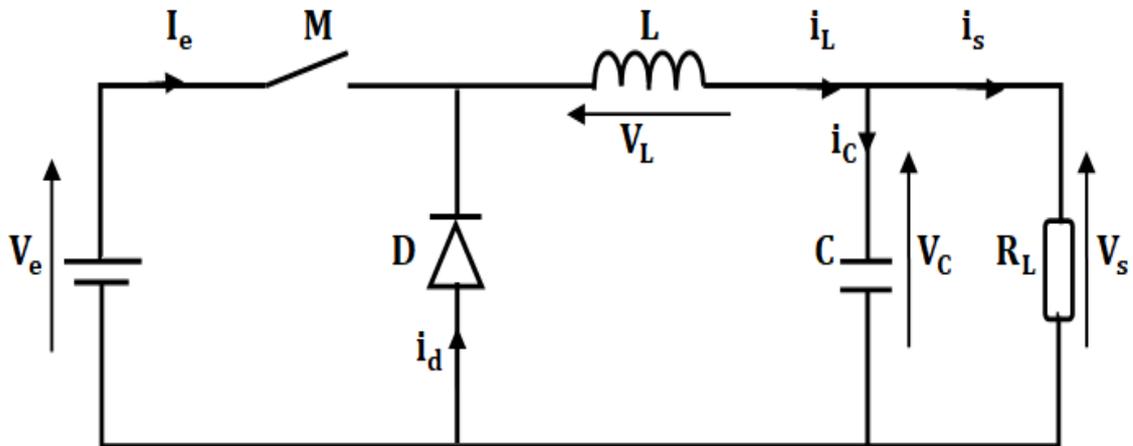


Figure II.1 : Circuit équivalent de convertisseur Buck

II.2.2 Mode de conduction continu.

En mode de conduction continue (CCM), en fonction de la position de l'interrupteur détecté M , il y a deux états du circuit associés aux positions fermée et ouverte, représentés espace d'état par les dynamiques suivantes :

Lorsque ($u=1$) l'interrupteur M se trouve dans la position fermée et D est ouvert Le circuit équivalent d'hacheur abaisseur est comme suit :

Où u est l'état de commutation, lorsque $u = 1$, l'interrupteur M est fermé, et lorsque $u = 0$, M est ouvert

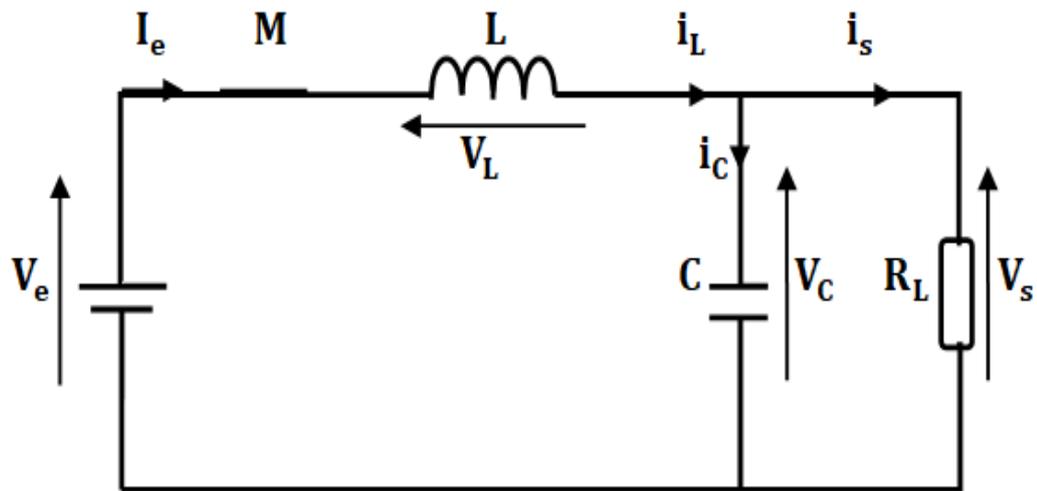


Figure II.2 : Schéma de convertisseur abaisseur (Buck), lorsque M est à l'état ON.

En appliquant les lois des nœuds et des mailles, on obtient les équations suivantes :

- Lois des Mailles

$$V_e(t) - V(t)_L - V_C(t) = 0 \quad \text{II.1}$$

$$V(t)_L = V_e(t) - V_C(t) \quad \text{II.2}$$

$$\frac{L di_L(t)}{dt} = V_e(t) - V_C(t) \quad \text{II.3}$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{1}{L} V_e(t) - \frac{1}{L} V_C(t) \quad \text{II.4}$$

- Lois des Nœuds :

$$i_L(t) = i_C(t) + i_s(t) \quad \text{II.5}$$

$$i_L(t) = \frac{dq(t)}{dt} + \frac{V_S(t)}{R} \quad \text{II.6}$$

$$i_L(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt} + \frac{V_C(t)}{R} \quad \text{II.7}$$

$$\frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} V_C(t) \quad \text{II.8}$$

Une fois que les équations différentielles sont obtenus, en écrit le modèle d'état comme suit :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dV_C(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_e(t) \quad \text{II.9}$$

Où est la représentation de l'espace d'état (le condensateur de tension est en sortie) équivalent

Circuit lorsque l'interrupteur est sur ON s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [V_e] \\ v_c(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} + [0][V_e] \end{cases} \quad \text{II.10}$$

Dans la seconde configuration, lorsque l'interrupteur est dans la position ouverte, la diode devient passante et l'énergie emmagasinée est restituée à la charge « R » et le condensateur « C », ce qui se traduit par la diminution de la valeur du courant. Pour l'analyse nous pouvons remplacer la diode par un conducteur et supprimer le commutateur et la source de tension « V_e », le circuit en résultat est composé de deux mailles et il est décrit par les équations et le schéma suivants avec $V_e = 0$ et $i_L > 0$

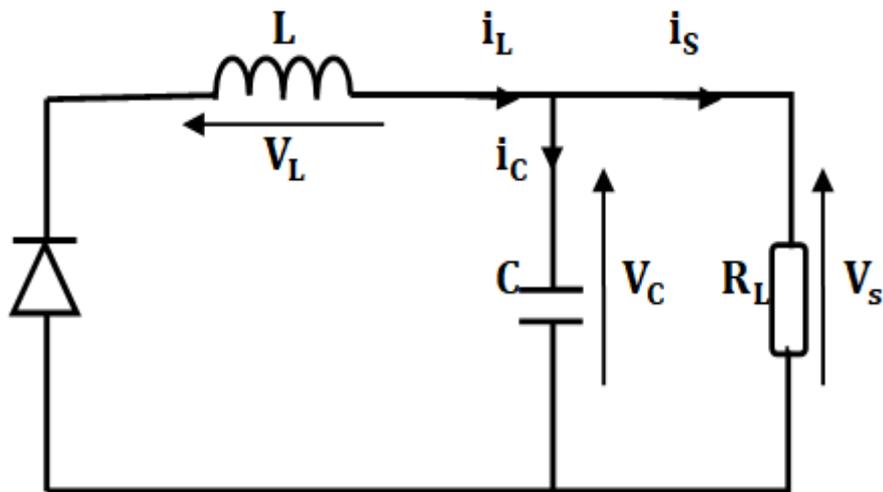


Figure II.3 : Schéma de convertisseur abaisseur (Buck), lorsque M est à l'état OFF.

- Lois des Mailles :

$$V_L(t) + V_C(t) = 0 \quad \text{II.11}$$

$$V_L(t) = -V_C(t) \quad \text{II.12}$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{1}{L}V_C(t) \quad \text{II.13}$$

- Lois des Nœuds:

$$i_L(t) = i_C(t) + i_S(t) \quad \text{II.14}$$

$$i_L(t) = \frac{dq(t)}{dt} + \frac{V_S(t)}{R} \quad \text{II.15}$$

$$i_L(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt} + \frac{V_C(t)}{R} \quad \text{II.16}$$

$$\frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{1}{C} I_L - \frac{1}{RC} V_C(t) \quad \text{II.17}$$

On résume les équations (III.4) et (III. 5) dans le modèle suivant:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dV_C(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_e(t) \quad \text{II.18}$$

Dans le mode où le commutateur est ouvert et « $\langle i_L \rangle > 0$ » la tension « V_C » dans le condensateur augmente et l'intensité « i_L » diminue; si le temps T_{off} est assez long il sera un moment où il est annulé ($i_L = 0$), plus tard le condensateur essayant de décharger par la diode, ce qui n'est pas possible, car elle devient bloquée, dans ce cas nous pouvons considérer le circuit réduit à une maille simple décrite par les équations suivantes :

$$\frac{di_L(t)}{dt} = 0 \quad \text{II.19}$$

$$\frac{dV_C(t)}{dt} = -\frac{1}{RC} V_C(t) \quad \text{II.20}$$

Et leur modèle est comme suit :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dV_C(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_e(t) \quad \text{II.21}$$

L'équation (II.22) le décrit : modèle de l'amplitude moyenne du signal du convertisseur abaisseur DC-DC il est clair que le modèle du système est linéaire, donc les méthodes de conception du contrôleur linéaire sont les suivantes disponible.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V_e] \\ v_C(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + [0][V_e] \end{cases} \quad \text{II.22}$$

II.3 Modèle moyen

Dans la Figure (II.3) nous avons :

$$\begin{cases} i_L = \frac{1}{L} \int v_L(t) dt \\ v_C = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} i_L(t) = \frac{1}{L} [-v_C(t)] \text{ (ou } v_C(t) = v_o) \\ v_C(t) = \frac{1}{C} [i_L(t) - i_o(t)] = \frac{1}{C} \left[i_L(t) - \frac{v_C(t)}{R_L} \right] \end{cases} \quad \text{II.23}$$

Où est la représentation spatiale de l'état du circuit correspondant lorsque l'interrupteur est éteint (pendant $T_{off} = (1 + D) \cdot T_s$, T_s : période de commutation) peut être écrite comme l'équation (II.24).

Les représentations de l'espace d'états (équations (II.10) et (II.24)) sont appelées : grands modèles de signal (modèles instantanés) sous $\{T_{on} = (D \cdot T_s)\}$ et $\{T_{off} = (1 + D) \cdot T_s\}$. Utilisation de l'espace d'état méthode moyenne, consiste à calculer les valeurs moyennes de toutes les variables d'état (X A la place de X) période de commutation T_s , si la période de commutation T_s est très petite par rapport au temps valeurs constantes des éléments d'accumulation ($T_s \ll L/R$ et $T_s \ll (RC)$) cette moyenne peut être important.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{i}_L(t) \\ \dot{v}_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V_e] \\ v_C(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + [0] [V_e] \end{cases} \quad \text{II.24}$$

Pour expliquer cette méthode, prenons par exemple le courant inductif dans le temps.

Etat transitoire et constant, comme décrit dans la Figure (II.4)

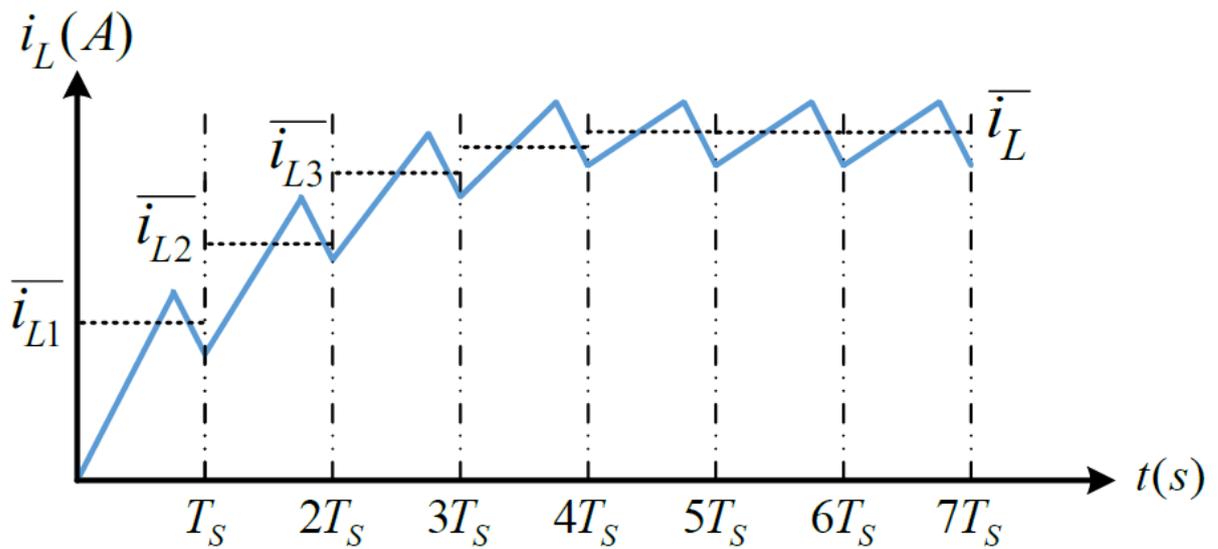


Figure II.4 : Courant d'inductions continues et sa valeur moyenne [6].

La valeur moyenne du courant d'induction pendant T_s est calculée comme suit :

$$\bar{i}_L = \frac{\int_0^{T_s} i_L(t) dt}{T_s} = \frac{\int_0^{dT_s} i_L(t)_{T_{on}} dt + \int_{dT_s}^{T_s} i_L(t)_{T_{off}} dt}{T_s} = d \cdot i_L(t)_{T_{on}} + (1 - d) \cdot i_L(t)_{T_{off}} \quad \text{II.25}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_L \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_L(t) \\ \bar{v}_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \mathbf{d} + \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} (1 - \mathbf{d}) \quad \text{II.26}$$

En substituant les équations (II.10), (II.24) à (II.26) nous verrons :

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [V_e] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [d] \quad \text{II.27}$$

L'équation (II.27) montre le grand modèle de signal du convertisseur DC-DC Buck, l'entrée de commande dans ce modèle est considérée comme d (rapport cyclique) au lieu de la tension d'entrée V_e . En tant que paramètre système, il est plus logique de sélectionner le rapport cyclique comme variable de contrôle d'entrée en termes de méthode de contrôle en fait V_I généralement toujours.

La même méthode est utilisée pour trouver l'équation de sortie, en raison de la non-existence effet direct (la matrice D est nulle), l'équation de sortie est toujours la même que celle indiquée dans équations (II.24) et (II.10)

L'équation (II.28) le décrit : modèle de l'amplitude moyenne du signal du convertisseur abaisseur DC-DC il est clair que le modèle du système est linéaire, donc les méthodes de conception du contrôleur linéaire sont les suivantes disponible.

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{i}_L(t) \\ \dot{v}_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [V_e] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_L C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_e}{L} \\ 0 \end{bmatrix} [d] \\ v_C(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + [0][V_e] \end{cases} \quad \text{II.28}$$

II.4 Simulation de convertisseur DC-DC

Simulation de convertisseur abaisseur avec MATLAB/Simulink : c'est un convertisseur dans lequel la tension continue est réduite au niveau requis par une commutation haute fréquence dans des commutateurs à semi-conducteurs tels que MOSFET ou IGBT. Ce type de convertisseur est également appelé convertisseur abaisseur. Lorsque nous parlons d'alimentation régulée, ce n'est pas trop difficile du côté AC, mais du côté DC, c'est plus difficile et cela n'est possible qu'avec la commutation haute fréquence d'un commutateur à semi-conducteur. Ce type d'onduleur est souvent utilisé dans une alimentation à découpage et dans un système de commande de moteur à courant continu. Le schéma de principe du convertisseur est illustré à la figure (II.1).

II.4.1 Principe de fonctionnement de la simulation du convertisseur abaisseur

Ce convertisseur DC-DC fonctionne dans deux états, l'un lorsque l'interrupteur est fermé et l'autre lorsque l'interrupteur est ouvert. Si le commutateur est à l'état fermé, la diode peut être inversée, puis la source d'entrée alimente l'inductance et la charge de sortie. De même, lorsque l'interrupteur est à l'état ouvert, l'inductance se décharge à travers la diode et transfère une partie de son énergie stockée à la charge de sortie. Parce que le commutateur est ouvert et proche de la haute fréquence, une séquence harmonique plus élevée peut être créée, qui est filtrée par un filtre passe-bas.

PWM haute fréquence (modulation de largeur d'impulsion) est utilisé pour l'activer ou le désactiver. Le rapport cyclique de ce PWM est calculé selon la formule, où D est le rapport cyclique, V_o est la tension de sortie et V_{in} est la tension d'entrée. Nous pouvons voir que la tension de sortie est directement proportionnelle au rapport cyclique D , ce qui signifie que le rapport de travail augmente, puis la tension de sortie augmente également, tout comme lorsque le rapport cyclique diminue, la tension de sortie diminue également. Nous le prouvons en utilisant le modèle MATLAB Simulink. [18].

II.4.2 Modèle MATLAB Simulink dans la simulation d'un convertisseur abaisseur :

Les paramètres de convertisseur dévolteur dans le tableau suivant :

Tableau 1 ; Des paramètres de convertisseur dévolteur

R	10 Ω
L	154 mH
C	200 F
V_e	48 V

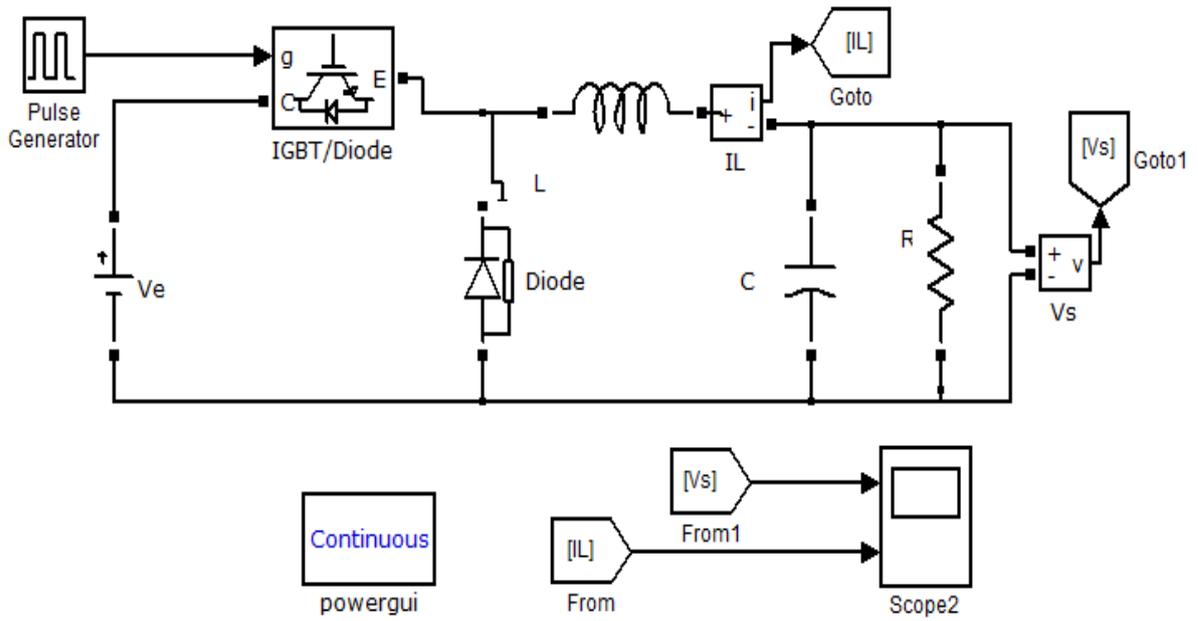


Figure II.5 : Modèle MATLAB Simulink dans la simulation d'un convertisseur abaisseur

Résultats de simulation :

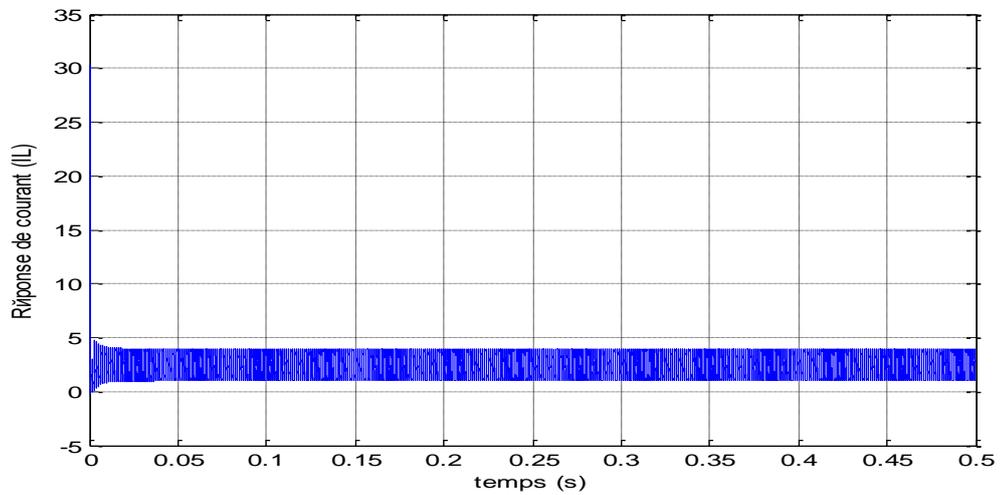


Figure II.6 : réponse de courant (IL)

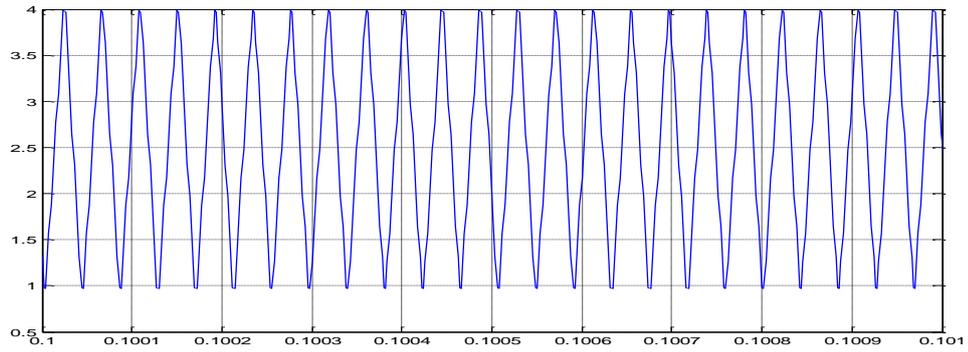


Figure II.7 : Zoom réponse de courant (IL)

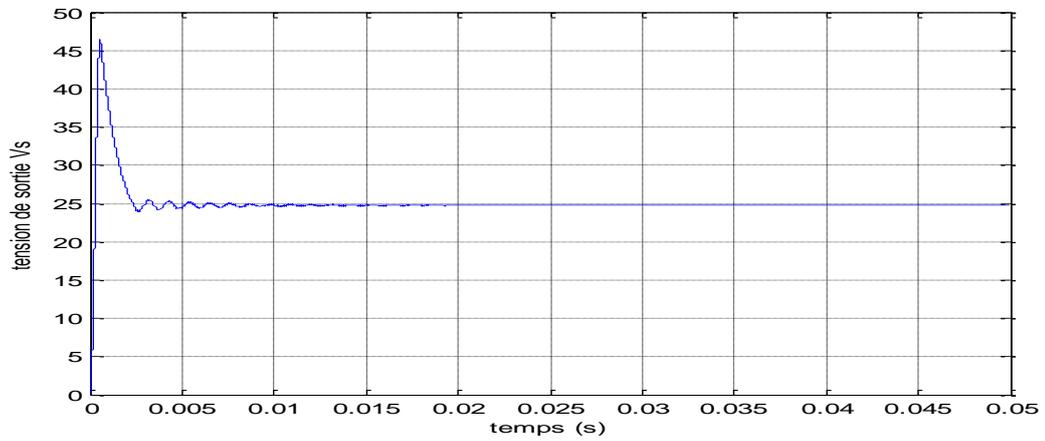


Figure II.8 : Réponse de tension de sortie Vs

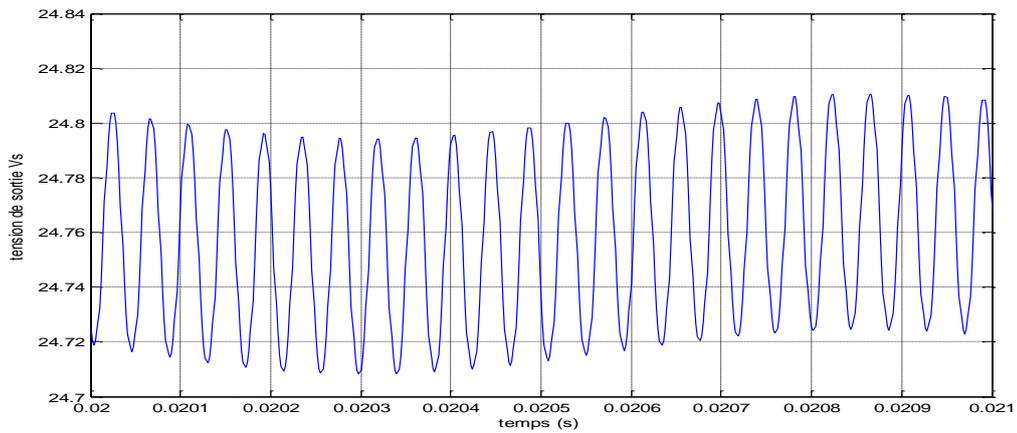


Figure II.9 : Zoom Réponse de tension de sortie Vs

II.4.3 Modèle de convertisseur abaisseur de source et de charge :

Les charges dans un micro-réseau résidentiel autonome à courant continu se comportent comme une CPL ou une charge résistive. En général, les CPL sont composés d'un convertisseur qui ajuste la tension d'entrée de charge finale et d'un filtre d'entrée. La plupart des appareils électroménagers alimentés par 230 V c.a. sont munis d'un adaptateur qui comprend une alimentation de commutation. Dans le cas d'un ordinateur, par exemple, il y a un bloc d'alimentation composé d'un redresseur suivi d'un convertisseur DC-DC des tensions de sortie de +12 V, -12 V, +5 V, et -5 V. Étant donné que l'ordinateur sera, Le composant est fournie par une tension de courant continu. Par conséquent, l'unité d'alimentation fonctionnera comme une CPL [19].

Par conséquent, pour notre étude de cas, nous considérons une partie du micro-réseau à courant continu résidentielle illustrée à la figure (II.8) Cette section est composée d'un convertisseur à source unique (buck) qui est réglé à la fois en courant et en tension, la charge étant soit une résistance soit une CPL.

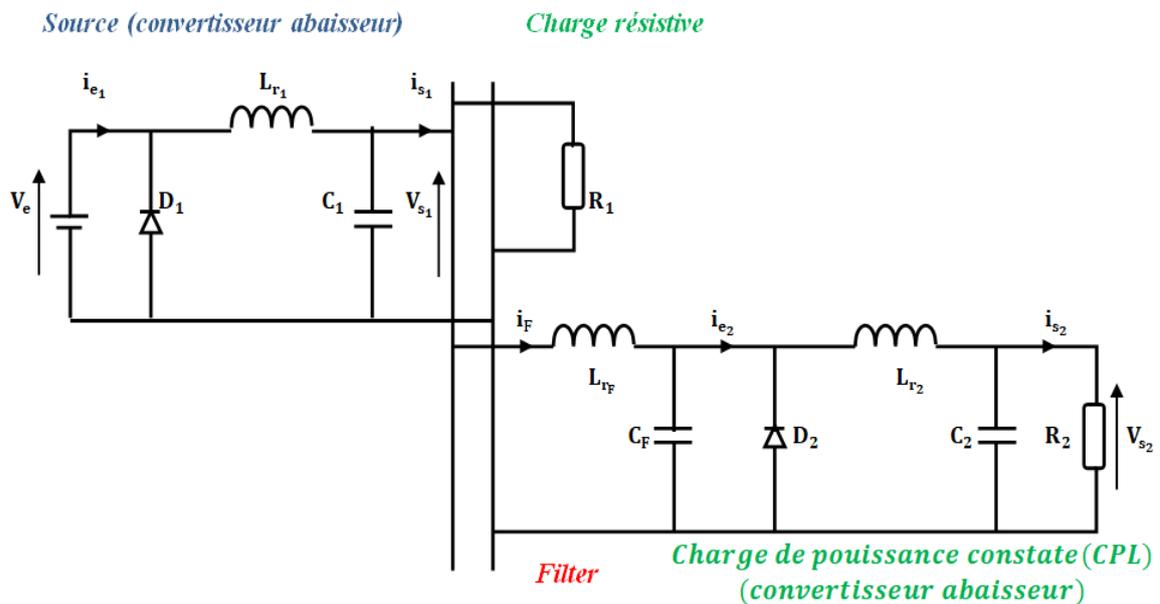


Figure II.10 : convertisseur abaisseur de source connecte au CPL

II.5 Régulateur PID :

Le régulateur industriel est un appareil destiné à assurer une bonne régulation dont les paramètres de sa fonction de transfert sont réglables et adaptables au procédé à contrôler. Le régulateur est constitué d'un élément appelé soustracteur ou comparateur qui effectue l'écart entre la mesure et la consigne et d'un correcteur. Ce dernier va générer une valeur de sortie en fonction de l'écart constaté par le comparateur pour arriver à corriger l'évolution de la grandeur à maîtriser du procédé. L'élaboration du signal de commande reste subordonnée à la structure interne du correcteur (sa fonction de transfert). L'algorithme ou la loi de commande du régulateur le plus classique (standard) est obtenu par l'association des trois actions élémentaires : proportionnelle (P), intégrale (I) et dérivative (D). Par le moyen de la combinaison des trois actions principales citées précédemment, on obtient d'autres correcteurs, à savoir : correcteur à action proportionnelle et intégrale (PI) ; correcteur à action proportionnelle et dérivée (PD) et correcteur à action proportionnelle, intégrale et dérivée (PID) [12].

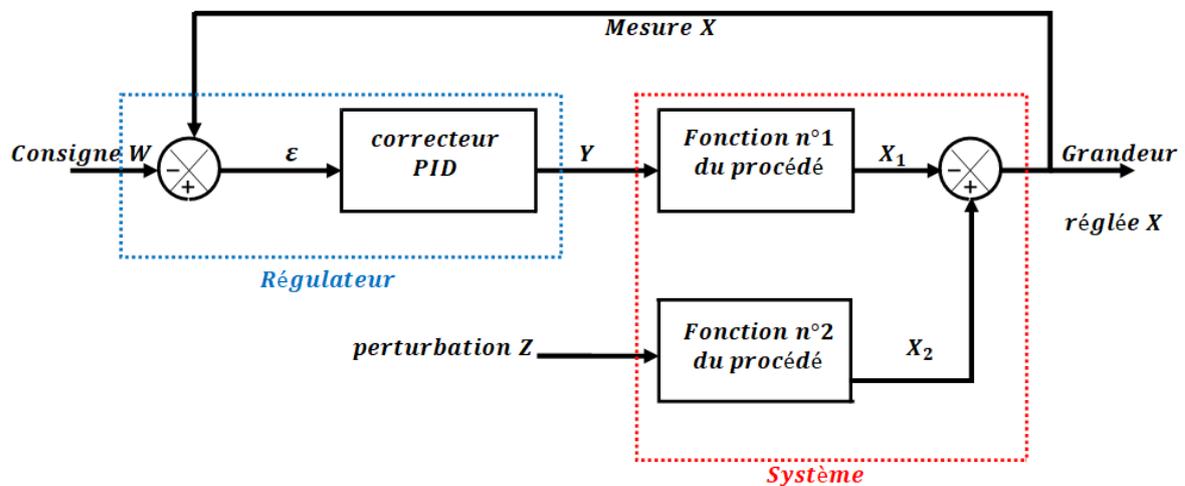


Figure II.11 : Schéma d'un régulateur PID [8].

Comme nous l'avons vu dans la section Introduction, de nombreuses stratégies de contrôle ont été mises en œuvre dans un système de convertisseur Buck. Toutefois, en raison de leur simplicité, les régulateurs proportionnels à intégrale (PID) sont les plus utilisés dans les environnements industriels [20].

II.5.1 Actions proportionnelle, intégrale et dérivée (Correcteur PID) :

L'algorithme de calcul du gouverneur du PID est composé de trois transactions distinctes.

Proportionnalité (P), où la valeur proportionnelle représente la réponse à l'erreur actuelle.

Intégration (I), où la valeur intégrative est proportionnelle à la persistance de la faute dans le temps.

Différentiel (D) dans lequel la valeur différentielle est proportionnelle au taux de variation de l'erreur

Ce qui précède peut se résumer en trois fonctions principales:

Les capteurs, parfois appelés émetteurs, assurent la fonction de mesure. Ces capteurs comprennent des capteurs de chaleur, des capteurs de pression, des capteurs de mouvement, des capteurs de courant, des capteurs de résistance, des capteurs de fréquence, et ainsi de suite. Le type d'expéditeur est déterminé par le processus à contrôler.

Fonction de comparaison et de calcul : La valeur mesurée est comparée à la valeur prédéfinie à atteindre via l'expéditeur. PV indique la valeur mesurée, tandis que SP indique la valeur ajustée. Le résultat de la comparaison est une valeur d'erreur, qui est transmise à un ou plusieurs des éléments de contrôle précédents, et le résultat du traitement ou du calcul est envoyé à la section de contrôle final pour fonctionner.

La fonction de contrôle finale est différente selon le processus. Il y a des soupapes qui ouvrent et ferment les tuyaux, des moteurs qui contrôlent la vitesse et la direction, des radiateurs qui contrôlent la chaleur, et ainsi de suite [21].

II.5.2 Les trois principaux types de style de contrôle PID

- a) PID série ou de type interactif : dans lequel les éléments ou les limites de I et D sont entièrement basés sur la limite P, ce qui signifie qu'ils ne fonctionnent pas sans elle.
- b) Type de branche ou indépendant PID parallèle : les fonctions P, I et D sont exécutées indépendamment les unes des autres et ensuite regroupées en une seule sortie
- c) PID mixte : une combinaison de série et de parallèle.

II.5.3 Les trois types peuvent également être étudiés en boucle (ouverte et fermée)

Si la valeur mesurée est prise en compte, la boucle est appelée fermée. Si elle est isolée, la mire est appelée boucle ouverte.

Cela sera rendu disponible sur PID de type parallèle ou branche. La fonction de sortie lui est donnée avec la relation

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad \text{II.29}$$

a) Contrôleur proportionnel

La limite proportionnelle, aussi appelée inflation, fait en sorte que la valeur de sortie change d'un montant directement proportionnel à la valeur d'erreur actuelle. L'ajustement de la réponse proportionnelle consiste à multiplier la valeur de l'erreur par une valeur K_p fixe (réglable), aussi appelée amplification proportionnelle. La plage proportionnelle est un autre terme utilisé dans certains systèmes de contrôle. Bande proportionnelle, généralement représentée en pourcentage de PB et associée à la limite proportionnelle de la relation :

$$K_p = \frac{100}{PB\%} \quad \text{II.30}$$

La sortie de la limite proportionnelle doit être

$$P_{out} = K_p \varepsilon(t) \quad \text{II.31}$$

Où :

P_{out} : Limite de sortie proportionnelle

K_p : Amplification proportionnelle

E : Erreur et délai

Si la valeur d'inflation proportionnelle est élevée, il en résultera un changement important de la production à une certaine valeur d'erreur. Si cette valeur est trop grande, le système devient instable.

Il convient de noter que la limite proportionnelle ne peut pas éliminer l'erreur ou le décalage sans une limite intégrative. Ce type de contrôle de la chaleur et d'autres applications telles que le réglage du niveau de liquide dans les réservoirs sont utilisés si le processus d'élimination des défauts n'est pas important.

b) Régulateur intégral

La limite intégrale est parfois appelée remise à zéro en raison de sa capacité à supprimer l'erreur restante que la limite proportionnelle ne peut pas annuler. La raison peut être comprise en regardant la boucle ouverte où nous voyons que la limite intégrative continue de changer vers le haut ou vers le bas proportionnellement à la quantité d'erreur avec et ne s'arrête pas au fil du temps sauf si l'erreur est zéro. Pratiquement la limite complémentaire s'arrête quand elle atteint le stade de gratification qui est la grande puissance de la production opérationnelle.

La limite intégrale a une limite réglable fixe dans les opérations d'alignement et s'appelle

$$K_i = \frac{1}{T_i} \quad \text{II.32}$$

T_i est défini comme le temps nécessaire pour sortir pour la même erreur ou la même valeur de revenu à partir du début de l'erreur par étape.

La limite complémentaire est donnée à la relation

$$I_{\text{out}} = K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \quad \text{II.33}$$

I_{out} : Limite de sortie intégrée

K_i : Amplifier l'intégration

La limite intégrative avec limite proportionnelle est largement utilisée dans les applications industrielles pour accélérer le processus de réponse et supprimer les erreurs lorsqu'elle est

stable. Cependant, la limite intégrative peut faire sauter le dépassement au-dessus de la valeur à atteindre en raison de son agrégation de données d'erreur accumulées.

c) Contrôleur différentiel

La limite différentielle est parfois appelée taux parce qu'elle n'apparaît que lorsqu'il y a un changement de la valeur d'erreur par rapport au temps et qu'elle correspond expressément au taux de ce changement. La limite différentielle a une variable constante et est symbolisée mathématiquement par K_d

La limite différentielle peut être exprimée mathématiquement avec la relation :

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} \varepsilon(t) \tag{II.34}$$

Où :

D_{out} : Limite de sortie différentielle

K_d : Amplification différentielle

Bien que la limite différentielle améliore parfois le processus de contrôle, elle est fortement affectée par le bruit et peut causer l'instabilité du système. C'est pourquoi la limite différentielle de l'industrie n'est utilisée que rarement et avec beaucoup de prudence.

II.5.4 Modèle mathématique du convertisseur abaisseur avec PID

Les limites proportionnelles, intégratives et différentielles fonctionnent ensemble pour assembler et donner une sortie à l'élément de contrôle PID.

Le schéma illustré par la Figure II.2 nous a aidés pour obtenir ces informations.

En utilisons la loi de Kirchhoff et la loi des nœuds, le comportement de ce circuit va d'écrit comme suit :

$$\begin{cases} V_e = L \frac{di_L}{dt} + V_s \\ i_L = i_s + i_c = \frac{V_2}{R} + c \frac{dV_s}{dt} \end{cases} \text{ Avec } V_s = V_c \text{ et } i_c = c \frac{dV_s}{dt} \tag{II.35}$$

A partir de la Figure II.3 on aperçoit que le comportement de ce circuit va d'écrit comme suit

$$\begin{cases} 0 = L \frac{di_L}{dt} + V_s \\ i_L = i_s + i_c = \frac{V_s}{R} + c \frac{dV_s}{dt} \end{cases} \quad \text{II.36}$$

En combinant les deux équations précédant (II.23) et (II.24) :

$$\begin{cases} V_e = L \frac{di_L}{dt} + V_s \\ i_L = \frac{V_s}{R} + c \frac{dV_s}{dt} \end{cases} \quad \text{II.37}$$

Avec :

U : représente l'état de l'interrupteur M $\begin{cases} u = 0 & \text{lorsque l'interrupteur est fermé} \\ u = 1 & \text{lorsque l'interrupteur est ouvert} \end{cases}$

L'équation (II.25) décrivant le modèle général du convertisseur abaisseur fonctionnant en mode continu.

On peut combiner les deux parts de l'équation (II.25) comme suite :

$$V_e = L \frac{di_L}{dt} + V_s = L \frac{d}{dt} \left(\frac{V_s}{R} + c \frac{dV_s}{dt} \right) + V_s \quad \text{II.38}$$

$$V_e = Lc \frac{d^2V_s}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{dV_s}{dt} + V_s \quad \text{II.39}$$

Donc :

$$\frac{d^2V_s}{dt^2} = \frac{-1}{Rc} \frac{dV_s}{dt} - \frac{1}{Lc} V_s + \frac{1}{Lc} V_e \quad \text{II.40}$$

Le correcteur intégral est en général associé au correcteur proportionnel. La loi de commande corrigée est donnée sous la forme suivante :

$$y(t) = k_p \varepsilon(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \quad \text{II.41}$$

Où :

$$Y(p) = k_p \varepsilon(p) + \frac{k_i}{p} \varepsilon(p) \rightarrow Y(p) = \varepsilon(p) \left[k_p + \frac{k_i}{p} \right] \quad \text{II.42}$$

Où encore :

$$\frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = \left[k_p + \frac{k_i}{p} \right] = \frac{pk_p + k_i}{p} \quad \text{II.43}$$

k_p : Gain proportionnel, augmenté pour accélérer la réponse, mais dans la mesure qui maintient le système stable.

k_i : Gain intégré, pour accélérer le processus de suppression de l'erreur.

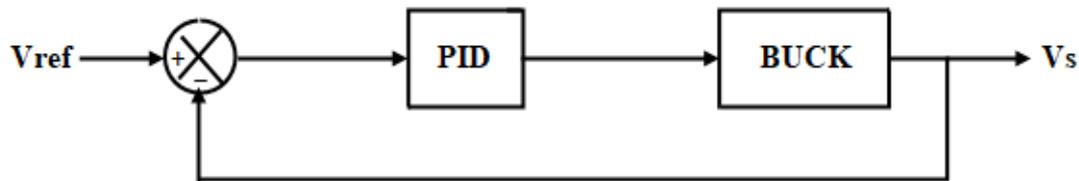


Figure II.12 : Contrôleur PI pour un convertisseur DC/DC abaisseur.

En applique le transformé de La place sur l'équation (II.27) ::

$$V_e(p) = Lcp^2(p) + \frac{L}{R}pV_s(p) + V_s \quad \text{II.44}$$

$$F(p) = \frac{V_s(p)}{V_e(p)} = \frac{\frac{V_s}{Lc}}{p^2 + \frac{1}{Rc}p + \frac{1}{Lc}} \quad \text{II.45}$$

Et sur l'équation (II.40) donc la fonction du transfert du régulateur PI est écrite comme suite

$$R(p) = \frac{k_i + k_p p}{p} \quad \text{II.46}$$

Donc, le système aperçu dans la figure (II.23) sera d'écrire par :

$$T(p) = \frac{R(p) * F(p)}{1 + R(p) * F(p)} = \frac{\frac{V_s}{Lc} (K_I + pK_P)}{p^3 + \left(\frac{1}{Rc}\right)p^2 + \left(\frac{1 + K_P * V_s}{Lc}\right)p + \frac{V_s}{Lc}k_i} \quad \text{II.47}$$

II.5.5 Rôle du régulateur

Quelles que soient les perturbations du processus, l'organisme de réglementation doit maintenir une mesure égale à celle du destinataire. Le réglage des paramètres de son algorithme est basé sur les réponses attendues en termes de temps de réponse et de précision dynamique pendant ces perturbations. Cependant, il y a eu quelques changements dans les destinataires.

II.5.6 Commande du convertisseur abaisseur par un régulateur PI

Notre hélicoptère est contrôlé à l'aide de la technologie PI. (Proportionnel, intégrateur), qui permet la direction assistée parce que la loi de régulation de ce correcteur dans les détails du concepteur est ce qui contrôle le convertisseur en boucle fermée. L'entrée de ce correcteur est une comparaison (erreur) entre le signal de valeur de sortie et le signal de référence de tension requis (tension de charge). La sortie de ce moniteur est comparée à une porteuse, cette technique est appelée PWM, le résultat de ce commutateur de commande de comparaison [8].

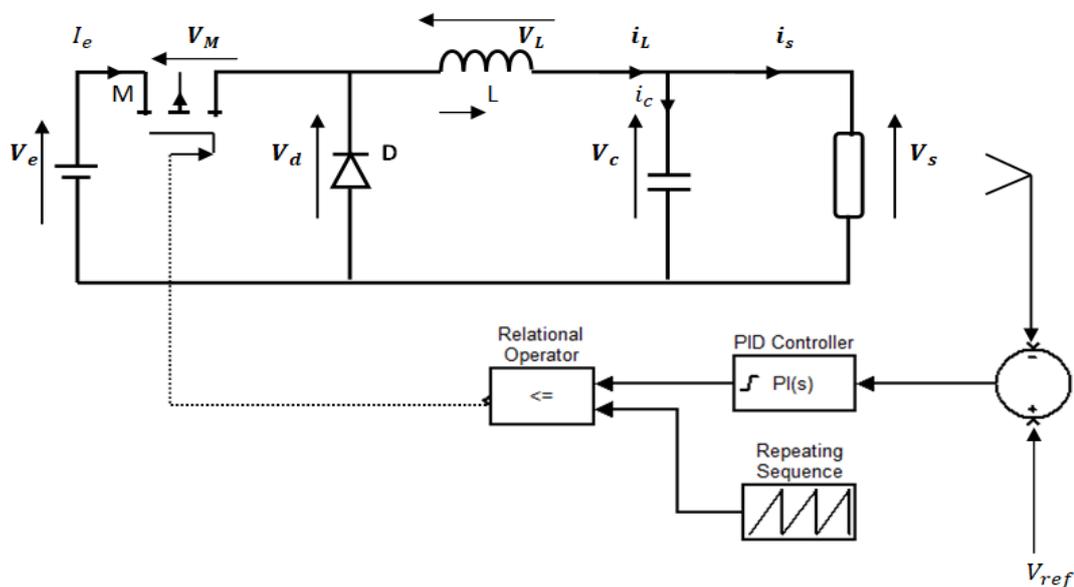


Figure II.13 : Commande d'un hacheur abaisseur utilisant PI.

II.6 Principe de la commande PWM

Le principe de base de la commande PWM est basé sur une onde solide tangulaire étant coupée en deux. Une série de niches avec tension de courant constante et de taille changeante

a formé la tension de sortie. Pour obtenir un signal PWM, une comparaison de deux signaux est plus couramment utilisée.

- Le premier, désigné comme signal de référence, est un signal continu qui varie entre deux seuils déterminés par l'application.
- Le second, appelé signal de porteuse, établit la cadence de commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. Par rapport au signal de référence, il s'agit d'un signal à haute fréquence.
- L'intersection de ces signaux détermine les temps de commutation de l'interrupteur.

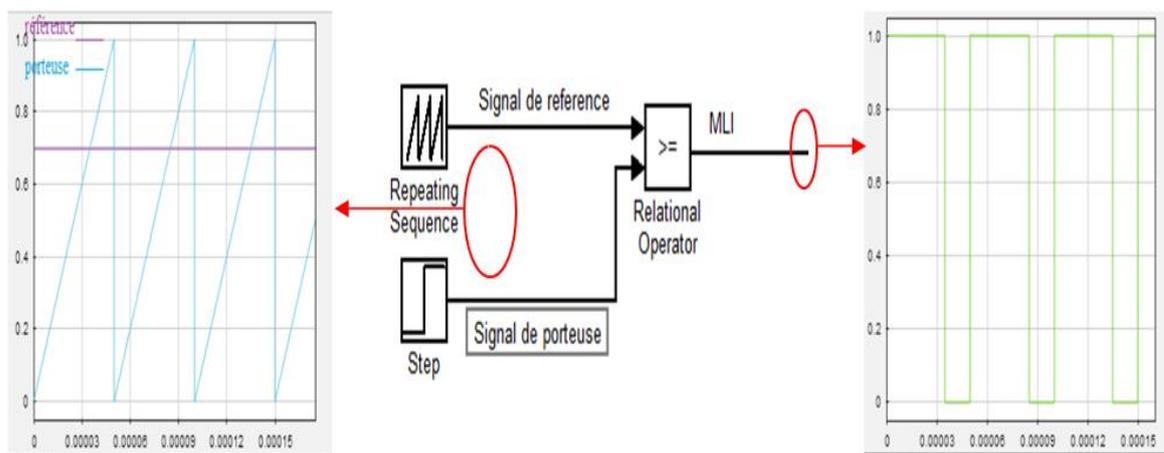


Figure II.14 : MLI schéma avec signaux d'entrée et sortie.

Si signal de réf > signal de porteuse alors $S = 1$

Si signal de porteuse > signal de réf alors $S = 0$

Conception d'un convertisseur abaisseur

L'évaluation des performances de la commande classique appliquée au convertisseur DC-DC se fait dans l'environnement MATLAB/SIMULINK dans différentes situations de fonctionnement. On résume les paramètres de convertisseur abaisseur (Buck) dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Paramètres d'un convertisseur dévolteur(Buck).

V_e	48 V
L	5 e-3 H
R	10 Ω
C	100 μ F

Si en supposé: $K_p = 5$; $K_i = 100$;

Avec K_p et K_i sont des valeurs positive.

II.7 Test en boucle fermée

Le test a été réalisé pour étudier le comportement du modèle obtenu par représentation de l'espace d'état : simple changement de cycle de service d en boucle fermée.

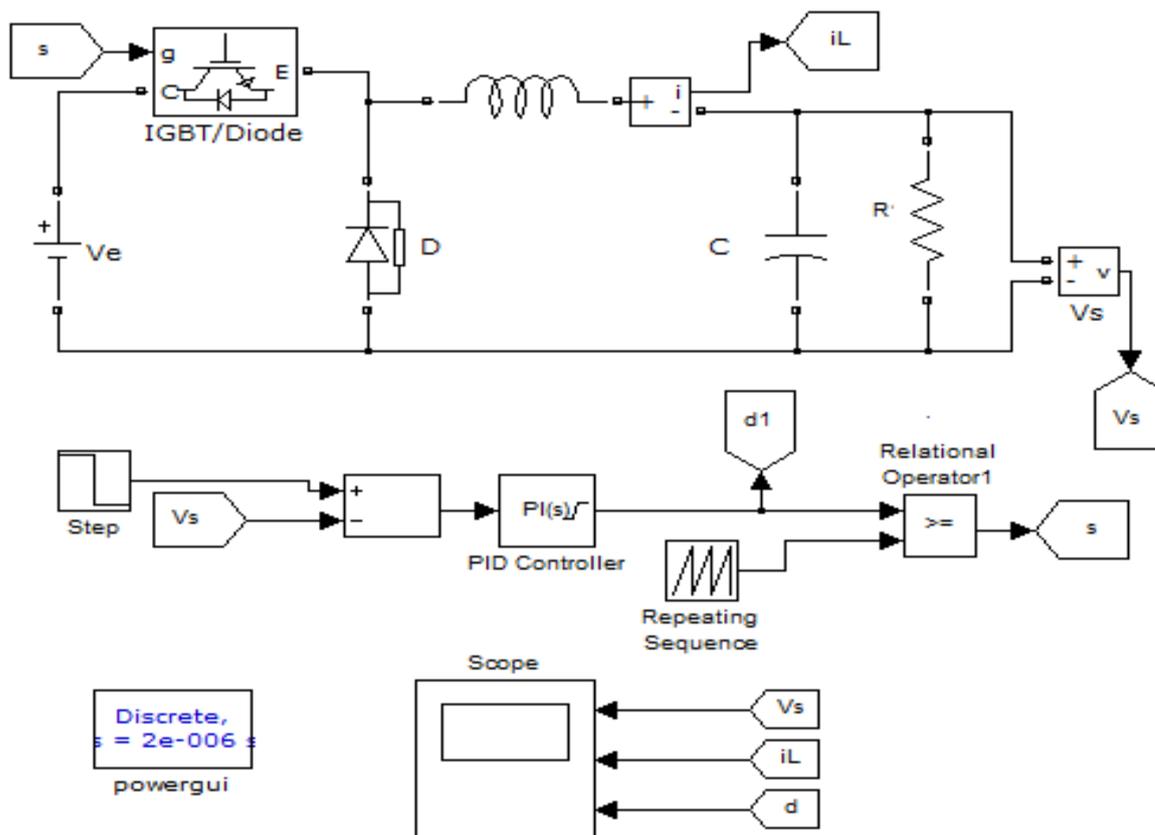


Figure II.15 : Circuit du convertisseur abaisseur implémenté avec MATLAB /Simulink.

Résultat :

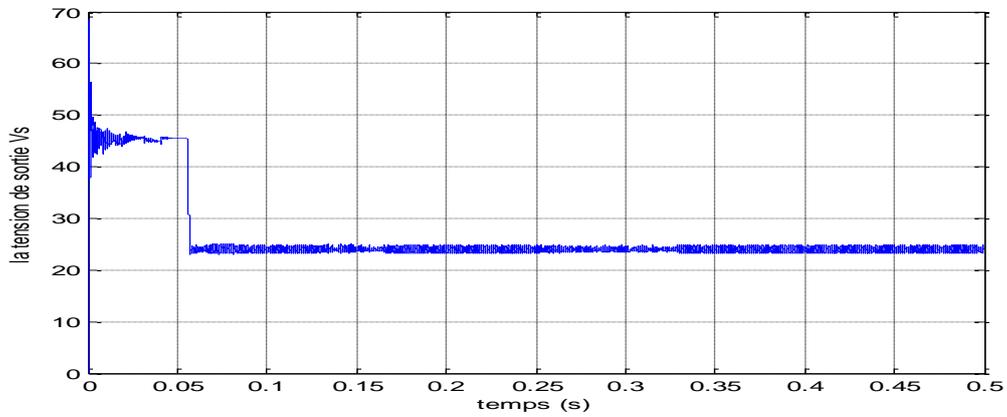


Figure II.16 : la tension de sortie V_s ($R=10\Omega$).

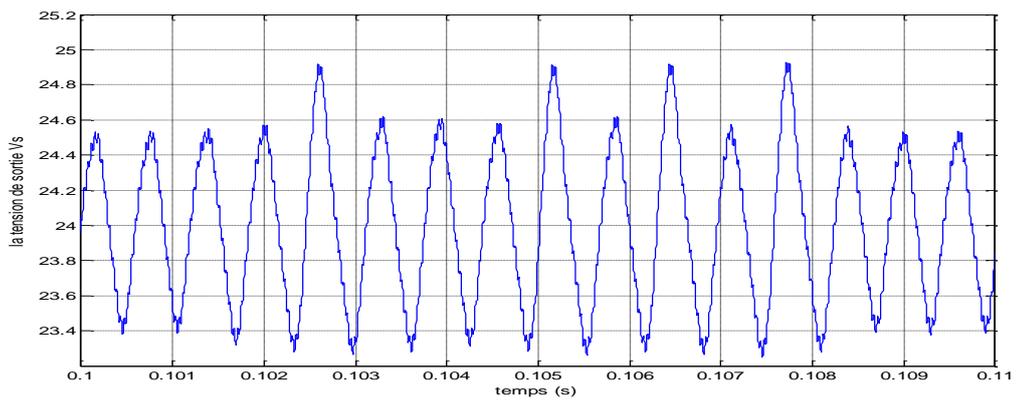


Figure II.17 : Zoom la tension de sortie V_s ($R=10\Omega$).

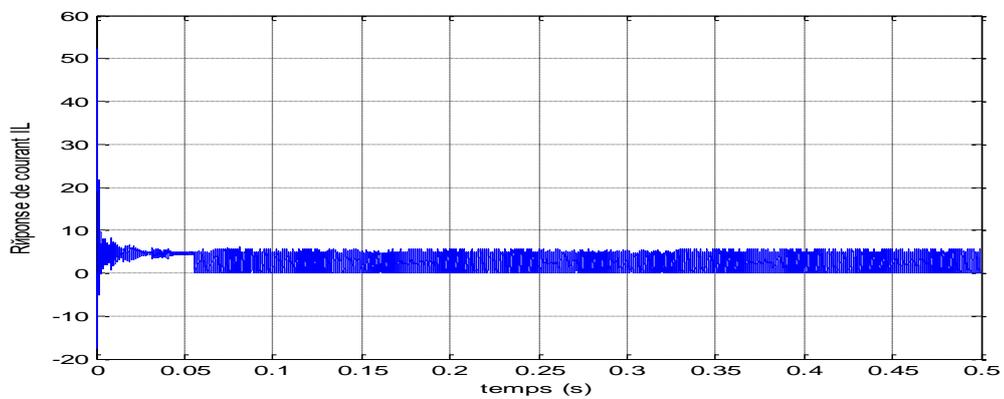
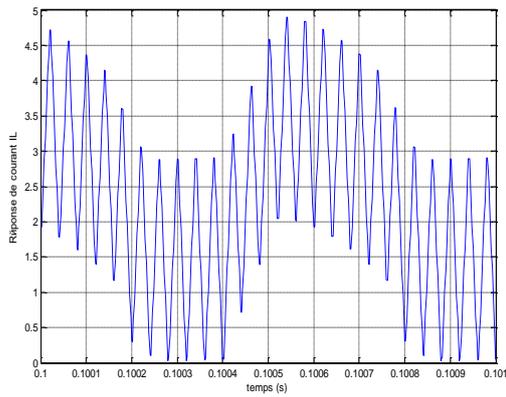
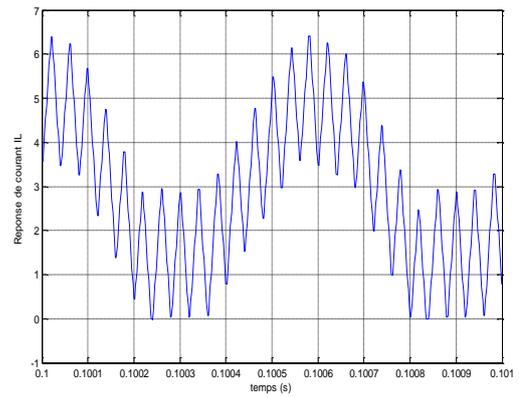


Figure II.18 : Réponse de courant I_L ($R=10\Omega$).



Le courant IL ($R=10 \Omega$).



Le courant IL ($R=8 \Omega$).

Figure II.19 : Zoom de courant IL

Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre la modélisation mathématique et la simulation de convertisseur abaisseur. ensuite nous avons parlé sur le régulateur PID avec ses actions et sa relation avec ce convertisseur. Enfin le principe de commande PWM

CHAPITRE III :

Simulation et résultats à charge de puissance constante (CPL)

Chapitre III Simulation et résultats à charge de puissance constante (CPL)

III.1 Introduction

La simulation du système nous permet d'avoir une bonne et réelle vision de son chemin avant de l'implémenter dans le monde réelle(terrain). Cette simulation permet très bon résultats .

Nous allons voir dans ce chapitre la simulation de micro-réseau approvisionnement la charge a puissance constante.

III.2 Simulation du micro-réseau approvisionnement a CPL

On résume les paramètres dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Les paramètres d'un micro-réseau approvisionnement CPL.

V_e	48 V
L_1	5 e-3 H
L_2 , L_3	0.5 e-3 H
L_F	10 e-6 H
C_1 , C_2 , C_3	100 F
R_1	10 Ω
R_2	4 Ω
R_3	8 Ω

III.2.1 Le schéma de simulation

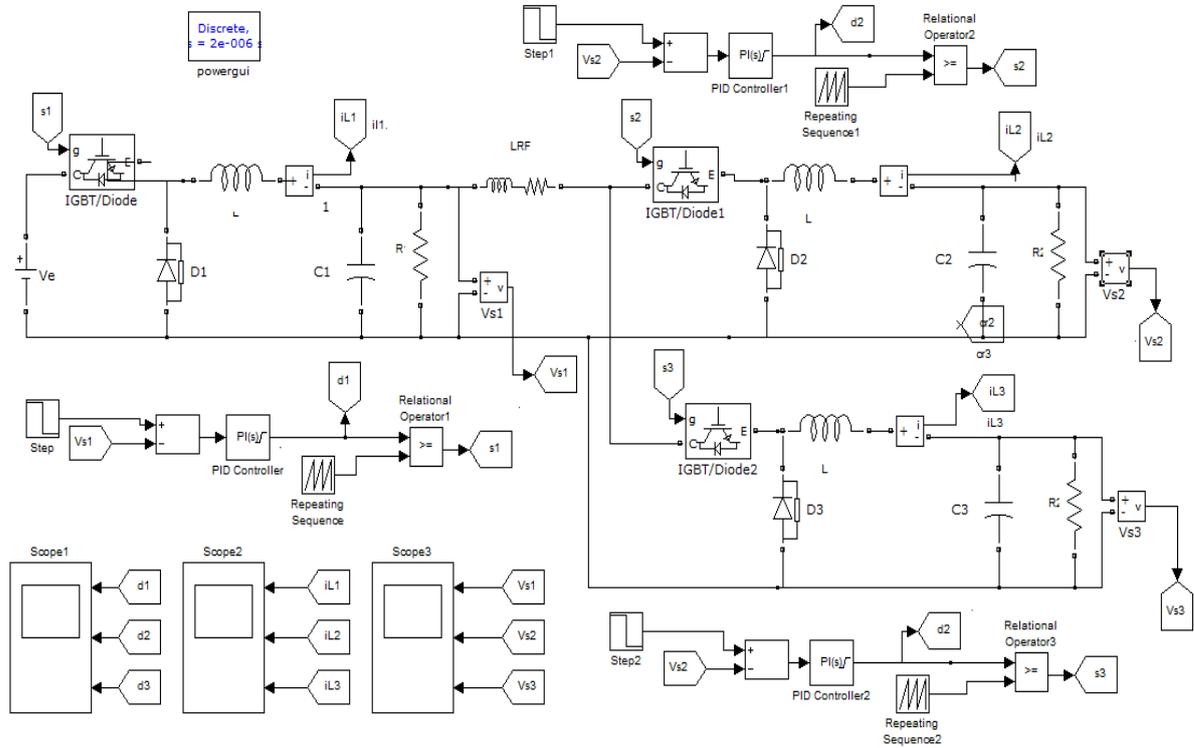


Figure III.1 : Simulation sur MATLAB d'un micro-réseau avec (CPL).

III.2.2 Résultats de simulation

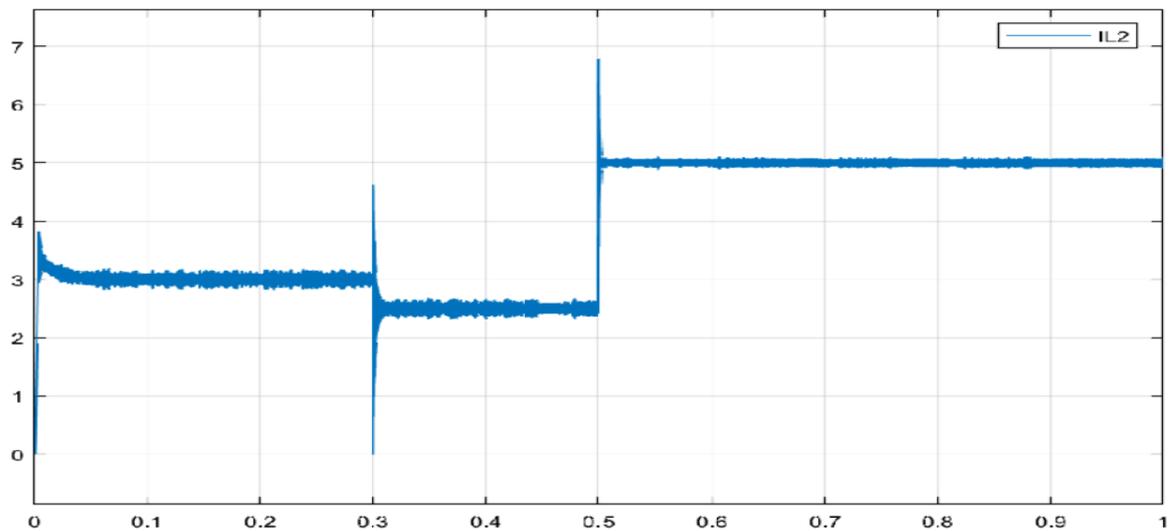


Figure III.2 : Réponse de courant IL2

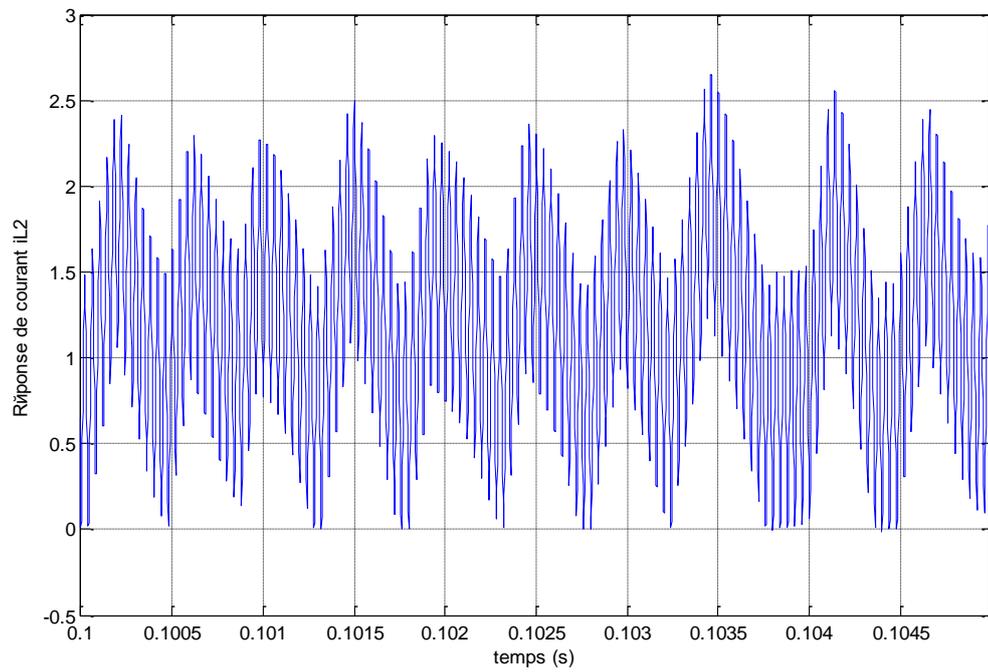


Figure III.3 : Zoom de courant i_{L2}

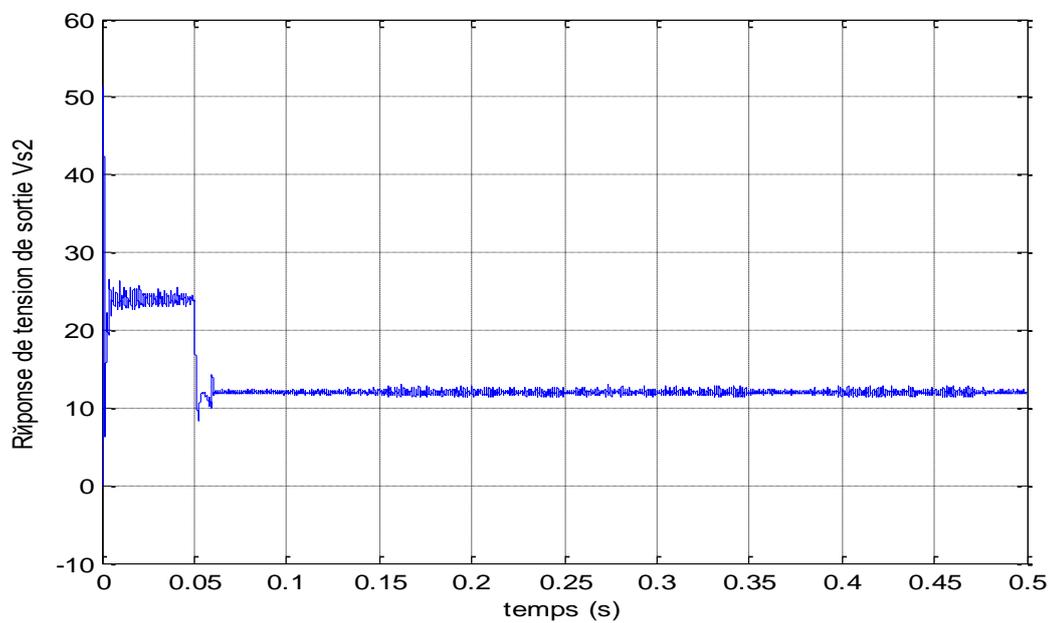


Figure III.4 : La tension de sortie V_{s2}

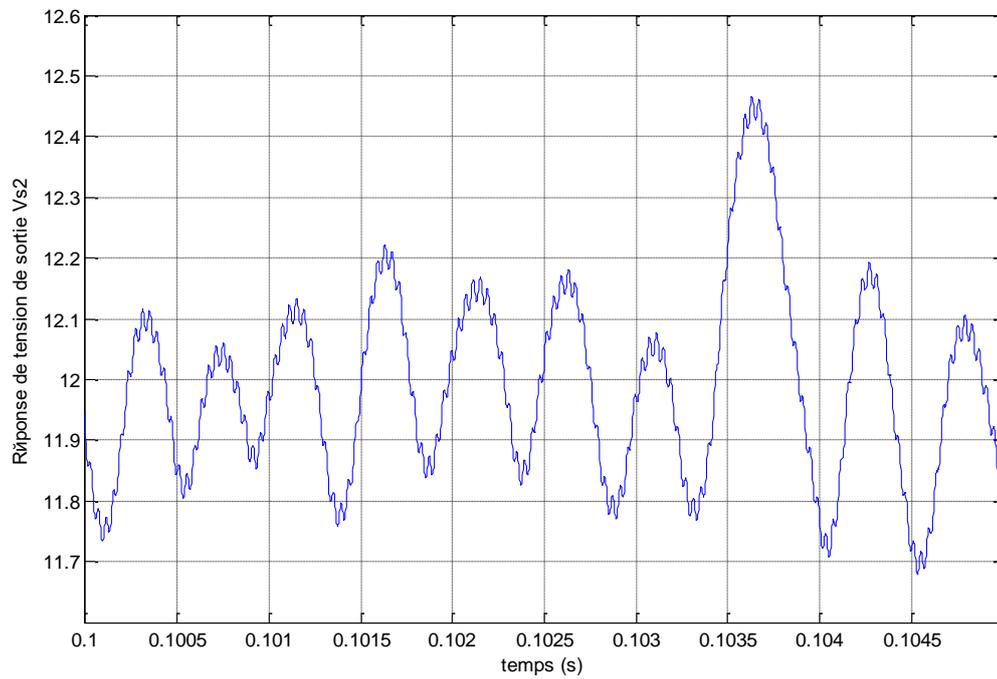


Figure III.5 : Zoom de la tension de sortie Vs2

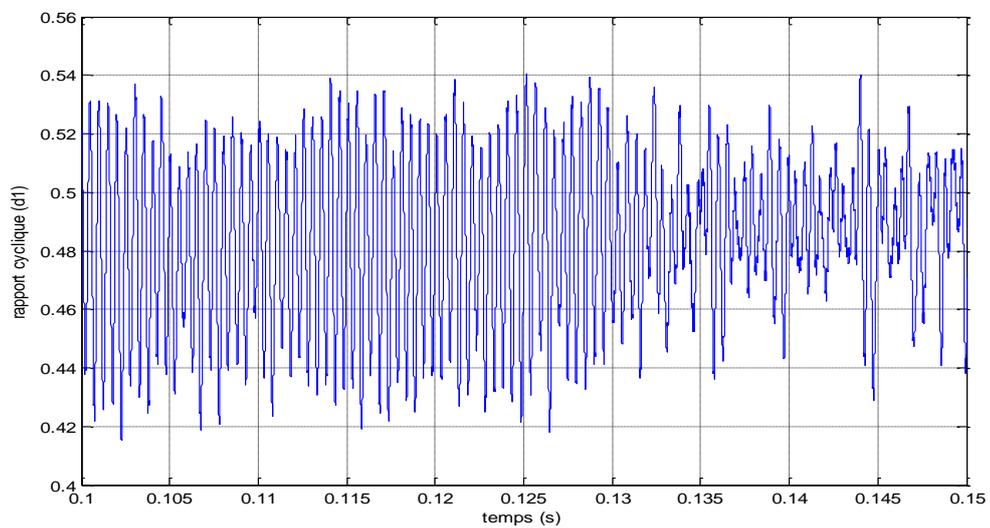


Figure III.6 : Le rapport cyclique (d1)

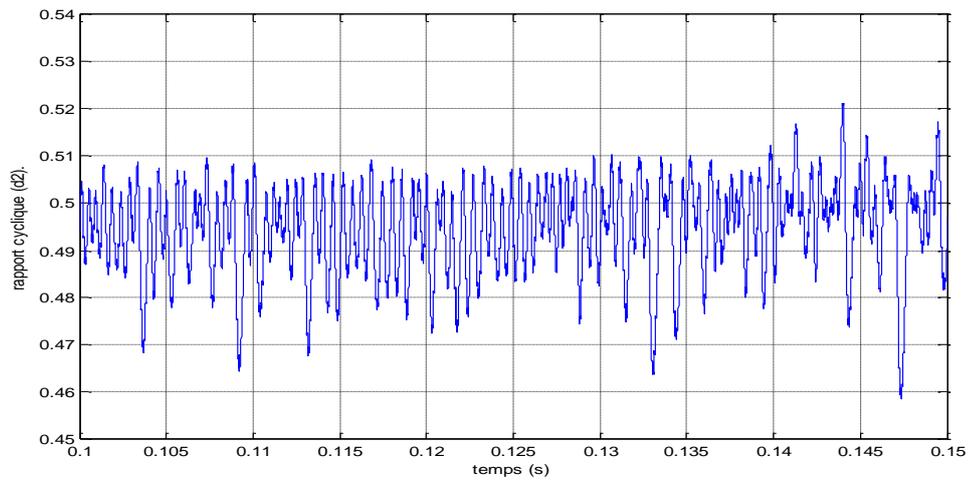


Figure III.7 : Le rapport cyclique (d2).

Avec une chute de tension entre le [0.05 ; 0.055]

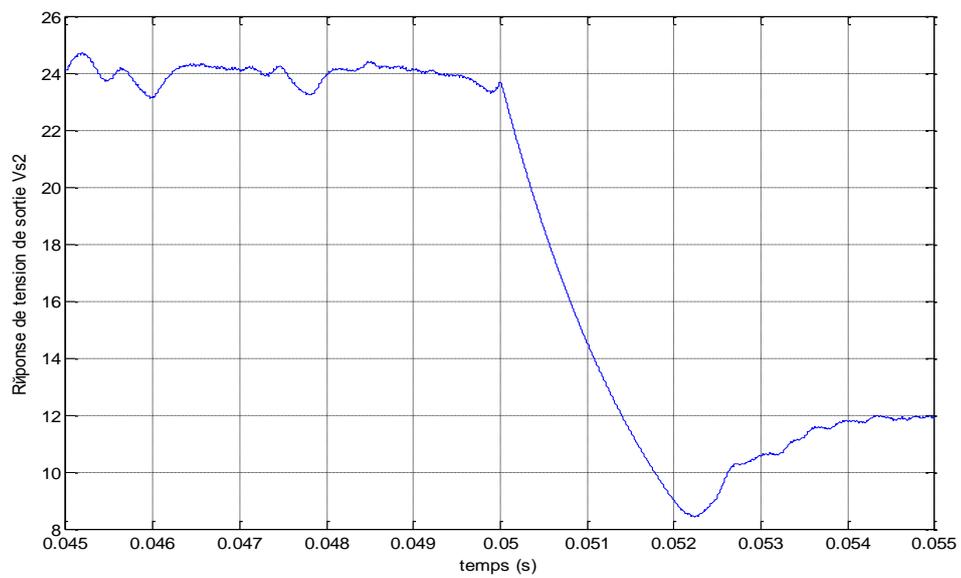


Figure III.8 : Chute de tension de sortie Vs2 pour (R=10)

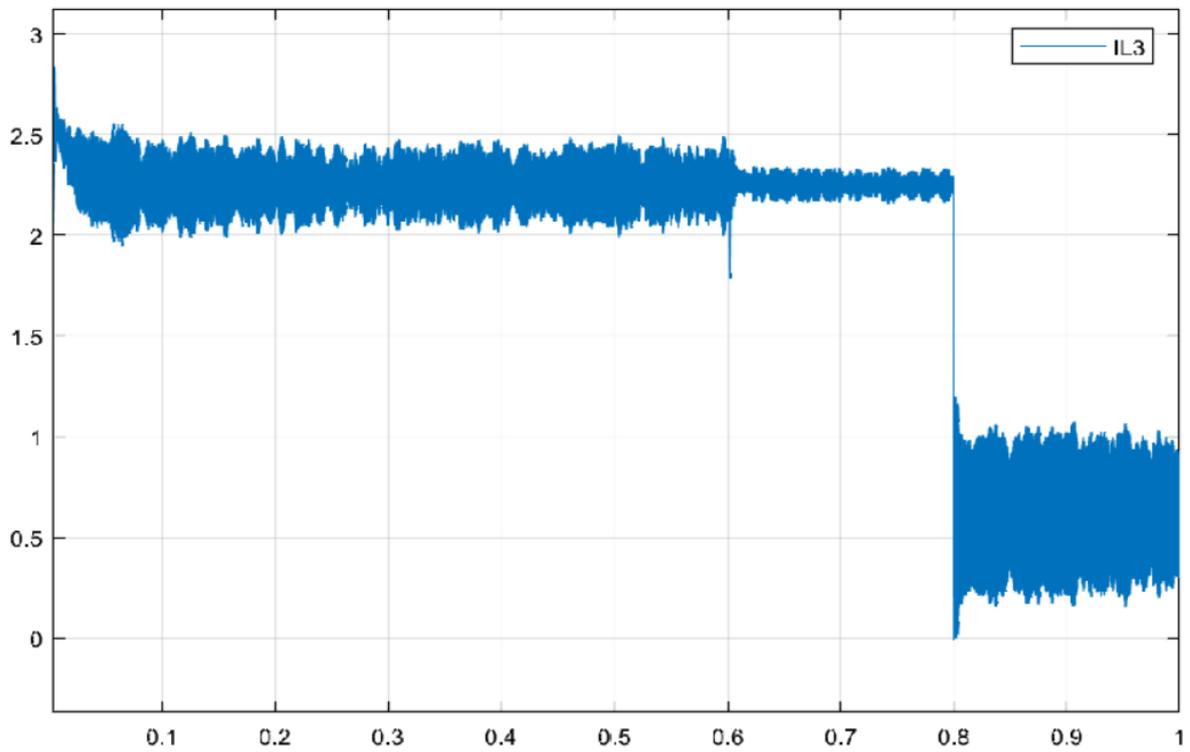


Figure III.9 : Réponse de courant $IL3$

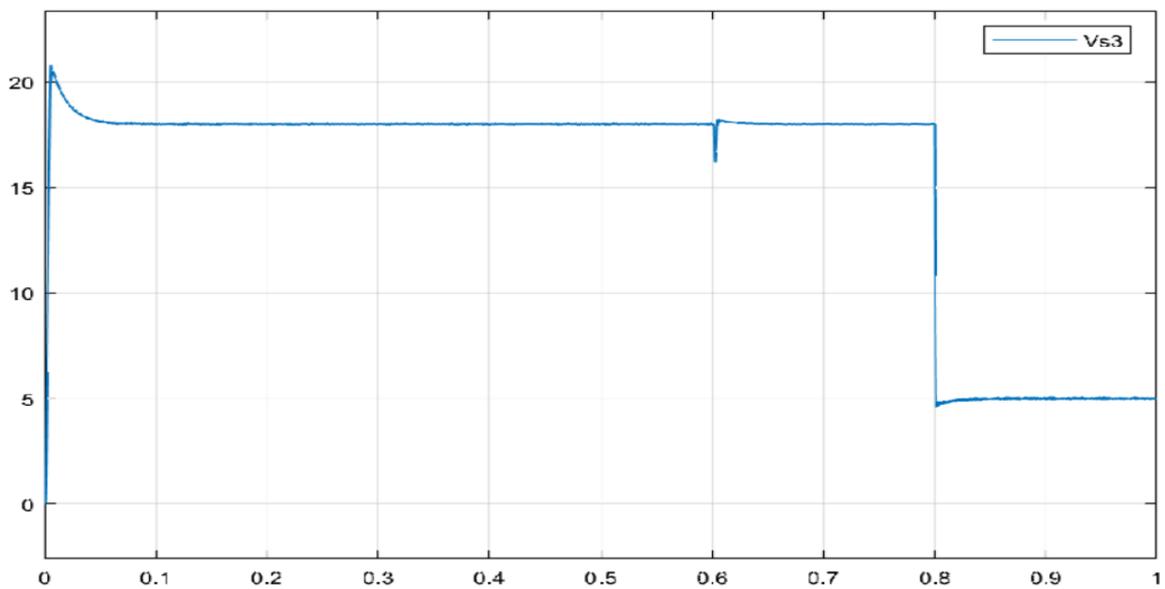


Figure III.10 : La tension de sortie $Vs3$

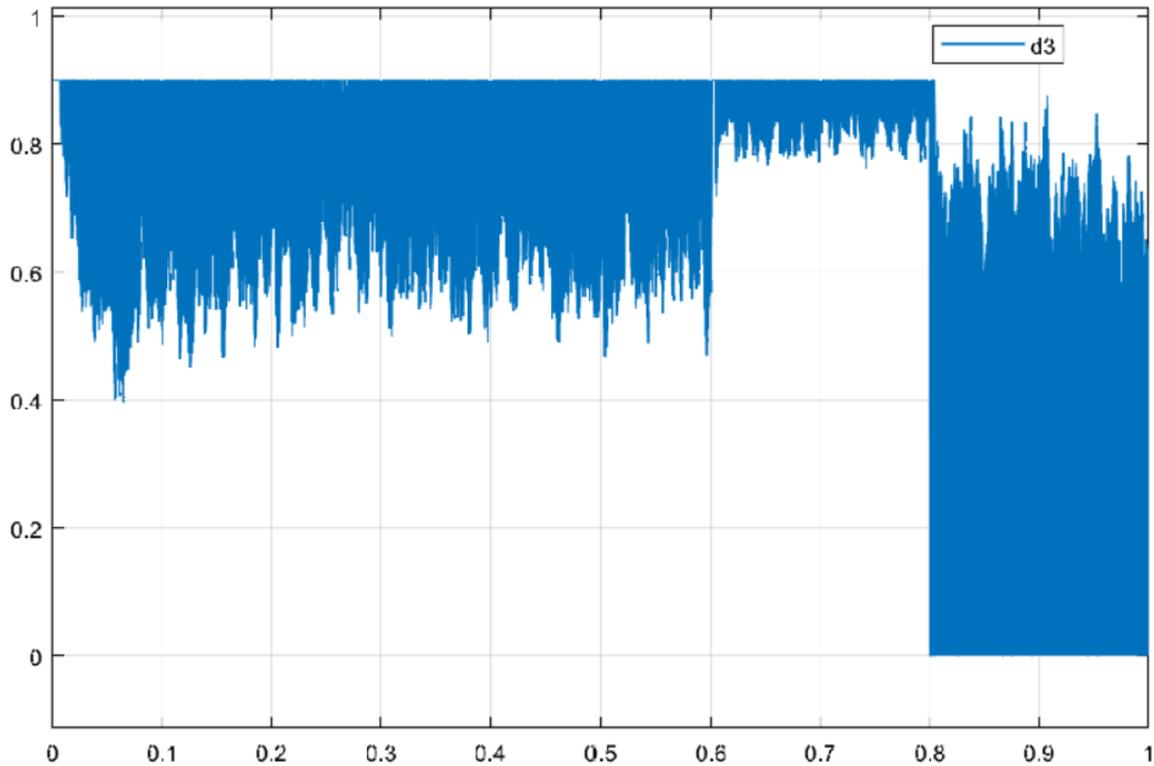


Figure III.11 : Le rapport cyclique (d_3).

La variation du rapport cyclique est montrée dans la figure (III.7) et la figure (III.8) à cause de la croissance du rapport cyclique

Généralement notre modèle montre un comportement proche des convertisseurs réels. Bien que l'ajout des résistances provoque des pertes énergétiques indésirables dans les éléments électroniques utilisées qui affectent le rendement du convertisseur mais grâce aux lois de commande on peut augmenter le rendement.

Les paramètres de simulations

1	<code>clear; close all; clc;</code>
2	<code>%% simulation parameters</code>
3	<code>E=48;</code>
4	<code>fs =20e3; Ts=1/fs; Tc=Ts; h=Ts/100;</code>
5	
6	<code>clear; close all; clc;</code>
7	<code>%% system parameters</code>
8	<code>E=48;L1=5e-3; C1=100e-6; R=10;</code>
9	<code>fs1=50e3; Ts1=1/fs1; Tc1=Ts1;</code>
10	<code>rL=2; LL=10e-6;</code>
11	<code>rf=1; Lf=10e-6; Cf=470e-6;</code>
12	
13	<code>L2=0.5e-3;C2=100e-6; R2=4;</code>
14	<code>fs2=100e3; Ts2=1/fs2;</code>
15	
16	<code>L3=0.5e-3;C3=100e-6; R3=8;</code>
17	<code>fs3=100e3; Ts3=1/fs3;</code>
18	
19	<code>h=min(Ts1,Ts2)/25;</code>
20	<code>cpl_dc_ugrid </code>

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu le montage du simulation sur MATLAB d'un exemple de micro-réseau approvisionnement a charge de puissance constante (CPL).

Conclusion générale

Le micro-réseau est défini comme un système électrique composé de générateurs d'énergie distribués, de charges multiples et de systèmes de stockage. Il peut être utilisé en le connectant à un ou plusieurs réseaux ou sans aucune source d'alimentation externe, et c'est considéré le convertisseur DC-DC l'élément le plus important dans le micro-réseau .

Le convertisseur abaisseur DC-DC ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

Dans notre présent travail, nous avons étudié le système de micro-réseau et sa relation avec CPL C'est ce que nous avons présenté en trois chapitres, dont le suivant:

Dans Le premier chapitre nous avons présenté le micro-réseau, le convertisseur abaisseur est leur relation

Dans le second chapitre nous avons traité modélisation et la simulation du convertisseur
Dans le dernier chapitre nous montrons les résultats dans MATLAB d'une simulation générale.

En tant que perspective d'avenir, les solutions de gestion de micro-réseaux dans les applications industrielles sont conçues pour améliorer la gestion et la distribution de l'énergie.

Références

- [1] BENOTMANE Sara, MOUALEK Farida, « Etude et simulation des systèmes photovoltaïques connectés à un microgrid », Mémoire de Master, Université Aboubaker Belkaid Tlemcen, 2016 .
- [2] GUERROUDJ Abdelhak, BELKHIRA Amjed baha eddine, «Étude et Simulation d'un Micro-Grid», Mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2020.
- [3] SAIM, Abdelhakim. « Commande à base de descripteurs flous d'une architecture de génération distribuée», Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou 2017.
- [4] Mohammed Kh. AL-Nussairi ,Ramazan Bayindir , Sanjeevikumar Padmanaban , Lucian Mihet-Popa, Pierluigi Siano « Constant Power Loads (CPL) with Microgrids: Problem Definition, Stability Analysis and Compensation Techniques » *Energies* 2017, 10, 1656; doi:10.3390/en10101656
- [5] NETTARI Yakoub. «Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif1, 2014.
- [6] GASSAB Samir. «Gestion d'énergie d'une centrale à énergie renouvelable hybride dédiée à l'alimentation d'un site isolé», Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif1, 2019.
- [7] B .BOUNOUA, R. HAOUCHINE. «Optimisation du Transfert d'Énergie d'un Champ Photovoltaïque basée sur la Commande MPPT Prédictive », Diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2012.
- [8] Habitouche Mohamed Seghir, Sahli Ishak. «Etude et conception d'une commande non linéaire appliquée au convertisseur statique DC-DC», Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj, 2021.
- [9] Sabah Benamane Siad. DC MicroGrids Control for renewable energy integration. Automatic. Université ,Paris-Saclay; Université d'Evry, 2019. English. NNT : 2019SACLE006. tel-02173724
- [10] DJERIOU SALIM,.. Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone.. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif1, 2011.
- [11] A. Davoudi and J. Jatskevich, —Realization of Parasitics in State-Space Average-Value Modeling of PWM DC–DC Converters,|| *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 4, pp. 1142–1147, Jul. 2006.
- [12] Dr. Aissa Oualid, «Cours Régulation Industrielle, *Chapitre 04 : Les Régulateurs Standards : P, PI, PD et PID*», 3eme année Licence, Spécialités: ELT et ELM
- [13] Hossain, Eklas, "Addressing Instability Issues in Microgrids Caused By Constant Power Loads Using Energy Storage Systems" (2016), *University of Wisconsin-Milwaukee, Theses and Dissertations*. 1275. <https://dc.uwm.edu/etd/1275>
- [14] S. K. Mazumder, A. H. Nayfeh and D. Boroyevich, —Theoretical and Experimental Investigation of the Fast and Slow-Scale Instabilities of a DC-DC Converter,|| *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol 16, No. 2, 2001, pp. 201-216.
- [15] D. Maksimovic, a. M. Stankovic, V. J. Thottuvelil, and G. C. Verghese, —Modeling and simulation of

Références

- power electronic converters,|| Proc. IEEE, vol. 89, no. 6, pp. 898–912, Jun. 2001.
- [16] S.R. Sanders, JM Noworolski, XZ Liu, and GC Verghese, —Generalized averaging method for power conversion circuits,|| IEEE Trans. Power Electron., vol. 6, pp. 251–259, Apr. 1991
- [17] S. R. Sanders and G. C. Verghese, —Synthesis of averaged circuit models for switched power converters,|| IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp.679–683 , 1990
- [18] <https://microcontrollerslab.com/dc-dc-buck-converter-simulation-simulink/>
- [19] © 2020 published by Elsevier. This manuscript is made available under the Elsevier user license
<https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- [20] Energies 2021, 14, 5760. <https://doi.org/10.3390/en14185760>
- [21] <https://www.i-electrician.com/2019/02/pid-controller.html?m=1>