

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf :



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : HAZI Aya

BENZITOUNI Seyfeddine

Thème

Etude, dimensionnement et réalisation pratique de différentes structures de convertisseurs DC-DC

Soutenu publiquement, le 22/06/2024 devant le jury composé de :

Mr MOUSSAOUI Abdelkrim	Professeur	Univ. Guelma	Président
Mr MENDACI Sofiane	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur
Mr TOUAHRI Abdelwahab	MAA	Univ. Guelma	Examineur
Mr Cherif Oueld Lahoucine	Professeur	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement

Au nom d'Allah le plus miséricordieux le plus gracieux

Tout d'abord on tient à remercier Monsieur MENDACI Sofiane, enseignant à l'université de 8 MAI 1945 Guelma, pour l'encadrement qu'il nous a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine. Il trouve ici nos gratitude et nos reconnaissances profondes.

Par ailleurs, on tient à exprimer nos vifs remerciement au président du jury Mr MOUSSAOUI Abdelkrim, Professeur à l'université de 8 MAI 1945 Guelma, au Mr TOUAHRI Abdlwahab, maitre-assistant à l'université de 8 MAI 1945 Guelma, au Mr OULD LAHOUCINE chérif, Professeur à l'université de 8 MAI 1945 Guelma d'accepter de faire partie du Jury.

On tient également à remercier spécialement : Mr. NECIBI chérif et Mr. BOUZIZA Mahmoud et Mr. BOUDIAR Wajih et Mr JAALAB Hamdi et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

À l'âme de mon père,

Tu as toujours été ma source d'inspiration, mon guide et mon modèle. Ton soutien indéfectible et ton amour inconditionnel m'ont permis d'accomplir ce parcours académique. Chaque étape de ce projet de mémoire est dédiée à ton souvenir et à ton héritage.

Tes valeurs de persévérance, de sagesse et de compassion résonnent à travers chaque ligne de ce travail. Tu as été la lumière qui a éclairé mon chemin, même lorsque les défis semblaient insurmontables.

À travers ce mémoire, je souhaite perpétuer ton héritage et honorer la force de ton esprit. Tu restes à jamais dans mon cœur et ton influence continue de guider mes pas.

À ma mère, pour son soutien sans faille, son amour et ses encouragements tout au long de ce parcours académique.

À mes amis et à ma famille, pour leur patience et leur compréhension pendant mes périodes d'absence et de concentration intense.

Aya

Dédicace

À mes très chers parents pour leur soutien inconditionnel, leur encouragements, et bien sûr pour m'avoir permis de réaliser mes études dans les meilleures conditions,

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

À mes frères Djalel et Djaber À ma sœur Souhaila

À mes chères amies

À tous ceux que j'ai connus durant toutes mes études

À tous ceux pour qui je compte et qui comptent pour moi

Je dédie ce travail.

Seyfeddine

Table des matières

Introduction Générale	1
CHAPITRE I : Généralités sur les convertisseurs DC–DC.....	2
1. Introduction	2
2. Les quatre familles de convertisseurs de puissance.....	2
2.1. Convertisseurs AC-DC (Redresseurs).....	2
2.1.1. Types de Redresseurs.....	3
a. Redresseurs Monophasés	3
b. Redresseurs Triphasés.....	3
2.2. Convertisseurs DC-DC (Hacheurs).....	4
2.3. Convertisseurs DC-AC (Onduleur).....	4
2.3.1 Types et Structures d'Onduleurs	4
a. Onduleur Monophasé.....	5
b. Onduleur Triphasé	5
c. Onduleur à Pont Complet.....	5
d. Onduleur à Demi-Pont	5
e. Onduleur Multiniveaux.....	6
2.4. Convertisseurs AC-AC.....	6
2.4.1.Types de Convertisseurs AC-AC.....	6

a.	Gradateur de Tension (AC Voltage Controllers)	6
b.	Cycloconvertisseur	6
c.	Convertisseur Matriciel	6
d.	Onduleur AC-AC Indirect (back-to-back converter):	7
3.	Types de convertisseurs DC-DC	7
3.1.	Convertisseur Abaisseur (Buck Converter)	7
3.2.	Convertisseur Élévateur (Boost Converter)	7
3.3.	Convertisseur Abaisseur-Élévateur (Buck-Boost Converter)	8
a.	Buck-Boost à deux switches	8
b.	Buck-Boost à quatre switches	8
3.4.	Convertisseur Ćuk	9
3.5.	Convertisseur SEPIC (Single-Ended Primary-Inductor Converter)	10
3.6.	Convertisseur Flyback	10
4.	Domaine d'utilisation des convertisseurs DC-DC	11
4.1.	Systèmes d'Alimentation Renouvelable	11
4.2.	Électronique de Consommation	11
4.3.	Véhicules Électriques	12
4.4.	Commande des moteurs à courant continu	13
5.	Conclusion	14

Chapitre II : Modélisation et simulation de plusieurs convertisseurs DC-DC 15

1. Introduction	15
2. Modélisation de convertisseur statique DC-DC abaisseur « Buck ».....	15
2.1. Principe de fonctionnement.....	15
2.2. Modèle dynamique	16
2.2.1 Interrupteur fermée (phase 1).....	16
2.2.2 Interrupteur ouvert (phase 2):	16
2.2.3 Équation du rapport cyclique	17
2.3.1. Calcul de l'inductance.....	17
2.3.2. Calcul du condensateur de sortie	18
2.4.1. Données de l'application.....	18
2.4.2. Calcul de l'inductance et du condensateur du Buck	19
2.4.3. Résultats de simulation du Buck.....	20
3. Modélisation du convertisseur DC-DC élévateur (Boost).....	22
3.1. Principe de fonctionnement du Boost	22
3.2. Dimensionnement du convertisseur Boost.....	24
3.2.1. Calcul de l'inductance.....	24
3.2.2. Calcul de la capacité de sortie.....	24
3.3. Validation par simulation du dimensionnement du Boost	24
3.3.1. Calcul de l'inductance et du condensateur de sortie.....	25
3.3.2. Résultats de simulation du Boost.....	26

4. Modélisation du convertisseur Buck-Boost.....	27
4.1. Principe de fonctionnement.....	27
4.2. Principe de fonctionnement.....	29
4.2.1. Calcul de l'inductance.....	29
4.2.1. Calcul de la capacité	30
4.3. Validation par simulation du dimensionnement du Boost	30
3.3.1. Calcul de l'inductance et du condensateur de sortie	30
4.3.2. Résultats de simulation du Buck-Boost	31
5. Conclusion	34

Chapitre III : Etude expérimentale des convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost

.....	35
1. Introduction	35
2. Présentation des composants utilisés	35
2.1 ARDUINO UNO.....	35
2.2. Diode	36
2.3. MOSFET	36
2.4. Inductance	36
2.5. La résistance.....	37
2.6. Le condensateur	37
3. Réalisation des montages.....	38
3.1 Montage du convertisseur Buck.....	38

3.2 Montage du convertisseur Boost	40
3.3. Montage du convertisseur DC-DC Buck-Boost	42
4. Conclusion	44
Conclusion générale	45

Introduction générale

Les convertisseurs de puissance jouent un rôle crucial dans la gestion et la distribution de l'énergie électrique dans une multitude d'applications modernes. Des dispositifs portables aux systèmes industriels, en passant par les véhicules électriques et les énergies renouvelables, ces convertisseurs sont indispensables pour adapter les niveaux de tension et de courant aux besoins spécifiques des divers composants et systèmes électroniques. Parmi les différentes familles de convertisseurs de puissance, les convertisseurs DC-DC occupent une place particulière en raison de leur capacité à transformer efficacement une tension continue (DC) d'un niveau à un autre [1].

Les convertisseurs DC-DC sont omniprésents dans notre quotidien, alimentant nos gadgets électroniques, optimisant les systèmes de gestion de l'énergie dans les voitures électriques, et jouant un rôle central dans les infrastructures énergétiques modernes telles que les réseaux intelligents et les systèmes de stockage d'énergie. Leur importance est croissante dans le contexte de la transition énergétique mondiale, où l'efficacité énergétique et la gestion optimisée de l'énergie sont devenues des priorités [1, 2, 3].

Ce mémoire s'articulera autour de l'étude des convertisseurs DC-DC de types Buck, Boost et Buck-Boost. Pour mener à bien ce travail, nous exposons dans le premier chapitre les familles des convertisseurs de puissance et nous nous attardons sur les convertisseurs DC-DC en précisant leurs principes de fonctionnement, leurs différentes topologies, ainsi que leurs applications et avantages spécifiques.

Le deuxième chapitre traitera de la modélisation, du dimensionnement et de la simulation à l'aide du logiciel Matlab/Simulink de trois convertisseurs DC-DC : Buck, Boost et Buck-Boost.

Le dernier chapitre de ce mémoire sera consacré à la réalisation pratique des trois convertisseurs étudiés théoriquement dans le deuxième chapitre.

Ce travail se termine par une conclusion générale sur les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire de fin d'études de master.

CHAPITRE I : Généralités sur les convertisseurs DC-DC

1. Introduction

L'électronique de puissance est une branche de l'ingénierie électrique qui s'occupe de la conversion, du contrôle et de la gestion de l'énergie électrique à l'aide de dispositifs électroniques à semi-conducteurs. Elle joue un rôle crucial dans la transformation de l'énergie électrique de formes brutes ou non appropriées en formes plus adaptées aux besoins des appareils et systèmes électroniques modernes. Généralement, elle traite des dispositifs et des circuits qui permettent de manipuler l'énergie électrique sous différentes formes, telles que la tension, le courant et la fréquence [1, 2, 3].

Dans ce chapitre, nous allons présenter brièvement les différentes familles de convertisseurs de puissance ainsi que leurs domaines d'application. Ensuite, l'accent sera mis sur les convertisseurs DC-DC qui feront l'objet de ce modeste travail.

2. Les quatre familles de convertisseurs de puissance

Les avancées dans le domaine de l'électronique de puissance ont permis de développer une gamme variée de convertisseurs de puissance, chacun répondant à des besoins spécifiques et jouant un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles, commerciales et domestiques. Ces convertisseurs peuvent être classés en différentes familles, chacune ayant des caractéristiques et des applications distinctes [1, 2, 3].

2.1. Convertisseurs AC-DC (Redresseurs)

Les redresseurs transforment le courant alternatif (AC) en courant continu (DC), une fonction essentielle pour alimenter la majorité des dispositifs électroniques modernes. La demande croissante d'équipements électroniques et électriques fiables et efficaces a amplifié l'importance des redresseurs dans divers domaines, de l'électronique grand public aux applications industrielles et énergétiques.

2.1.1. Types de Redresseurs :

Les redresseurs peuvent être classés en plusieurs catégories selon leur configuration et leur fonctionnement :

a. Redresseurs Monophasés :

Redresseur Monophasé à Demi-Onde : Ce type de redresseur utilise un seul élément redresseur (diode ou thyristor) pour permettre à une seule moitié de la forme d'onde AC de passer [1, 2, 3], bloquant l'autre moitié, figure 1-a.

Redresseur Monophasé à Onde Complète : Utilise deux diodes/thyristors et un transformateur à point milieu ou un pont de Graetz (quatre diodes/thyristors) pour permettre aux deux moitiés de la forme d'onde AC de passer, ce qui double la fréquence de la sortie DC par rapport à l'entrée AC [4, 5], figure 1-b.

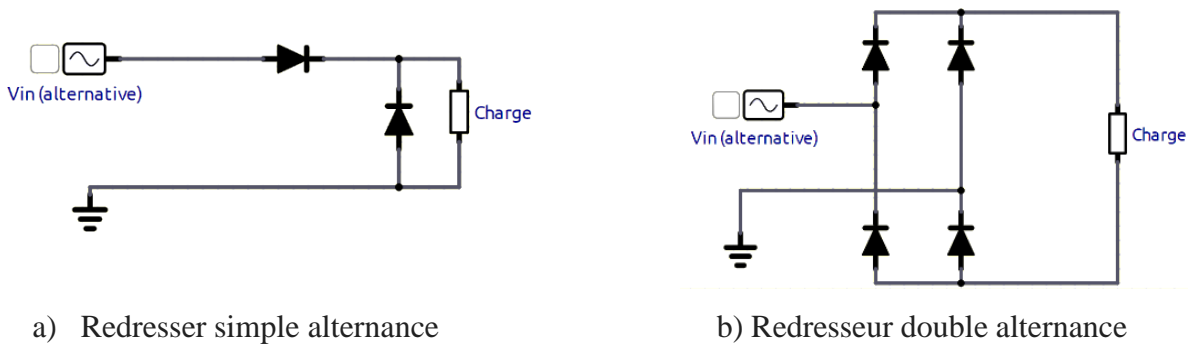


Figure 1-1 : Redresseurs monophasés à diode (Logiciel SimulIDE)

b. Redresseurs Triphasés :

Redresseur Triphasé à Demi-Onde : Utilise trois diodes/thyristors, une pour chaque phase de l'entrée AC triphasée, permettant à une seule demi-onde de chaque phase de passer [4, 5], figure 1.2-a.

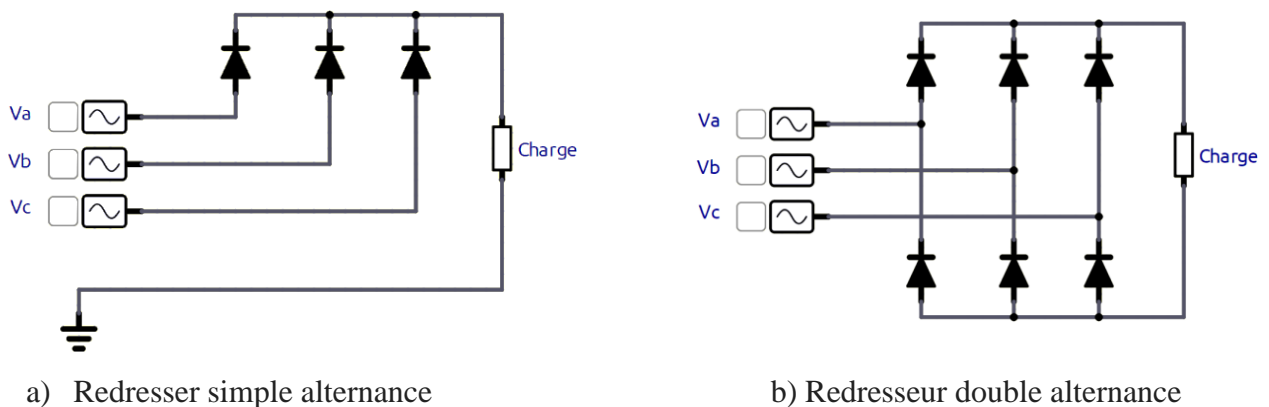


Figure 1-2 : Redresseur triphasé à diode (Logiciel SimulIDE)

Redresseur Triphasé à Onde Complète : Utilise six diodes pour permettre à chaque demi-onde de chaque phase de passer, fournissant une sortie DC plus stable et plus efficace [1,2, 3, 4], figure 1.2-b.

2.2. Convertisseurs DC-DC (Hacheurs)

Les hacheurs, également connus sous le nom de convertisseurs DC-DC, sont des dispositifs essentiels en électronique de puissance. Ils permettent la conversion de l'énergie électrique d'un niveau de tension continue (DC) à un autre niveau de tension continue. Cette conversion est indispensable dans de nombreuses applications modernes, allant des appareils électroniques portables aux systèmes de gestion de l'énergie dans les véhicules électriques et les installations de production d'énergie renouvelable [2, 3].

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation.

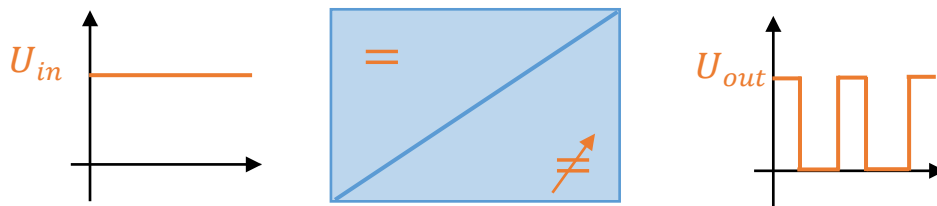


Figure 1-3 : Principe de base d'un hacheur

A la fin de ce chapitre, nous donnerons plus de détails sur les différents types de hacheurs.

2.3. Convertisseurs DC-AC (Onduleur)

Les onduleurs sont des dispositifs essentiels en électronique de puissance, utilisés pour convertir le courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Cette conversion est cruciale pour de nombreuses applications modernes. Les onduleurs permettent non seulement la conversion de l'énergie, mais aussi le contrôle de la fréquence et de la forme d'onde de la sortie AC, ce qui est vital pour assurer une alimentation stable et efficace [4, 5].

2.3.1 Types et Structures d'Onduleurs :

Les onduleurs peuvent être classés en plusieurs catégories selon leur configuration :

a. Onduleur Monophasé :

Il convertit une source DC en une sortie AC monophasée, figure 1.4.

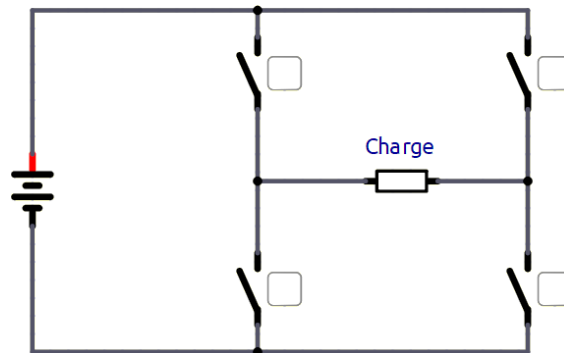


Figure 1-4 : Onduleur monophasé (Logiciel SimulIDE)

b. Onduleur Triphasé :

Il convertit une source DC en une sortie AC triphasée.

c. Onduleur à Pont Complet :

Il utilise quatre dispositifs de commutation pour créer une forme d'onde AC. La structure à pont complet permet de générer une tension de sortie AC de double amplitude par rapport à une structure à demi-pont [4, 5], figure 1. 5.

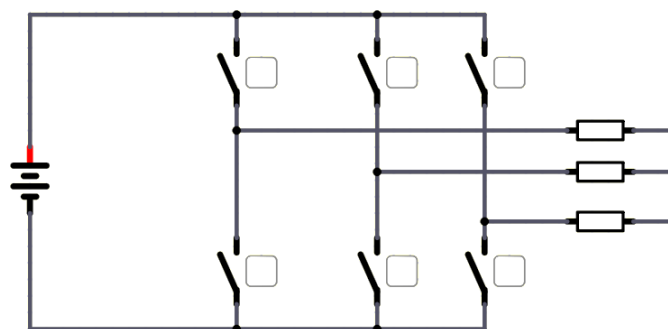


Figure 1-5 : Onduleur triphasé (Logiciel SimulIDE)

d. Onduleur à Demi-Pont :

Il utilise deux dispositifs de commutation et un point milieu pour créer une forme d'onde AC. Moins complexe que le pont complet, mais généralement limité à des applications de puissance plus faible [4, 5].

e. Onduleur Multiniveaux :

Il utilise plusieurs niveaux de tension pour approcher plus précisément une forme d'onde sinusoïdale [4].

2.4. Convertisseurs AC-AC :

Les convertisseurs AC-AC sont des dispositifs électroniques de puissance utilisés pour transformer une forme de courant alternatif (AC) en une autre forme de courant alternatif, en modifiant l'amplitude, la fréquence ou la phase de la tension ou du courant d'entrée. Ces convertisseurs jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles, commerciales et domestiques, où il est nécessaire d'adapter les caractéristiques de l'alimentation électrique pour répondre à des exigences spécifiques [5].

2.4.1. Types de Convertisseurs AC-AC :

Les convertisseurs AC-AC peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leur fonction et de leur structure :

a. Gradateur de Tension (AC Voltage Controllers) :

Ils modifient l'amplitude de la tension AC d'entrée pour produire une tension AC de sortie d moindre amplitude. Il est surtout utilisé pour le contrôle de l'éclairage, le chauffage électrique, et la régulation de la vitesse des moteurs à induction [5].

b. Cycloconvertisseur :

Il permet de convertir une tension AC d'amplitude et de fréquence donnée en une tension AC à amplitude variable et à fréquence inférieure à celle de la fréquence d'entrée. Le cycloconvertisseur n'utilise pas d'étape intermédiaire de conversion DC [5].

c. Convertisseur Matriciel :

Il convertit directement une tension AC d'entrée en une tension AC de sortie de fréquence et d'amplitude différentes. Ils sont utilisés dans des applications nécessitant une conversion AC-AC compacte et efficace, comme les systèmes d'entraînement à vitesse variable et les alimentations sans interruption (UPS) [5].

d. Onduleur AC-AC Indirect (back-to-back converter):

Il convertit d'abord l'AC d'entrée AC en DC intermédiaire, puis reconvertissent cette DC en AC de sortie avec les caractéristiques désirées [5].

3. Types de convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC, également appelés convertisseurs CC-CC, agissent comme des intermédiaires intelligents dans le monde de l'électricité. Ils captent l'énergie électrique sous forme de courant continu (CC) à une tension donnée, la stockent temporairement, puis la restituent à une tension différente en sortie. Cette tension de sortie peut être soit plus élevée, soit plus basse que la tension d'entrée, selon les besoins de l'application [2, 3].

Il existe plusieurs types de hacheurs convertisseur DC-DC dont les principaux sont :

3.1. Convertisseur Abaisseur (Buck Converter) :

Le hacheur Buck classique, figure 1. 6, également connu sous le nom de convertisseur abaisseur, est un type de convertisseur DC-DC qui abaisse la tension d'entrée continue à une tension de sortie inférieure. Il fonctionne en régulant le rapport cyclique (rapport entre le temps où le dispositif est allumé et le temps où il est éteint) d'un interrupteur électronique, généralement un transistor, pour obtenir la tension de sortie souhaitée entre 0 V et la tension d'entrée [2].

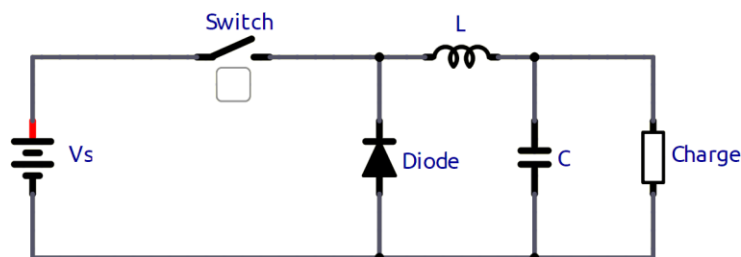


Figure 1-6 : Convertisseur Buck (Logiciel SimulIDE)

3.2. Convertisseur Élévateur (Boost Converter) :

Le convertisseur élévateur, également connu sous le nom de Boost converter, est un composant électronique fondamental dans la gestion de l'énergie électrique. Sa fonction principale est d'augmenter (élever) la tension d'entrée à une valeur supérieure à la sortie. Cet appareil joue un rôle crucial dans diverses applications où la régulation de la tension est nécessaire, comme les systèmes

Solaires, les alimentations sans interruption, et les dispositifs électroniques portables [2]. La figure 1.7, présente la structure de base du Boost.

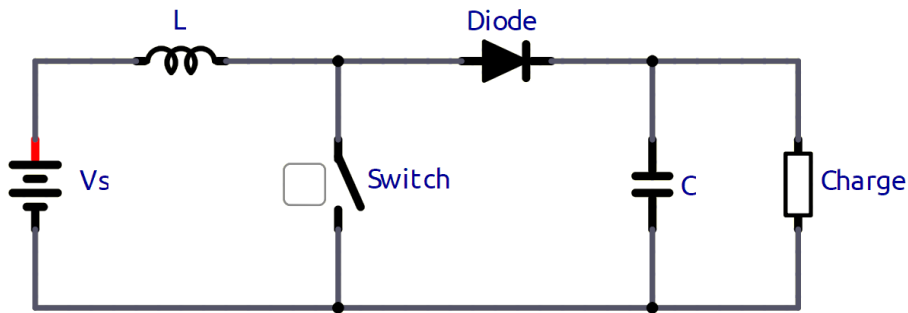


Figure 1-7 : Convertisseur Boost (Logiciel SimulIDE)

3.3. Convertisseur Abaisseur-Élévateur (Buck-Boost Converter) :

Le convertisseur buck-boost est un dispositif DC-DC qui ajuste la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée, permettant une sortie soit supérieure, soit inférieure à l'entrée, offrant une flexibilité accrue [1]. Cependant il existe deux types de convertisseurs Buck-Boost :

a. Buck-Boost à deux switches :

Le Buck-Boost à 2 commutateurs permet de fournir une tension supérieure ou inférieure à la tension d'entrée, mais avec un signe inversé par rapport à celle-ci. L'avantage de ce montage est qu'il utilise uniquement deux commutateurs, ce qui garantit un bon rendement [2]. La figure 1.8 montre le circuit de base de ce convertisseur.

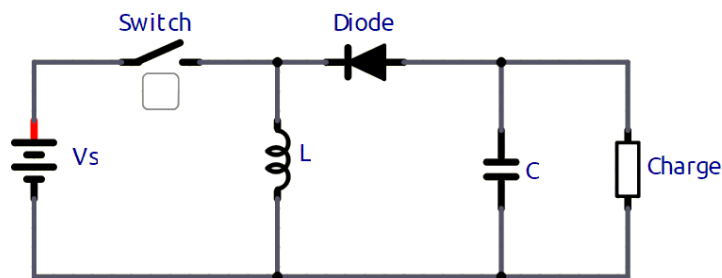


Figure 1-8 : Convertisseur Buck-Boost à 2 commutateurs (Logiciel SimulIDE)

b. Buck-Boost à quatre switches :

Le convertisseur buck-boost à 4 commutateurs est un type de convertisseur DC-DC qui peut fonctionner en trois modes différents : Buck, Boost ou Buck-Boost, permettant d'obtenir une tension

de sortie soit supérieure, soit inférieure à la tension d'entrée, mais de même signe que celle-ci [2]. La figure suivante montre le circuit de base de ce convertisseur.

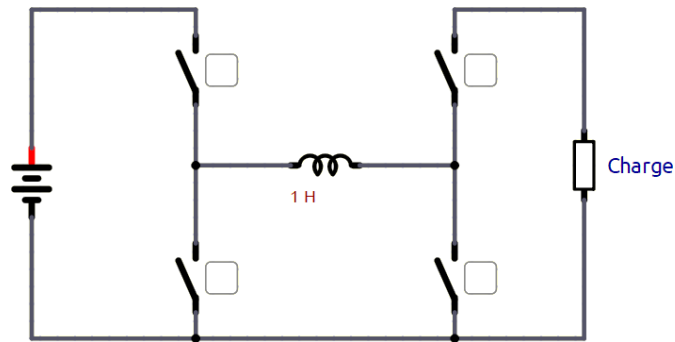


Figure 1-9 : Convertisseur Buck-Boost à 4 commutateurs (Logiciel SimulIDE)

3.4. Convertisseur Ćuk :

Le convertisseur Ćuk est un type de convertisseur Buck-Boost qui ressemble à une combinaison d'un convertisseur Boost et d'un convertisseur Buck, utilisant un seul dispositif de commutation et un condensateur couplé pour transférer l'énergie [2].

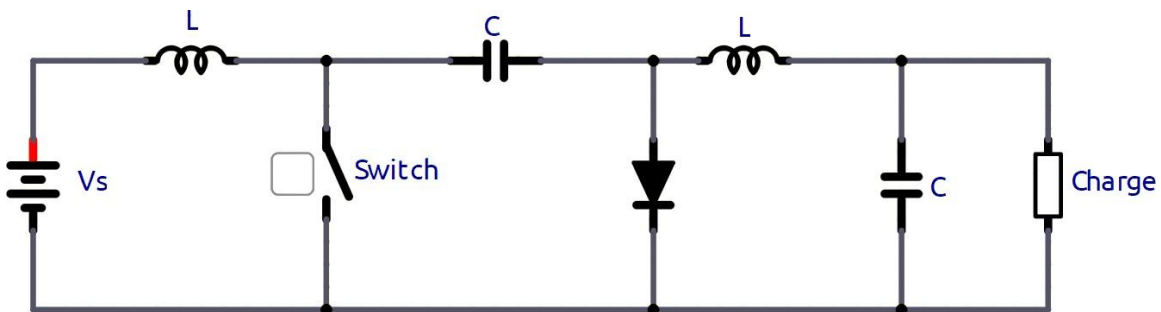


Figure 1-10 : Convertisseur Ćuk (Logiciel SimulIDE)

À l'instar du convertisseur buck-boost avec une topologie inversée, la tension de sortie d'un convertisseur Ćuk non isolé est généralement inversée et peut être inférieure ou supérieure à la tension d'entrée. Ce convertisseur a été présenté pour la première fois par le chercheur Slobodan Ćuk de l'Institut de Technologie de Californie [3].

Il est utilisé dans les applications nécessitant une faible ondulation de courant, comme les alimentations de précision.

3.5. Convertisseur SEPIC (Single-Ended Primary-Inductor Converter):

Le convertisseur SEPIC (Single-Ended Primary-Inductor Converter) est un type de convertisseur DC/DC qui permet à la tension électrique à sa sortie d'être supérieure, inférieure ou égale à celle de son entrée [2].

Un SEPIC, figure 1.11, est essentiellement un convertisseur Boost suivi d'un convertisseur Buck-Boost inversé. Cette structure présente l'avantage d'avoir une sortie non inversée et utilise un condensateur en série pour transférer l'énergie de l'entrée à la sortie, ce qui donne une certaine protection contre les courts-circuits à la sortie [6].

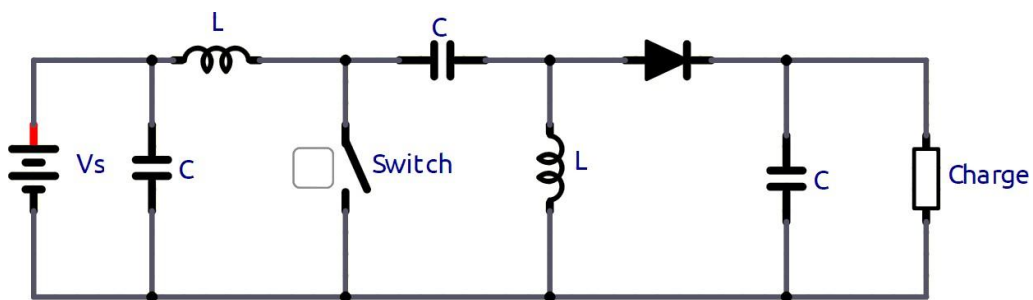


Figure 1-11 : Convertisseur SEPIC (Logiciel SimulIDE)

3.6. Convertisseur Flyback :

Ce convertisseur utilise un transformateur pour stocker l'énergie lorsque l'interrupteur principal est fermé et la libère lorsqu'il est ouvert, permettant ainsi des conversions de tension avec isolation galvanique [2].

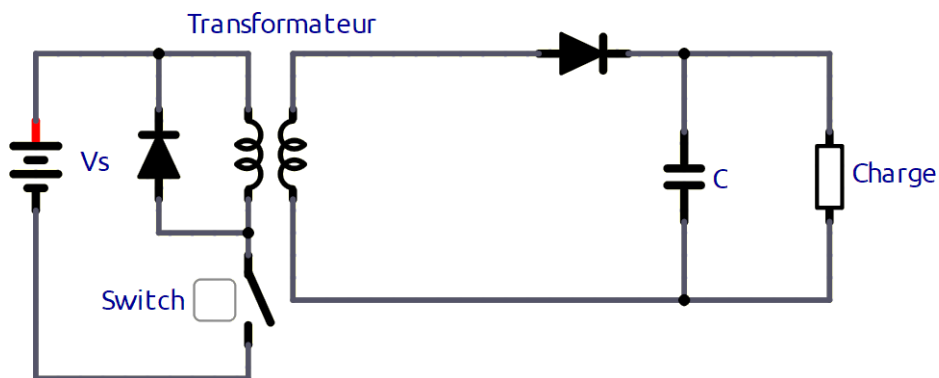


Figure 1-12 : Convertisseur Flyback (Logiciel SimulIDE)

4. Domaine d'utilisation des convertisseurs DC-DC

Les hacheurs sont présents dans une multitude d'applications, notamment :

4.1. Systèmes d'Alimentation Renouvelable :

Les panneaux solaires et les éoliennes, champions de l'énergie renouvelable, génèrent de l'électricité sous forme de courant continu (CC). Cependant, cette énergie doit être captée et régulée pour répondre aux besoins de diverses applications ou systèmes de stockage. C'est là que les convertisseurs de puissance interviennent, jouant un rôle crucial dans l'optimisation de l'utilisation des sources d'énergie renouvelable [7]. La figure 1.13 montre une chaîne de conversion photovoltaïque.

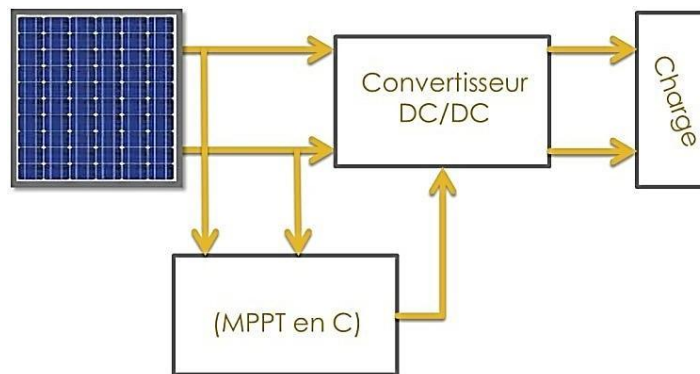


Figure 1-13 : Chaîne de conversion photovoltaïque

4.2. Électronique de Consommation :

Ils alimentent les téléphones portables, les ordinateurs portables, et autres dispositifs nécessitant une gestion efficace de l'énergie [4], figure 1.14.



Figure 1-14 : Electronique grand public (<https://gencraft.com/>)

4.3. Véhicules Électriques :

Les convertisseurs DC-DC sont largement utilisés dans les voitures électriques ou hybrides pour gérer efficacement la tension de la batterie et maximiser l'autonomie du véhicule [8, 9].

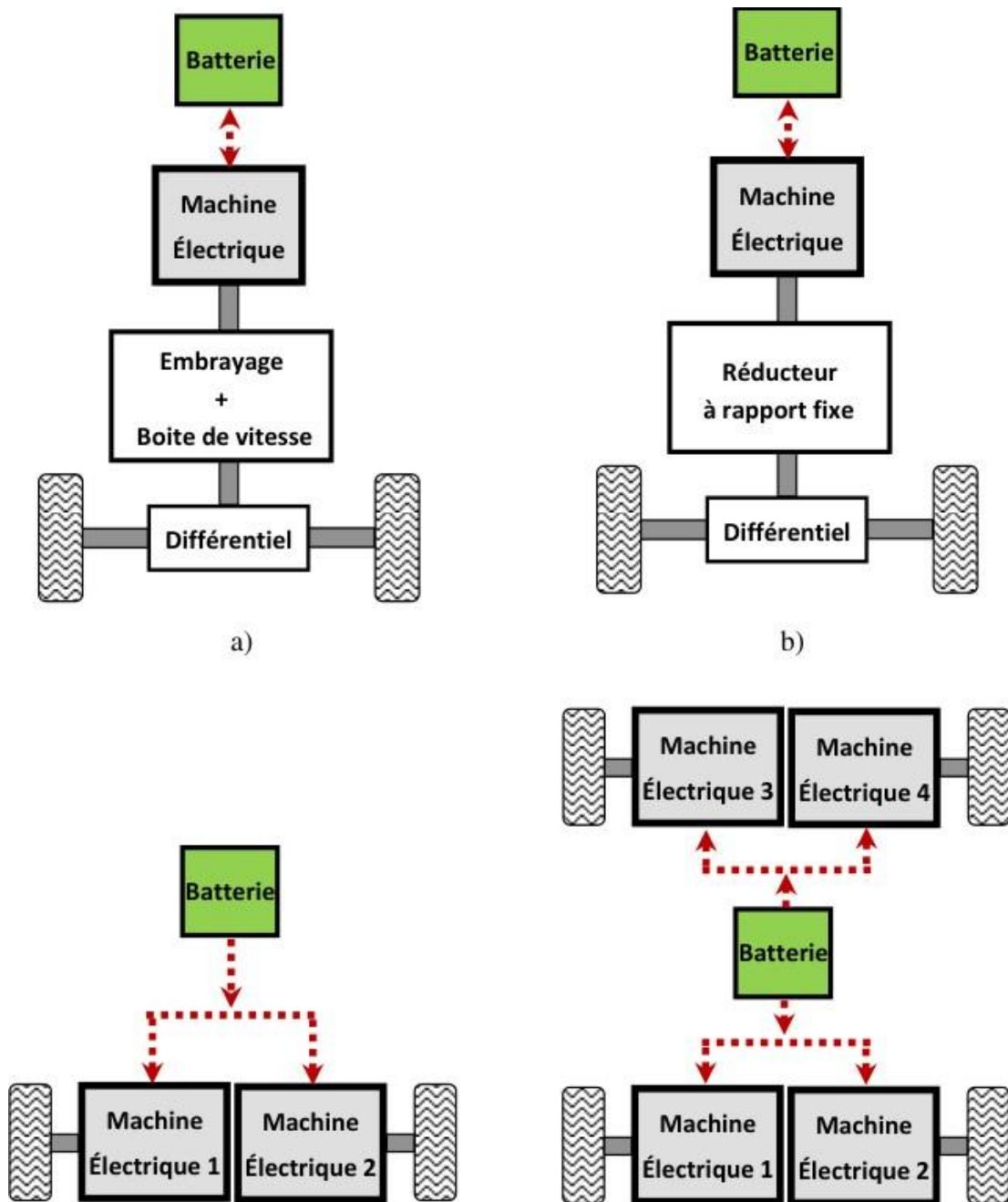


Figure I-17. Principales chaînes de traction d'un véhicule tout-électrique :

- Structure classique avec embrayage, boite de vitesse et le différentiel.
- Structure simplifiée avec réducteur à rapport fixe et le différentiel.
- Deux moteurs (intégrés ou non) dans les roues avant/arrières et avec/sans réducteur.
- Quatre moteurs (intégrés ou non) dans les roues avec/sans réducteur.

4.4. Commande des moteurs à courant continu :

Malgré les avantages énormes des machines électriques à courant alternatif, la machine à courant continu reste utilisée dans certaines applications, telles que l'électroménager, les machines à outils, la robotique, la traction de certains engins [9, 5], etc. La figure 1.18 présente le TGV Sud-Est qui est équipé d'un ensemble de hacheurs-moteurs à courant continu. Leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.



Figure 1-18 : TGV Sud-Est : l'apogée du moteur à courant continu

Globalement, les hacheurs sont très utilisés dans l'alimentation des moteurs pas à pas [10], figure 1.19. Il assure une commande précise de la vitesse du moteur à courant continu et aussi le freinage par récupération.

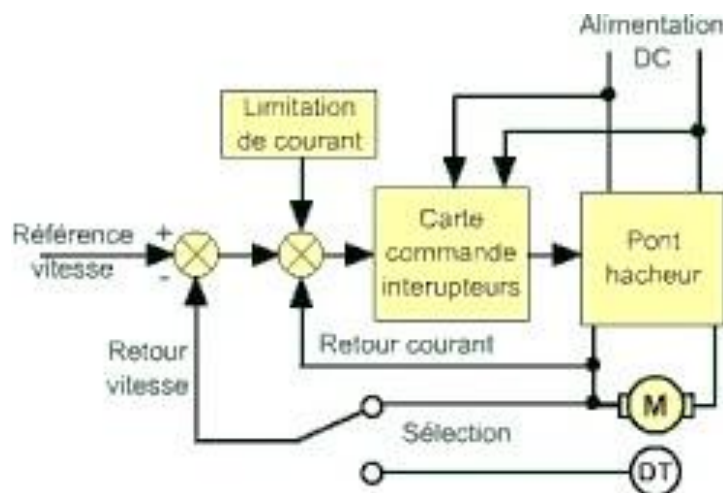


Figure 1-19 : Hacheur variateur de vitesse d'un moteur DC

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu des grandes familles de convertisseurs de puissance. Ensuite, nous avons détaillé les différentes topologies des convertisseurs DC-DC ainsi que leurs domaines d'application. Les chapitres restants seront consacrés à la présentation de la modélisation, du dimensionnement et de la réalisation de trois convertisseurs DC-DC, à savoir : le Buck, le Boost et le Buck-Boost à deux interrupteurs.

Chapitre II : Modélisation et simulation de plusieurs convertisseurs DC-DC

1. Introduction

Les convertisseurs statiques DC-DC sont des éléments électroniques essentiels utilisés dans une variété d'applications, allant des sources d'alimentation aux systèmes d'énergie renouvelable. Leur fonction est de transformer une tension continue d'une valeur en une autre, ce qui est souvent nécessaire pour alimenter des circuits électroniques spécifiques [9].

La modélisation des convertisseurs DC-DC est une étape cruciale dans leur conception, analyse et simulation, permettant de prédire leur comportement électrique et de les optimiser en fonction des besoins spécifiques d'une application [11].

Ce chapitre se concentre sur la modélisation et le dimensionnement des convertisseurs statiques de type Hacheur survolteur (Boost), dévolteur (Buck) et abaisseur-élevateur (buck-boost), ainsi que sur leur validation par simulation sous MATLAB/SIMULINK.

2. Modélisation de convertisseur statique DC-DC abaisseur « Buck »

Dans cette partie, nous essayons de présenter le principe de fonctionnement du convertisseur abaisseur ainsi que son dimensionnement pour répondre au besoin d'une application donnée. La validation du modèle et de la démarche de dimensionnement du Buck sera effectuée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

2.1. Principe de fonctionnement

Pour analyser le fonctionnement du hacheur Buck, nous utilisons son schéma de base donné par la figure 2.1. Lorsque le commutateur principal est activé (fermé), il permet au courant de circuler à travers la bobine et la charge. Le condensateur se charge aussi dans cette phase et le duo « inductance-charge » se comporte comme un diviseur de tension qui génère une tension aux bornes de la charge inférieure à la tension de la source. Lorsque le commutateur est désactivé (ouvert), l'énergie stockée dans le condensateur et la bobine est libérée sur la charge, ce qui assure une tension filtrée et presque identique dans les deux phases de fonctionnement. Cependant, la tension induite aux bornes de

L'inductance s'inverse, et l'utilisation d'une diode devient indispensable pour assurer la continuité du passage du courant dans le même sens dans la bobine [9].

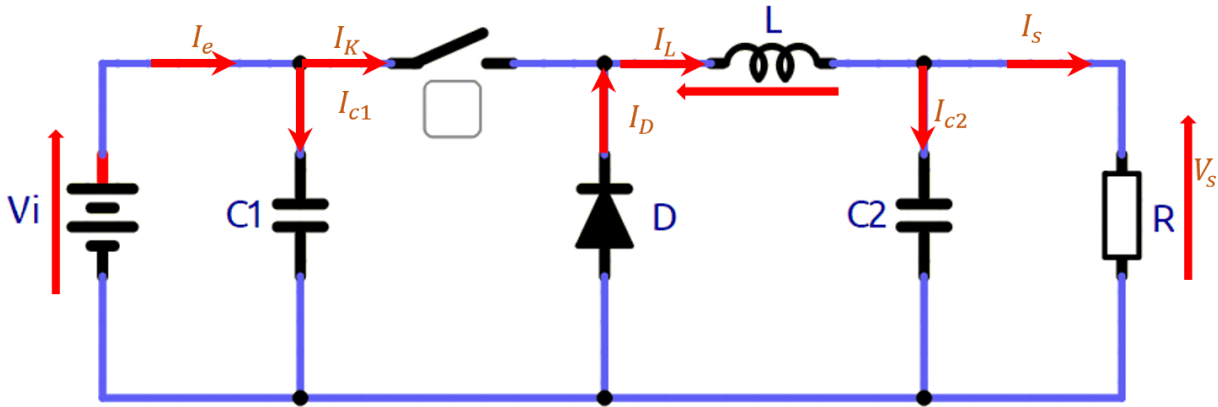


Figure 2-1 : Schéma bloc du convertisseur Buck

2.2. Modèle dynamique

Nous considérons le mode de fonctionnement continu, c.-à-d. le courant ne s'annule pas dans la bobine.

2.2.1 Interrupteur fermée (phase 1) :

Dans ce cas, lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes :

$$I_{C1}(t) = \frac{C_1 dV_i(t)}{dt} = I_e(t) - I_L(t) \tag{2.1}$$

$$I_{C2}(t) = \frac{C_2 dV_s(t)}{dt} = I_L(t) - I_s(t) = I_L(t) - \frac{V_s(t)}{R} \tag{2.2}$$

$$V_L(t) = \frac{L dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_s(t) \tag{2.3}$$

2.2.2 Interrupteur ouvert (phase 2) :

Dans ce cas, les équations dynamiques sont les suivantes :

$$I_{C1}(t) = \frac{C_1 dV_e(t)}{dt} = I_e(t) \tag{2.4}$$

$$I_{C2}(t) = \frac{C_2 dV_s(t)}{dt} = I_L(t) - I_s(t) = I_L(t) - \frac{V_s(t)}{R} \tag{2.5}$$

$$V_L(t) = \frac{L dI_L(t)}{dt} = -V_s(t) \tag{2.6}$$

2.2.3 Équation du rapport cyclique :

A partir des équations (2.3) et (2.6) et supposant que l'inductance est suffisamment grande pour que le courant qui varie linéairement, on peut déduire :

$$L \frac{dI_L(t)}{dt} = L \frac{\Delta I_L}{\Delta T_{on}} = V_i(t) - V_s(t) \Rightarrow \Delta I_L = (V_i(t) - V_s(t)) \Delta T_{on} \quad (2.7)$$

$$= (V_i(t) - V_s(t)) DT$$

$$L \frac{dI_L(t)}{dt} = L \frac{\Delta I_L}{\Delta T_{off}} = -V_s(t) \Rightarrow \Delta I_L = -V_s(t) \Delta T_{off} = -V_s(t)(1 - D)T \quad (2.8)$$

Sachant que la variation du courant ΔI_L est la même dans les deux phases de fonctionnement (interrupteur fermée et ouvert) et elles sont de signes opposés puisque le courant augmente dans la première phase (interrupteur fermée) et diminue dans la deuxième phase (interrupteur ouvert). Ces remarques permettent de déduire l'égalité suivante :

$$(V_i(t) - V_s(t))DT = V_s(t)(1 - D)T \quad (2.9)$$

Donc, le rapport cyclique D peut être donné par l'équation suivante :

$$0 \leq D = \frac{V_s(t)}{V_i(t)} \leq 1 \quad (2.10)$$

2.3. Dimensionnement du hacheur Buck

La détermination des valeurs des composants du Buck, notamment l'inductance et le condensateur de sortie, se base sur le modèle mathématique du Buck et des spécificités de l'application visée. Classiquement le cahier des charges fixe les valeurs de la tension d'entrée et de sortie, la fréquence de commutation de l'interrupteur, les oscillations de la tension et du courant [10].

2.3.1. Calcul de l'inductance :

Généralement les fabricants fournissent des fiches techniques qui donnent les intervalles de choix des inductances. Cependant, plus la valeur de l'inductance est élevée, plus le courant de sortie soit moins oscillant. A l'inverse, plus la valeur de l'inductance est faible, plus la taille de l'inductance est petite.

Mais l'inductance doit toujours avoir une capacité de courant supérieure à la valeur maximale de courant.

Dans le cas général, l'équation suivante donne une bonne estimation pour la bonne valeur de l'inductance :

$$L = \frac{V_s(V_i - V_s)}{\Delta I_L f_s V_i} \quad (2.11)$$

Avec :

f_s est la fréquence d'échantillonnage, ΔI_L l'oscillation du courant désirée qui varie entre 20% et 40% du courant de la charge I_s .

2.3.2. Calcul du condensateur de sortie :

Les condensateurs à faible résistance série équivalente (ESR) sont recommandés pour cette application. Les équations suivantes peuvent être utilisées pour sélectionner les valeurs du condensateur de sortie pour obtenir une fluctuation de tension de sortie souhaitée :

$$C = \frac{(1 - D) * V_s}{(8f_s^2 * \Delta V_s)} \quad (2.12)$$

ΔV_s les oscillations désirées de la tension de sortie qui varient entre 2% et 5% de la tension de sortie.

2.4. Validation par simulation du dimensionnement du Buck

Pour valider le modèle et la démarche de dimensionnement du convertisseur Buck, nous proposons l'exemple d'application suivant :

2.4.1. Données de l'application :

- La tension à la source : 100 V.
- La tension de charge : 60 V.
- Le rendement : 95 %.
- Fréquence de commutation : 1000 Hz.

- La charge connectée à la source : 50 Ω .
- Le taux d'oscillations admissible du courant : 20 %
- Le taux d'oscillations admissible de la tension : 2 %

2.4.2. Calcul de l'inductance et du condensateur du Buck :

Le rapport cyclique :

$$D = \frac{V_{charge}}{V_{source}} = \frac{60}{100} = 0.6 \quad (2.13)$$

Le courant de la charge :

$$I_{charge} = \frac{V_{charge}}{R} = \frac{60}{50} = 1.2 \text{ A} \quad (2.14)$$

Le courant de source :

$$I_{source} = \frac{V_{charge} * I_{charge}}{rendement * V_{source}} = 0.7579 \quad (2.15)$$

L'oscillation admissible du courant de l'inductance :

$$dI = Taux_{dI} * I_{source} = 0.2 * 0.7576 = 0.1516 \text{ A} \quad (2.16)$$

L'inductance de Buck :

$$L = D \frac{V_{source} - V_{charge}}{F_{sw} * dI} = 0.1583 \text{ H} \quad (2.17)$$

L'oscillation admissible de la tension de charge :

$$dV = Taux_{dV} * V_{charge} = 1.2 \text{ V} \quad (2.18)$$

Capacité de sortie du Buck :

$$C = \frac{(1 - D) * V_{charge}}{(8F_{sw}^2 * DV)} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ F} \quad (2.19)$$

2.4.3. Résultats de simulation du Buck :

La figure 2.2 présente le schéma bloc réalisé avec le logiciel Matlab pour simuler le fonctionnement du convertisseur Buck. Les valeurs utilisées dans cette simulation sont les mêmes que celles de l'exemple d'application de la démarche de dimensionnement, présenté précédemment.

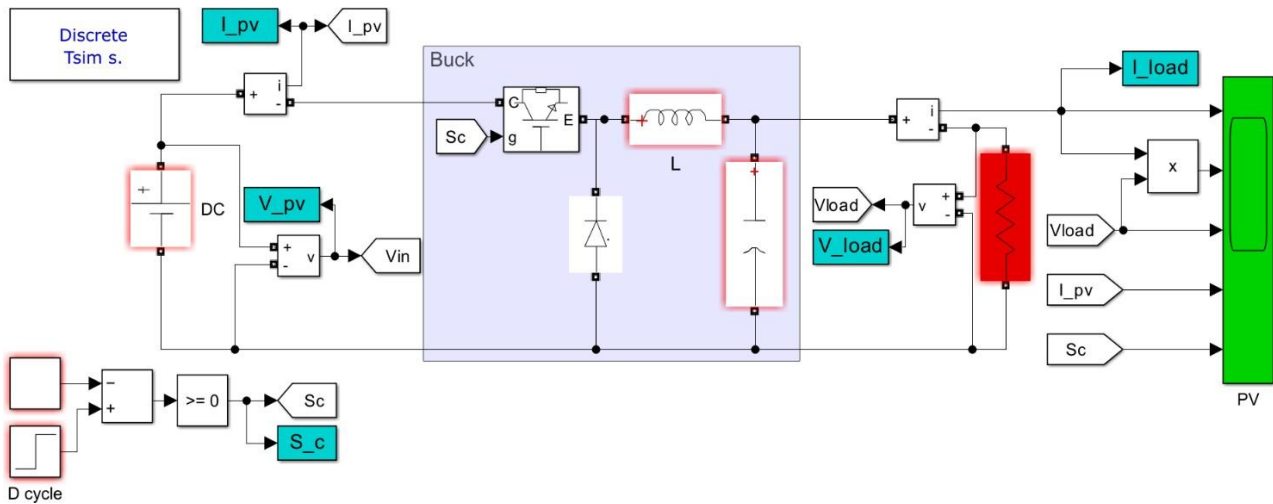


Figure 2-2 : Schéma bloc du convertisseur Buck sous Matlab/Simulink

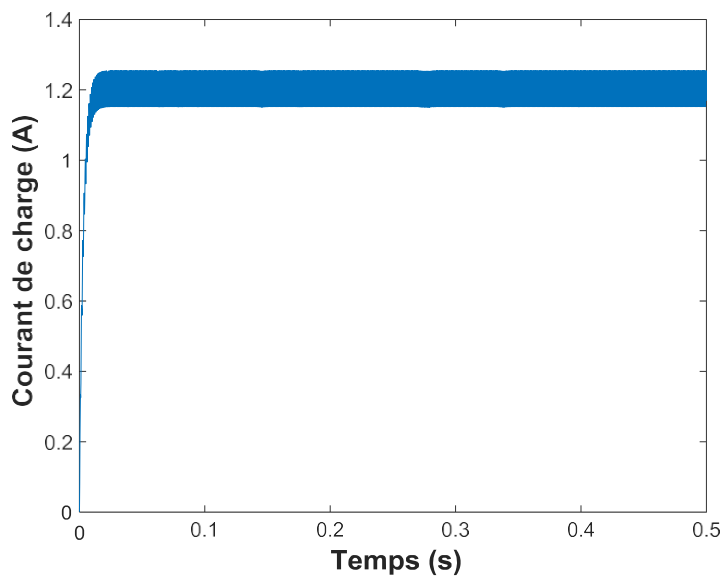


Figure 2-3 : Courant de la charge

La figure 2.3 montre le courant de la charge. Il est clair que sa valeur moyenne en régime permanent est égale à 1,2 A, ce qui correspond exactement à la valeur calculée lors du dimensionnement du convertisseur Buck.

La figure 2.4 montre le courant de la source qui est égale au courant de l'inductance pendant la phase 1 (interrupteur fermée) et nul pendant la phase 2 (interrupteur ouvert).

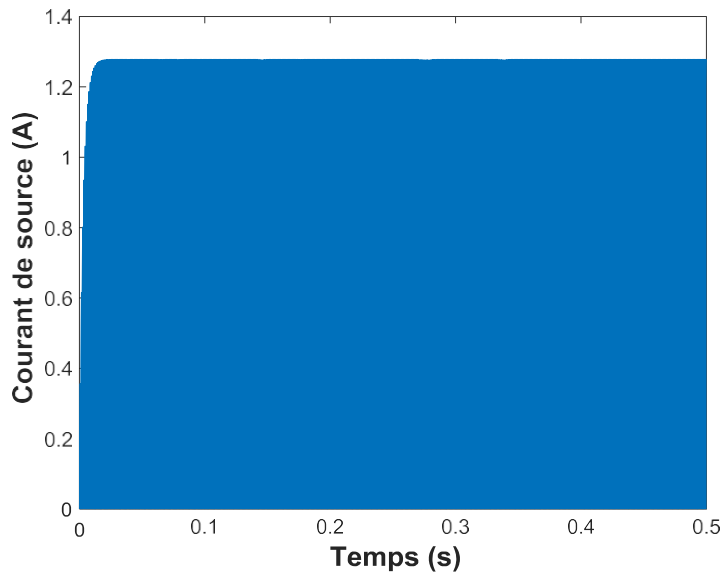


Figure 2-4 : Courant de la source

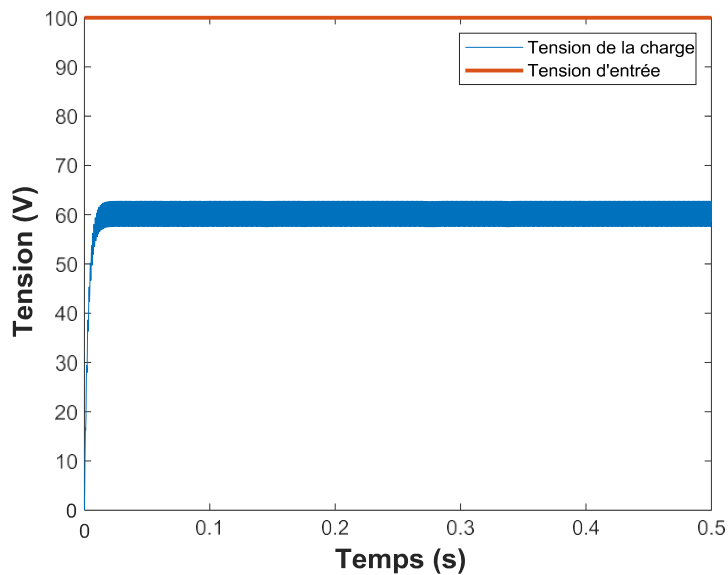


Figure 2-5 : Tensions d'entrée et de sortie

La figure 2.5 montre les tensions d'entrée et de sortie. Nous constatons que le niveau de la tension moyenne de sortie est égale 60 V, ce qui correspond à la tension calculée.

3. Modélisation du convertisseur DC-DC élévateur (Boost) :

Dans cette partie, nous présenterons le principe de fonctionnement du convertisseur Boost ainsi que

son dimensionnement. La validation du modèle et de la démarche de dimensionnement du Boost sera effectuée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

3.1. Principe de fonctionnement du Boost

Le convertisseur Boost, également connu sous le nom d'élévateur de tension, est illustré par le schéma de la figure 2.6. Il s'agit d'un convertisseur continu-continu (DC-DC) direct. L'alimentation en entrée est de type courant continu en série avec une inductance, tandis que la sortie est une charge de type tension continue en parallèle avec un condensateur. L'interrupteur principal K peut être remplacé par un transistor MOSFET ou IGBT, car le courant est toujours positif et les commutations doivent être contrôlées (à la fois lors de la mise en marche et de l'arrêt du courant).

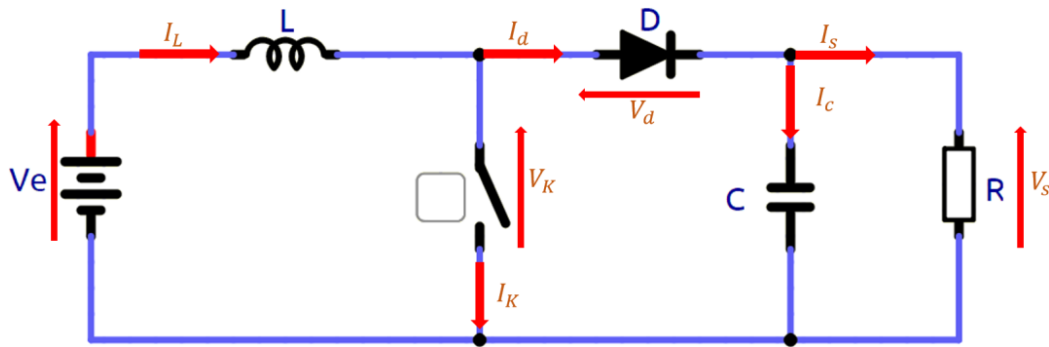


Figure 2-6 : schéma bloc d'un convertisseur Boost

Lorsque K est fermé durant l'intervalle $[0, DT]$, le circuit électrique du convertisseur est présenté par la figure 2.7. Les équations qui caractérisent ce fonctionnement sont les suivantes :

$$V_e = L \frac{dI_L}{dt} \tag{2.20}$$

$$I_c = C \frac{dV_C}{dt} = -I_s = -\frac{V_s}{R} \tag{2.21}$$

Sachant que le courant varie linéairement, l'équation (2.16) peut être écrite sous la forme suivante :

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} DT \tag{2.22}$$

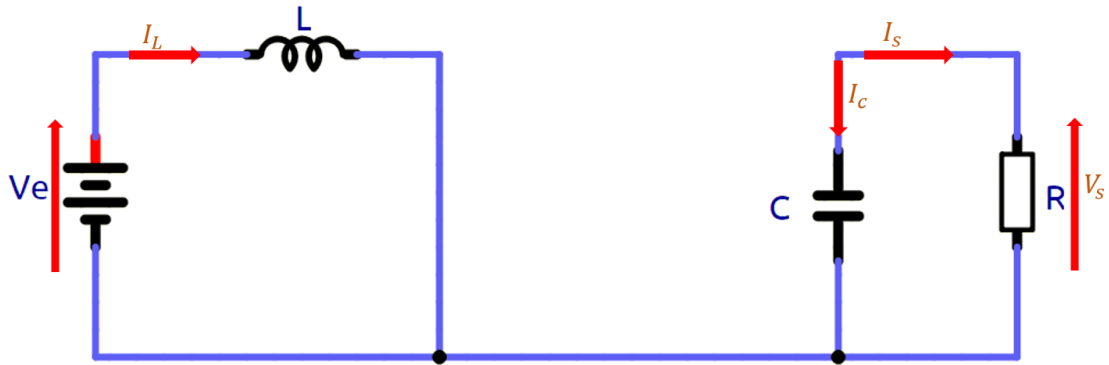


Figure 2-7 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé

I_{max} et I_{min} : représentent respectivement la valeur maximale et minimale de courant dans l'inductance.

Lorsque K est ouvert durant l'intervalle $[DT, T]$, le circuit électrique prend la forme donnée par la figure 2.8.



Figure 2-8 : Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert

L'application de la loi des mailles sur ce circuit, donne les équations (2.23) et (2.24) :

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_e - V_s \tag{2.23}$$

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_e - v_s}{L} (1 - D)T \tag{2.24}$$

La combinaison entre les deux équations (2.19) et (2.21), donne la relation entre la tension de sortie et la tension d'entrée suivante :

$$V_s = \frac{1}{(1 - D)} V_e \tag{2.25}$$

D'après l'équation on peut contrôler la valeur moyenne de la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

3.2. Dimensionnement du convertisseur Boost

Comme pour le cas du Buck, la détermination des valeurs de l'inductance et du condensateur de sortie, se base sur le modèle mathématique du Boost et des spécificités de l'application visée. Les valeurs de la tension d'entrée et de sortie, la fréquence de commutation de l'interrupteur et les oscillations de la tension et du courant sont souvent fixés par le cahier des charges.

3.2.1. Calcul de l'inductance :

La manipulation de l'équation (2.16), donne l'équation (2.26) qui permet le calcul de l'inductance du convertisseur Boost.

$$L = \frac{D * V_e}{f_s * \Delta I_L} \quad (2.26)$$

f_s et ΔI_L sont la fréquence de commutation et les oscillations ($I_{max}-I_{min}$) du courant de l'inductance.

3.2.2. Calcul de la capacité de sortie :

A partir de l'équation (2.17), on peut déduire l'expression de la capacité de sortie du Boost :

$$C = \frac{D * I_s}{f_s * \Delta V_C} \quad (2.27)$$

3.3. Validation par simulation du dimensionnement du Boost

Pour valider le modèle et la démarche de dimensionnement du convertisseur Boost, nous utilisons l'exemple d'application suivant :

- La tension à la source : 60 V.
- La tension de charge : 120 V.
- Le rendement : 95 %.

- Fréquence de commutation : 1000 Hz.
- La charge connectée à la source : 50 Ω .
- Le taux d'oscillations admissible du courant : 20 %
- Le taux d'oscillations admissible de la tension : 2 %

3.3.1. Calcul de l'inductance et du condensateur de sortie :

Rapport cyclique :

$$D = \frac{V_{charge} - V_{source}}{V_{charge}} = 0.5 \quad (2.28)$$

Le courant de la charge :

$$I_{charge} = \frac{V_{charge}}{R} = 2.4 \text{ A} \quad (2.29)$$

Le courant de source :

$$I_{source} = \frac{P_{charge}}{\text{rendement} * V_{source}} = 5.0526 \text{ A} \quad (2.30)$$

L'oscillation admissible du courant de l'inductance :

$$\Delta I_L = \text{Taux}_{\Delta I_L} * I_{source} = 1.0105 \text{ A} \quad (2.31)$$

L'inductance du Boost :

$$L = \frac{D * V_{source}}{f_s * \Delta I_L} = 0.0297 \text{ H} \quad (2.32)$$

L'oscillation admissible de la tension de la charge :

$$\Delta V_C = \text{Taux}_{\Delta V_C} * V_{charge} = 2.4 \text{ V} \quad (2.33)$$

La capacité de sortie du Boost :

$$C = \frac{D * I_{charge}}{f_s * \Delta V_C} = 5 * 10^{-4} \text{ F} \quad (2.34)$$

3.3.1. Résultats de simulation du Boost :

La figure 2.9 présente le schéma bloc réalisé avec le logiciel Matlab pour simuler le fonctionnement du convertisseur Boost. Les valeurs utilisées dans cette simulation sont calculés dans le paragraphe précédent.

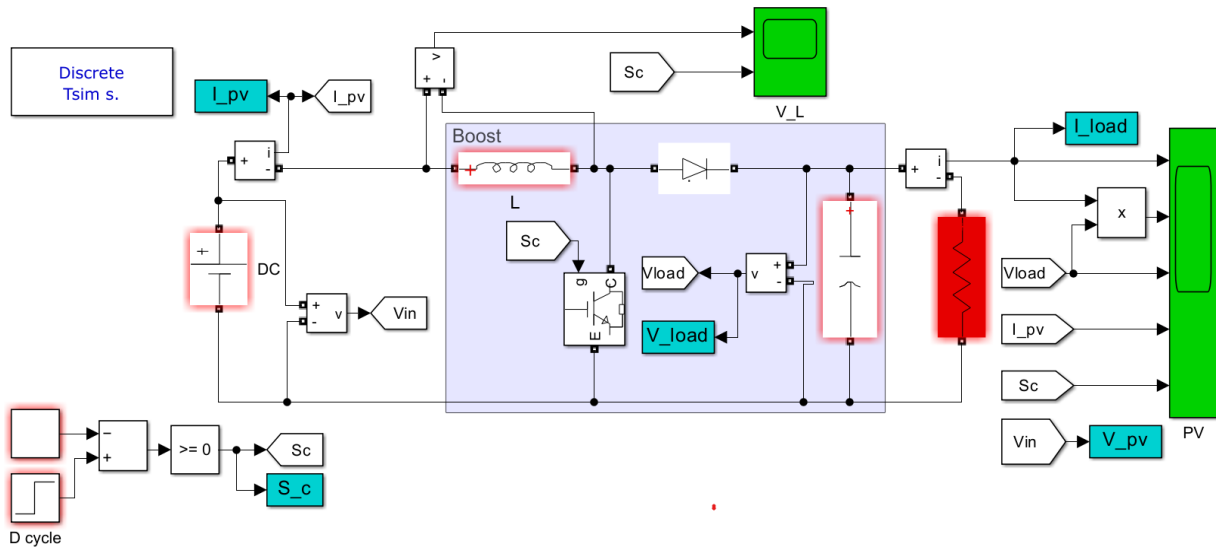


Figure 2-9 : Schéma bloc du convertisseur Boost sous Matlab/Simulink

La figure 2.10 montre l'évolution des tensions de la charge et de la source. Il est clair que leurs valeurs au régime permanent correspondent aux valeurs calculées, à savoir : 60 V à l'entrée et 120 V à la sortie. La figure 2.11 présente les formes des courants de la source et de la charge. Il est évident les valeurs des deux courants correspondent aux valeurs calculées dans l'application précédente.

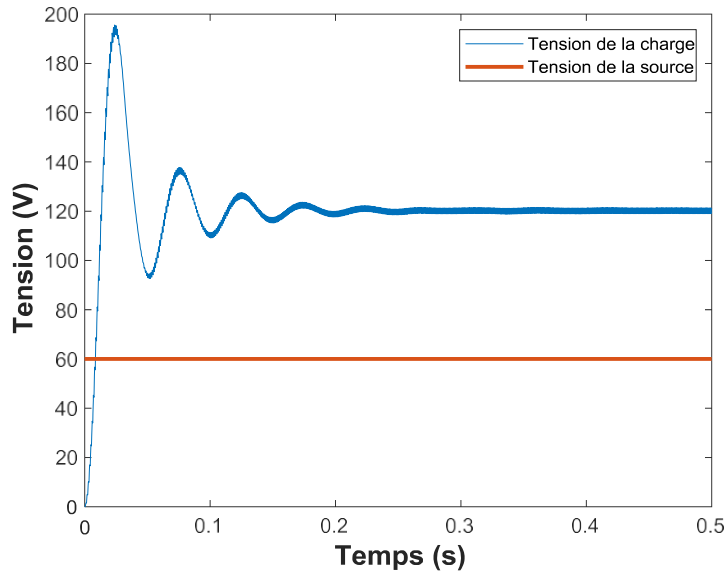


Figure 2-10 : Tensions de la charge et de la source

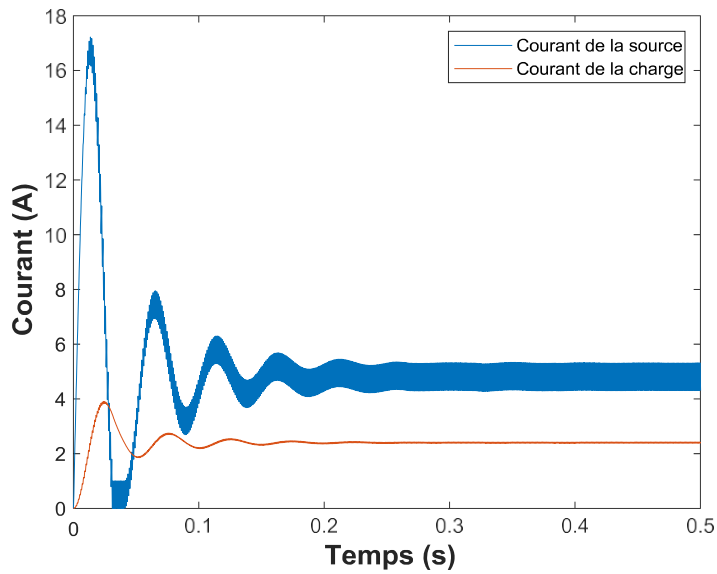


Figure 2-11 : Courants de la charge et de la source

4. Modélisation du convertisseur Buck-Boost

4.1. Principe de fonctionnement

La figure (2.12) présente la structure de base du convertisseur Buck-Boost classique à deux interrupteurs.

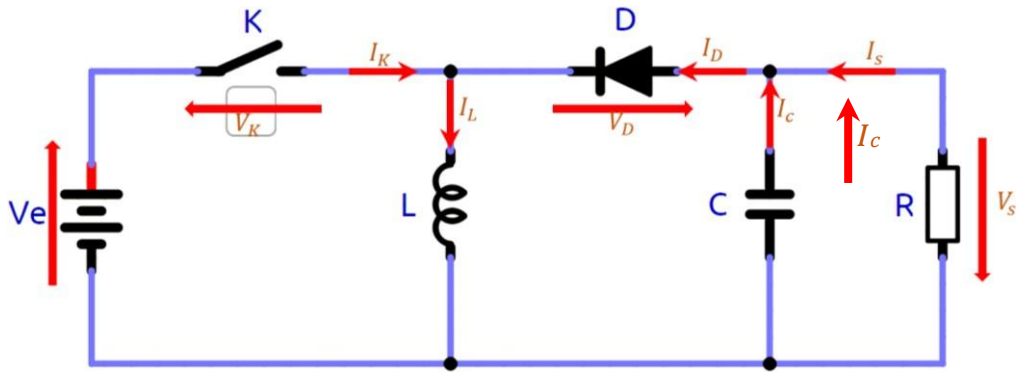


Figure 2-12 : Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost (SimulIDE).

Lorsque K est fermée durant l'intervalle $[0, DT]$, la source charge l'inductance et le condensateur alimente la charge. Le circuit électrique du convertisseur sera comme montré dans la figure 2.13.

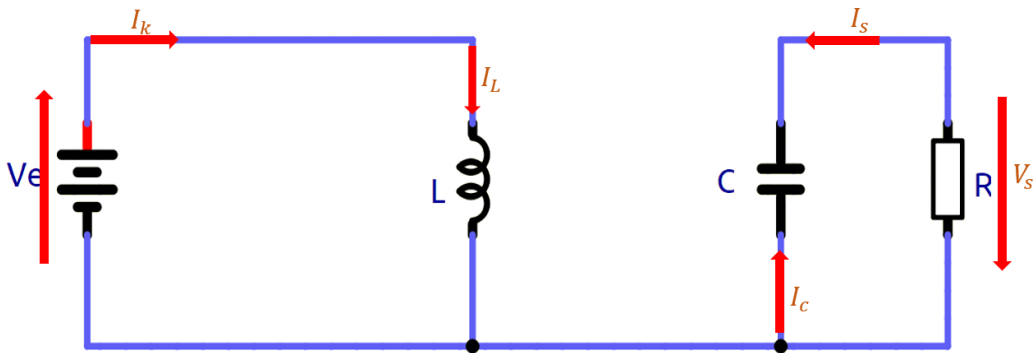


Figure 2-13 : Circuit équivalent du Buck-Boost quand l'interrupteur est fermé.

Les équations qui régissent ce circuit sont les suivantes :

$$V_e = L \frac{dI_L}{dt} \tag{2.35}$$

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} DT \tag{2.36}$$

$$I_c = C \frac{dV_C}{dt} = -I_s = -\frac{V_s}{R} \tag{2.37}$$

Entre l'intervalle $[DT, T]$, l'interrupteur est ouvert et la tension aux bornes de l'inductance change de sens et alimente la charge et le condensateur de sortie. Les équations qui régissent cette phase sont les suivantes :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = -V_s \tag{2.38}$$

$$I_{min} = I_{max} - \frac{V_s}{L}(1 - D)T \tag{2.39}$$

$$I_c = C \frac{dV_c}{dt} = I_L - \frac{V_s}{R} \tag{2.40}$$

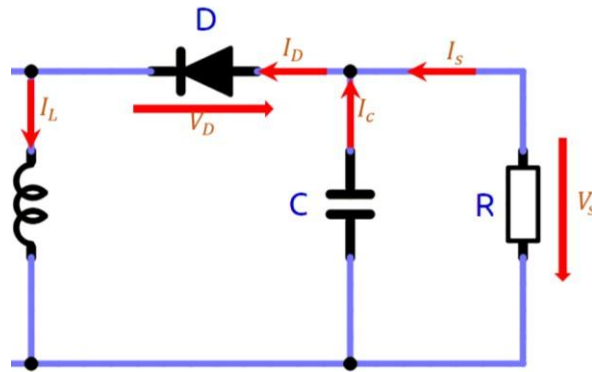


Figure 2-14 : Circuit équivalent du Buck-Boost quand l'interrupteur est ouvert

La substitution de l'équation (2.36) dans l'équation (2.39) donne la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie suivante :

$$V_s = \frac{D}{1 - D} V_e \tag{2.41}$$

Le convertisseur Buck-Boost produit une tension de sortie de polarité opposée à celle de la tension d'entrée. L'amplitude de la tension de sortie peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée en fonction de la valeur du rapport cyclique ($D < 0.5$ inférieure ; $D > 0.5$ supérieure).

4.2. Principe de fonctionnement

La détermination des valeurs de l'inductance et du condensateur de sortie, se base sur les équations du Buck-Boost et les valeurs de la tension d'entrée/sortie, la fréquence de commutation et les oscillations de la tension et du courant qui imposées par le cahier des charges.

4.2.1. Calcul de l'inductance :

En remplaçant la dérivée dans l'équation (2.35) par l'approximation suivante :

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{\Delta T} = \frac{\Delta I_L}{DT} = \frac{f_s \Delta I_L}{D} \tag{2.42}$$

On trouve l'équation qui permet le calcul de l'inductance L :

$$L = \frac{D * V_{source}}{f_s * \Delta I_L} \quad (2.43)$$

4.2.1. Calcul de la capacité :

La capacité de sortie du Buck-boost peut être calculée par l'équation suivante :

$$C = \frac{V_e * D^2}{\Delta V_s * f_s * R(1 - D)} \quad (2.44)$$

4.3. Validation par simulation du dimensionnement du Boost

Pour valider le modèle et la méthode de dimensionnement simple du convertisseur Buck-Boost, nous l'appliquant sur le cahier des charges suivant :

- La tension à la source : 100 V.
- La tension de charge : -70 V.
- Le rendement : 95 %.
- Fréquence de commutation : 1000 Hz.
- La charge connectée à la source : 50 Ω .
- Le taux d'oscillations admissible du courant : 30 %
- Le taux d'oscillations admissible de la tension : 5 %

3.3.1. Calcul de l'inductance et du condensateur de sortie :

Rapport cyclique :

$$D = \frac{V_{charge}}{V_{charge} + V_{source}} = 0.4118 \quad (2.45)$$

Le courant de la charge :

$$I_{charge} = \frac{P_{charge}}{V_{charge}} = 1.4 A \quad (2.46)$$

Le courant de source :

$$I_{source} = \frac{P_{charge}}{rendement * V_{source}} = 1.0316 A \quad (2.47)$$

L'oscillation admissible du courant de l'inductance :

$$\Delta I_L = Taux_{\Delta I_L} * I_L = 0.3095 A \quad (2.48)$$

Inductance du Buck-boost :

$$L = \frac{D * V_{source}}{f_s * \Delta I_L} = 0.1331 H \quad (2.49)$$

L'oscillation admissible de la tension de charge :

$$\Delta V_C = Taux_{\Delta V_C} * V_C = 3.5 V \quad (2.50)$$

L'capacité de sortie du Buck_boost :

$$C = \frac{V_{source} * D^2}{\Delta V_C * f_s * R(1 - D)} = 1.6471 * 10^{-4} F \quad (2.51)$$

4.3.2. Résultats de simulation du Buck-Boost :

La figure 2.15 présente le schéma bloc du convertisseur Buck-Boost réalisé avec le logiciel Matlab. L'objectif de cette simulation est la validation du modèle de la méthode de dimensionnement de ce convertisseur. Les valeurs utilisées dans cette simulation sont calculés dans le paragraphe précédent.

La figure 2.16 montre l'évolution des tensions de la charge et de la source. Il est clair que le convertisseur se comporte comme un abaisseur de tension mais il fournit une tension négative. Cependant, les niveaux des tensions au régime permanent correspondent aux valeurs calculées, à savoir : 100 V à l'entrée et -70 V à la sortie.

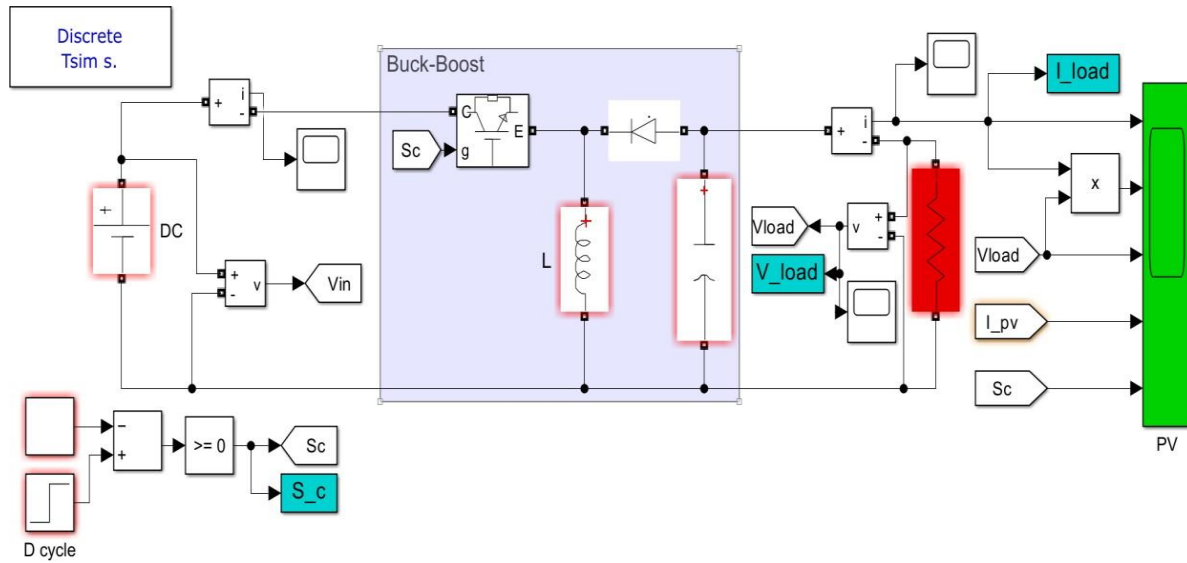


Figure 2-15 : Schéma bloc du Buck-Boost sous Matlab/Simulink

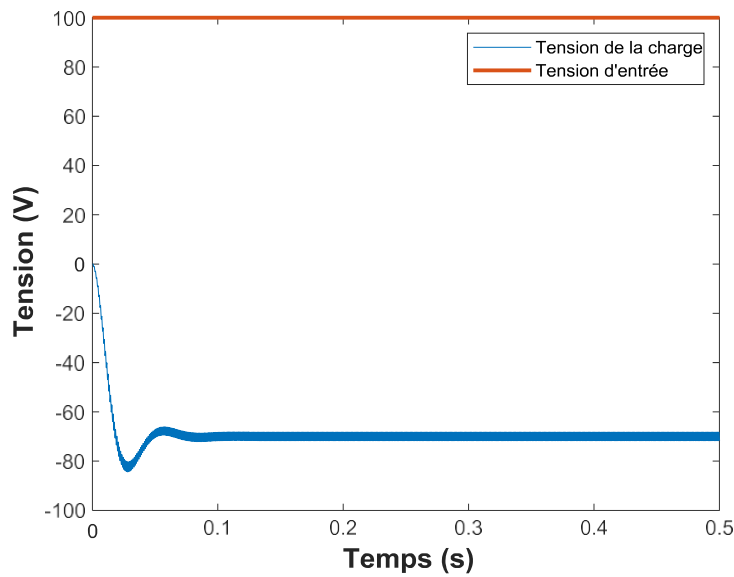


Figure 2-16 : Tensions de la charge et de la source (abaisseur)

La figure 2.17 présente les formes des courants de la source et de la charge. Même constat que pour le cas des tensions, la simulation donne les mêmes valeurs des courants calculés avec une précision remarquable.

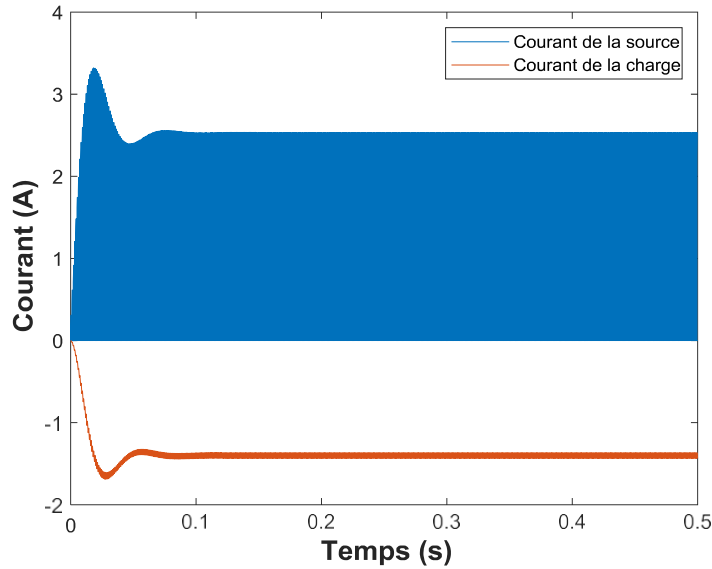


Figure 2-17 : Courants de la charge et de la source (abaisseur)

Les figures 2.18 et 2.19 montrent l'évolution des tensions et des courants de la charge et de la source pour un mode de fonctionnement élévateur de tension. En effet, nous avons choisi une tension de sortie de -130 V et une tension de sortie de 100 V. pour le calcul de l'inductance et de la capacité il suffit de suivre les étapes présentées précédemment pour le mode abaisseur. D'après les résultats de simulation, on constate que le dimensionnement est précis et les niveaux des tensions obtenues correspondent aux calculs analytiques.

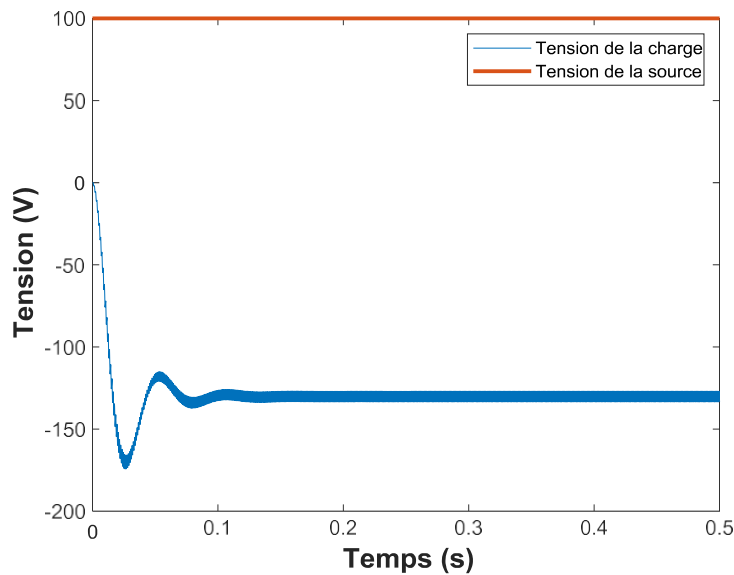


Figure 2-18 : Tensions de la charge et de la source (élévateur)

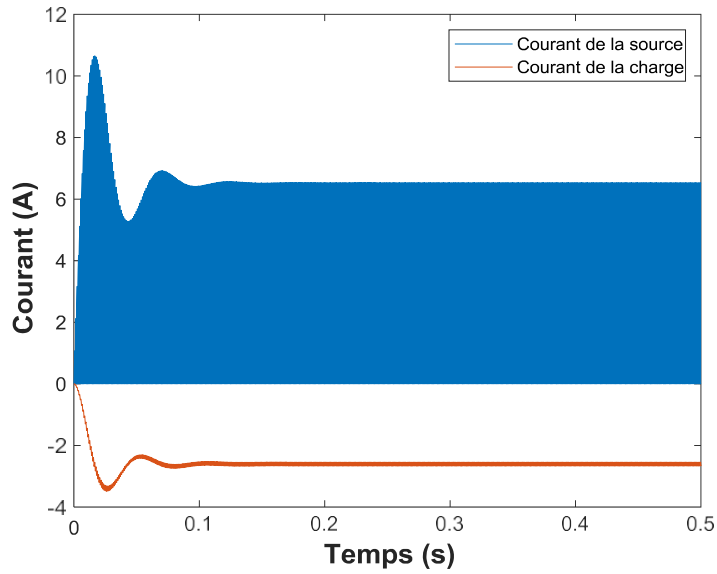


Figure 2-19 : Courants de la charge et de la source (élévateur)

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation, le dimensionnement et la simulation par le logiciel MATLAB/SIMULINK de trois convertisseurs DC-DC, à savoir : le Buck (abaisseur), le Boost (élévateur) et le Buck-Boost (abaisseur-élévateur). Les résultats de simulation ont montré que la démarche de dimensionnement utilisée dans ce travail est très précise et donne des tensions et des courants qui correspondent aux valeurs prédéfinis dans le cahier des charges.

Chapitre III : Etude expérimentale des convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous commençons par une présentation de la carte ARDUINO UNO et certains composants importants et indispensables pour la réalisation des circuits d'électronique de puissance. Ensuite, nous présenterons les montages réalisés sur la plaque d'essais et les mesures sur l'oscilloscope pour les trois convertisseurs (Buck, Boost et Buck-Boost) présentés dans le deuxième chapitre.

2. Présentation des composants utilisés

2.1 ARDUINO UNO

Arduino est une plateforme open-source de prototypage électronique basée sur du matériel et des logiciels faciles à utiliser. Les cartes Arduino sont capables de lire des entrées numériques ou analogiques et de les convertir en une sortie pour activer un moteur, allumer une LED, publier quelque chose en ligne, etc. La figure 3.1 présente une carte ARDUINO de type UNO qui est la plus célèbre de la famille ARDUINO.

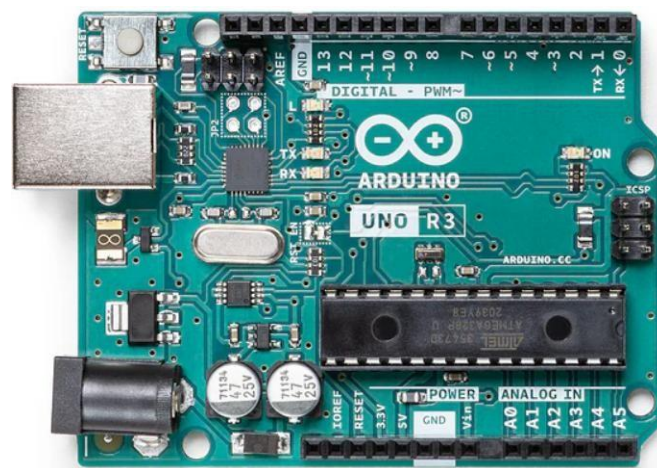


Figure 3-1 : Arduino UNO (<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>)

2.2. Diode

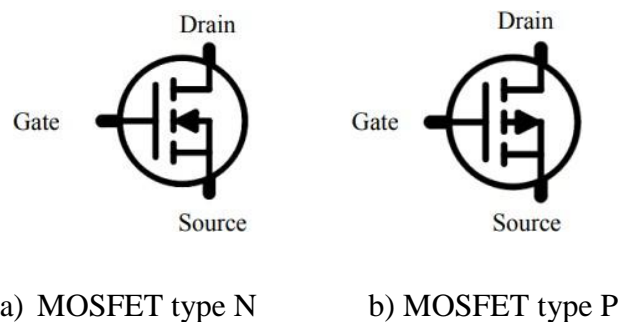
Une diode est un composant semi-conducteur très important dans le domaine d'électronique en générale, figure 3.2. Elle permet au courant de circuler facilement dans une direction, mais restreint fortement le courant de circuler dans la direction opposée [1, 3].



Figure 3-2 : Diode simple

2.3. MOSFET

Le MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), figure 3.3, est un composant électronique important, notamment dans l'électronique de puissance et l'industrie des micro-processeurs car il constitue l'élément de base permettant la construction de portes logiques et des interrupteurs commandable à l'ouverture et la fermeture facilement [1, 2, 3].



a) MOSFET type N

b) MOSFET type P

Figure 3-3 : MOSFET

2.4. Inductance

On appelle inductance tous les dipôles, tels qu'une bobine ou une self, qui, lorsqu'ils sont parcourus par un courant électrique, créent un champ magnétique. L'inductance est utilisée généralement comme étage de stockage de l'énergie, pour le filtrage du courant ou pour la création du champ magnétique. Sa valeur dépend du nombre de spires et du noyau utilisé pour canaliser le flux magnétique [1, 2, 3]. La figure 3.4 montre une inductance torique.



Figure 3-4 : Différentes bobines toriques (<https://www.istockphoto.com>)

2.5. La résistance

Une résistance (ou résistor) est un composant électronique passif qui limite le flux de courant électrique dans un circuit. Elle est conçue pour avoir une valeur de résistance spécifique, exprimée en ohms (Ω), et joue un rôle crucial dans le contrôle et la régulation des signaux électriques [1, 2, 3].



Figure 3-5 : Résistance

2.6. Le condensateur

Un condensateur (ou capacitateur) est un composant électronique passif capable de stocker de l'énergie électrique sous la forme d'un champ électrique. Il est constitué de deux conducteurs (appelés électrodes ou plaques) séparés par un matériau isolant (appelé diélectrique) [1, 2, 3]. Les condensateurs sont utilisés pour :

- Lisser les tensions dans les alimentations électriques et éliminer le bruit.
- Stockage de l'énergie dans des circuits comme les convertisseurs DC-DC, les flashes d'appareil photo, les onduleurs, etc.

- Couplage et découplage entre différentes parties d'un circuit, en permettant de transmettre des signaux alternatifs tout en bloquant les composants continus.

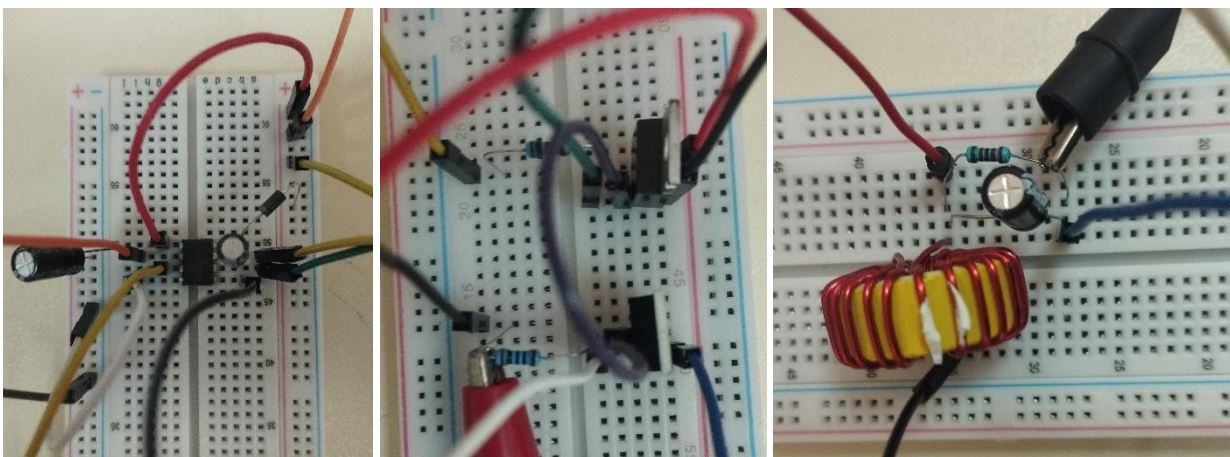


Figure 3-6 : Condensateurs (<https://www.istockphoto.com>)

3. Réalisation des montages

3.1 Montage du convertisseur Buck

La figure 3.7 montre le montage expérimental du convertisseur Buck réalisé sur trois plaques d'essais : la première pour le driver des MOSFETs, la deuxième pour bras composé de deux MOSFETS et le troisième regroupant la charge, l'inductance et le condensateur.



a) Driver

b) Bras de puissance

c) filtre L-C et la charge R

Figure 3.7 : Montage du Buck sur trois plaques d'essais

La figure 3.8 montre les résultats enregistrés sur l'oscilloscope pour un rapport cyclique de 25%, une tension d'entrée de 12 V et une fréquence de commutation d'environ 62 kHz. On voit que la tension de sortie (signal rouge) est de 3 V (2 V pour 1 cm), ce qui représente 25% de 12 V. Le signal jaune représente la commande envoyée au MOSFET (10 V pour 1 cm).



Figure 3-8 : Signal de commande et tension de sortie pour $D=25\%$

La figure 3.9 montre les résultats enregistrés sur l'oscilloscope pour un rapport cyclique de 50%, On voit que la tension de sortie (signal rouge) est presque 6 V, ce qui représente 50% de 12 V.

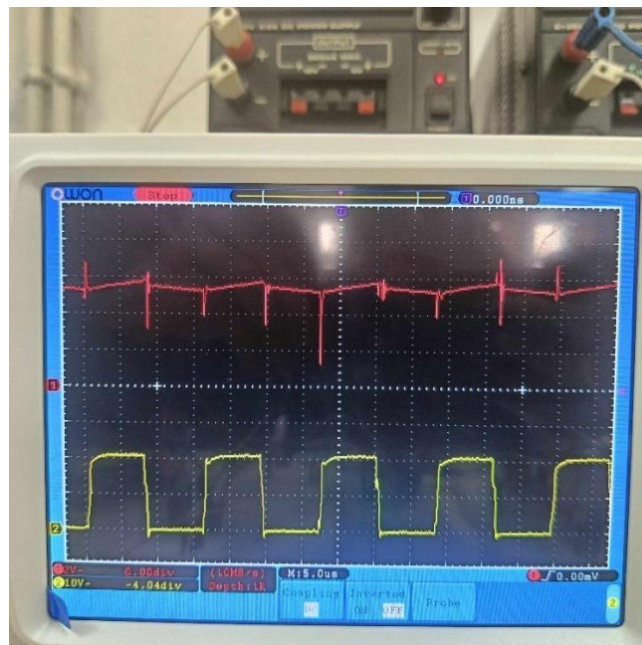


Figure 3-13 : Signal de commande et tension de sortie pour $D=75\%$

La figure 3.10 montre la commande et la tension de sortie pour un rapport cyclique de 75%, On voit que la tension de sortie (signal rouge) est 8 V, ce qui représente presque 75% de 12 V. La différence est due aux pertes Ohmiques qui deviennent importantes lorsque la tension, donc le courant, augmente.



Figure 3.10 : Signal de commande et tension de sortie pour $D=75\%$

3.2 Montage du convertisseur Boost

Pour réaliser le montage du Boost, il suffit de permuter entre la charge et l'alimentation du montage de la figure 3.8. En effet, le montage d'utilisé est un convertisseur bidirectionnel qui peut fonctionner comme Buck dans un sens et Boost dans l'autre sens.

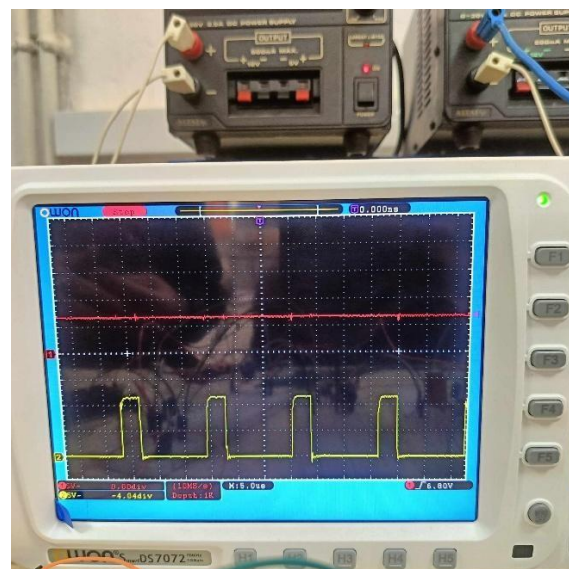


Figure 3-13 : Signal de commande et tension de sortie pour $D=75\%$

La figure 3.11 montre les résultats enregistrés sur l'oscilloscope pour un rapport cyclique de 25%, une tension d'entrée de 5 V et une fréquence de commutation d'environ 62 kHz. On voit que la tension de sortie (signal rouge) est de 7 V (5V pour 1cm), presque $1/(1-25\%)$ de 5 V.

La figure 3.12 montre les résultats pour un rapport cyclique de 50%. On voit que la tension de sortie (signal rouge) est presque 10 V, ce qui représente $1/(1-50\%)$ de 5 V.

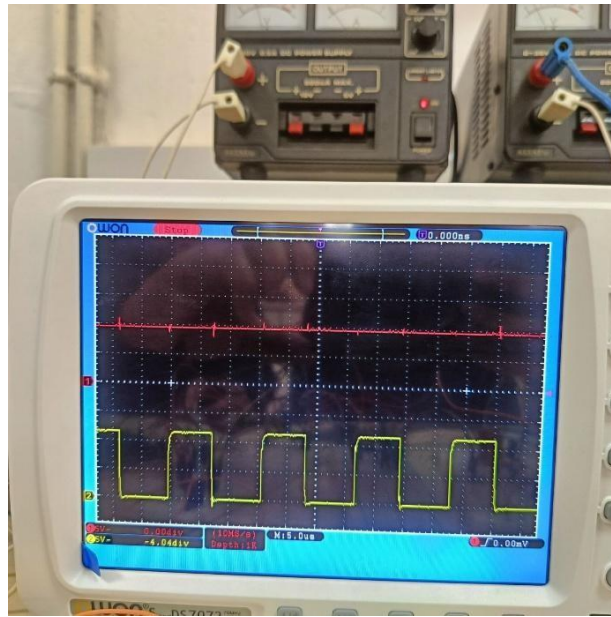


Figure 3-12 : Signal de commande et tension de sortie pour D=50%

La figure 3.13 montre la commande et la tension de sortie pour un rapport cyclique de 75%. On voit que la tension de sortie (signal rouge) est 17 V (5V /cm), presque $1/(1-75\%)$ de 5 V.

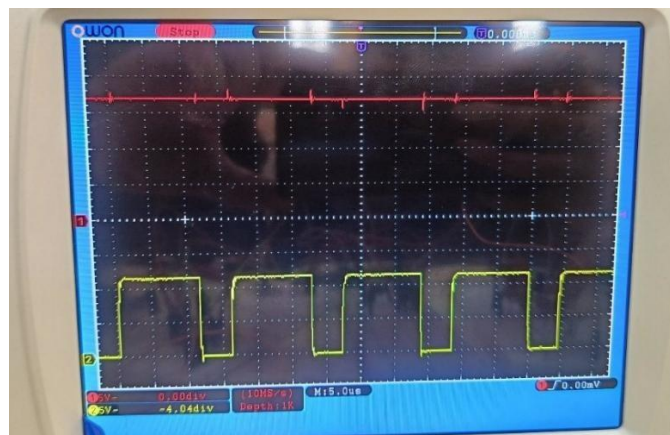


Figure 3-13 : Signal de commande et tension de sortie pour D=75%

3.3. Montage du convertisseur DC-DC Buck-Boost

Pour tester le Buck-Boost, nous avons utilisé le montage suivant :

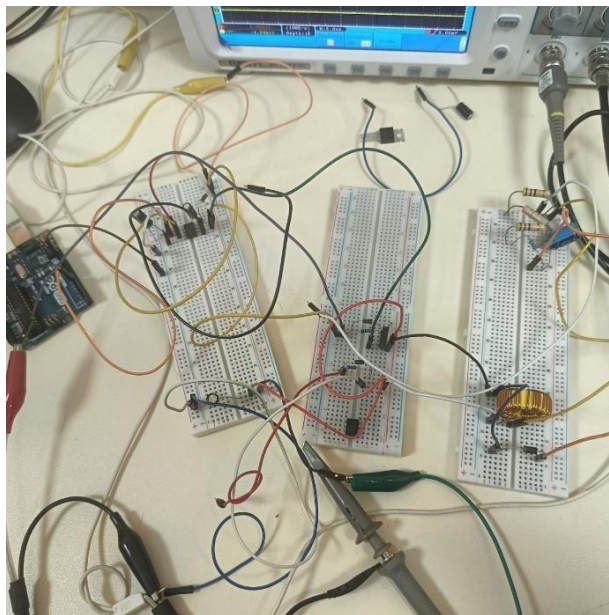


Figure 3-14 : Montage Buck-Boost

La figure 3.15 montre les résultats pour un rapport cyclique de 25%, une tension d'entrée de 10 V et une fréquence de commutation d'environ 62 kHz. On voit que la tension de sortie (signal rouge) est de -3.5 V, presque $25\% / (1-25\%)$ de 10 V mais avec une polarité inversée.



Figure 3-15 : Signal de commande et tension de sortie pour $D=25\%$

La figure 3.16 montre les résultats pour un rapport cyclique de 50%, on voit que la tension de sortie (signal rouge) est presque -9.5 V, ce qui représente presque $50\% / (1-50\%)$ de 10 V.

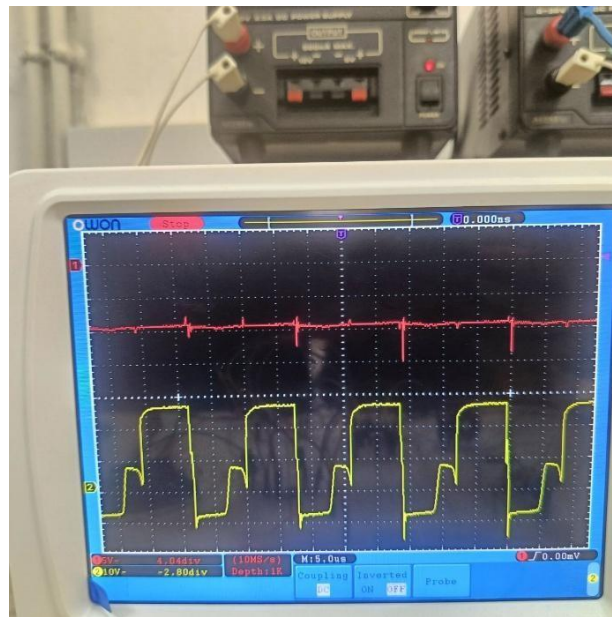


Figure 3-16 : Signal de commande et tension de sortie pour $D=50\%$

La figure 3.17 montre la commande et la tension de sortie pour un rapport cyclique de 60%, on voit que la tension de sortie (signal rouge) est -12 V (5V /cm), ce qui est presque $60\% / (1-60\%)$ de 10 V.

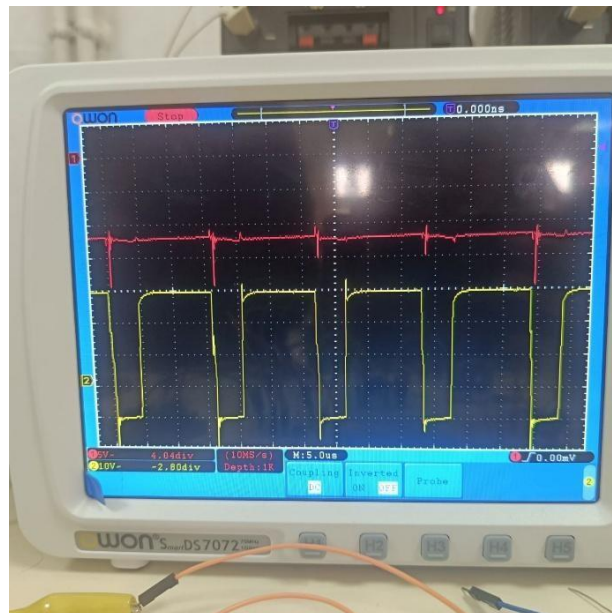


Figure 3-17 : Signal de commande et tension de sortie pour $D=60\%$

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les montages réalisés des convertisseurs Buck, Boost, et Buck-Boost ainsi que les différents résultats pour différents rapports cycliques. Nous avons constaté que les valeurs des tensions de sortie correspondent aux valeurs calculées théoriquement. Les petites différences constatées entre les mesures et les calculs sont dus aux pertes résistives au niveau de l'inductance et des fils, ainsi qu'au niveau des deux MOSFETs de puissance.

Conclusion générale

Les convertisseurs de puissance, et plus spécifiquement les convertisseurs DC-DC, sont des composants essentiels dans la gestion efficace de l'énergie électrique au sein de diverses applications modernes. Leur capacité à adapter les niveaux de tension et de courant aux besoins spécifiques des dispositifs électroniques les rend indispensables, que ce soit dans les appareils portables, les systèmes industriels, les véhicules électriques ou les infrastructures énergétiques comme les réseaux intelligents et les systèmes de stockage d'énergie.

Ce mémoire a exploré en profondeur les convertisseurs DC-DC de types Buck, Boost et Buck-Boost, en présentant d'abord une vue d'ensemble des différentes familles de convertisseurs de puissance, puis en se concentrant sur les convertisseurs DC-DC. Nous avons détaillé leurs principes de fonctionnement, leurs topologies variées, ainsi que leurs applications et avantages spécifiques.

Le deuxième chapitre a permis de modéliser, dimensionner et simuler ces trois types de convertisseurs à l'aide du logiciel Matlab/Simulink, offrant une compréhension pratique de leurs performances et de leur comportement sous différentes conditions.

Enfin, le dernier chapitre a été consacré à la réalisation pratique des convertisseurs étudiés, validant ainsi les concepts théoriques et les simulations par des expérimentations concrètes.

En conclusion, les connaissances acquises et les compétences développées à travers ce travail offrent une base solide pour des applications pratiques et des recherches futures dans le domaine de l'électronique de puissance. La compréhension approfondie des convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost permettra de mieux répondre aux défis énergétiques actuels et futurs, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace et durable de l'énergie.

Bibliographie

- [1] Emadi, A., Lee, Y. J., & Rajashekara, K. (2008). Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2237-2245.
- [2] Erickson, R. W., & Maksimovic, D. (2007). *Fundamentals of Power Electronics*. Springer.
- [3] Hayt, L. L., & Hayt, W. H. (2012). *Electric Power Systems: Analysis and Design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- [4] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. John Wiley & Sons.
- [5] Rashid, M. H. (2013). *Power Electronics: Circuits, Devices & Applications*. Pearson Education.
- [6] Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). *Getting Started with Arduino: The Open Source Electronics Prototyping Platform* (3rd ed.). Maker Media, Inc.
- [7] Bose, B. K. (2002). *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR.
- [8] Krein, P. T. (1998). *Elements of Power Electronics*. Oxford University Press.
- [9] Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2015). *Microelectronic Circuits* (7th ed.). Oxford University Press.
- [10] Costa, L. H., et al. (2014). *Bidirectional DC-DC Converters for Photovoltaic Applications: A Review*.
- [11] Middlebrook, R. D., & Čuk, S. (1976). "A general unified approach to modelling switching-converter power stages." *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*.
- [12] Application Note AN-1485: Designing a SEPIC Converter by Texas Instruments.

L'utilisation des convertisseurs DC-DC dans l'industrie (ISG IN SALAH GAS)

1-Introduction

In Salah Gas (ISG), un projet de production de gaz naturel dans le désert du Sahara en Algérie, est opérationnel depuis les années 2000 grâce à Sonatrach, BP, et Statoil. L'environnement extrême du Sahara impose des défis aux infrastructures, nécessitant une gestion énergétique efficace. Les hacheurs, ou convertisseurs DC-DC, sont essentiels pour convertir les niveaux de tension continue, minimiser les pertes d'énergie, fournir une alimentation stable et intégrer diverses sources d'énergie comme les batteries et panneaux solaires. Ils assurent la continuité et l'efficacité des opérations de production de gaz naturel à ISG.

2-Presentation de l'entreprise

In Salah Gaz (ISG) est une coentreprise formée par SONATRACH, ENI, et EQUINOR, dédiée au développement et à la commercialisation du gaz dans le District 3 (3D) du Sahara algérien. Le projet couvre sept champs gaziers principaux : Krechba, Teg, Reg, Garet el Befinat, Hassi Moumene, In Salah, et Gour Mahmoud. Krechba, le champ le plus au nord, est situé à environ 450 km au sud de Hassi R'Mel, tandis que les autres champs sont répartis sur une zone de 250 km au sud de Krechba.

Le partenariat entre SONATRACH, BP Exploration et plus récemment STATOIL, sous le nom d'In Salah Gaz (ISG), se concentre sur le développement et la commercialisation du gaz dans le District 3 (3D). La phase de développement initiale concerne trois champs au nord : Krechba (KBA), Teguentour (TEG), et REG. Une nouvelle extension de compression est prévue pour augmenter la pression du gazoduc afin de desservir le collecteur principal de distribution à Hassi R'Mel.

Cette présentation offre un aperçu des installations de production et de traitement liées au champ de Krechba, comme illustré dans la figure ci-dessous :

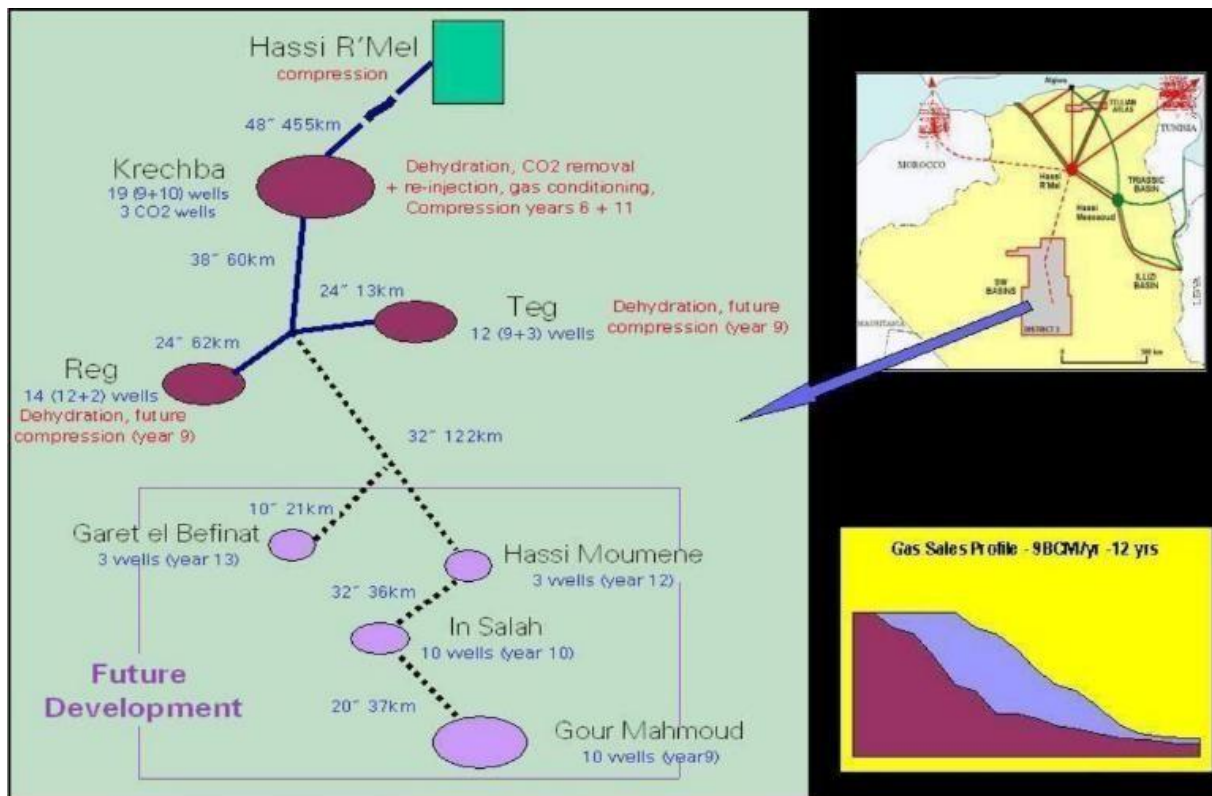


Figure 1-1 : Développement d'In Salah Gaz

2-1 Introduction dans l'entreprise :

La production de gaz du District 3 est transportée via un gazoduc de 455 km et de 48 pouces (122 cm) de diamètre vers une nouvelle station de surpression de gazoduc GR3 et une installation de comptage fiscal à Hassi R'Mel. De là, le gaz est acheminé sur 5 km supplémentaires jusqu'au Centre National de Distribution du Gaz (CNDG). Les champs TEG et REG, ainsi que le réservoir dévonien de Krechba (Krechba D), produisent du gaz sans hydrocarbures lourds libres. Le réservoir carbonifère de Krechba (Krechba C) contient des quantités limitées de condensats légers.

3-Type d'alimentation d'électricité au niveau d'ISG

In Salah Gas (ISG) utilise diverses sources d'alimentation électrique pour ses opérations :

- *Production d'électricité sur site :* Des centrales électriques, souvent avec des turbines à gaz utilisant le gaz naturel extrait des champs.

- Réseau électrique national : Connexion au réseau national algérien pour une alimentation continue et fiable.
- Énergie renouvelable : Intégration possible de panneaux solaires ou d'éoliennes, surtout dans le Sahara ensoleillé.
- Groupes électrogènes : Utilisation de générateurs diesel pour les besoins temporaires ou d'urgence.

Ces sources d'alimentation assurent une énergie efficace et fiable pour les opérations d'ISG.

3-1 Alimentation par énergie renouvelable



Figure 1-2 : Alimentation par l'énergie photovoltaïque

Le système de production d'énergie solaire d'ISG In Salah Gas assure une alimentation fiable et continue en captant, régulant, stockant et distribuant efficacement l'énergie solaire. Il garantit une alimentation stable pour les charges critiques, même sans production solaire directe. Les dispositifs de protection et de surveillance intégrés assurent un fonctionnement sûr et optimal du système.

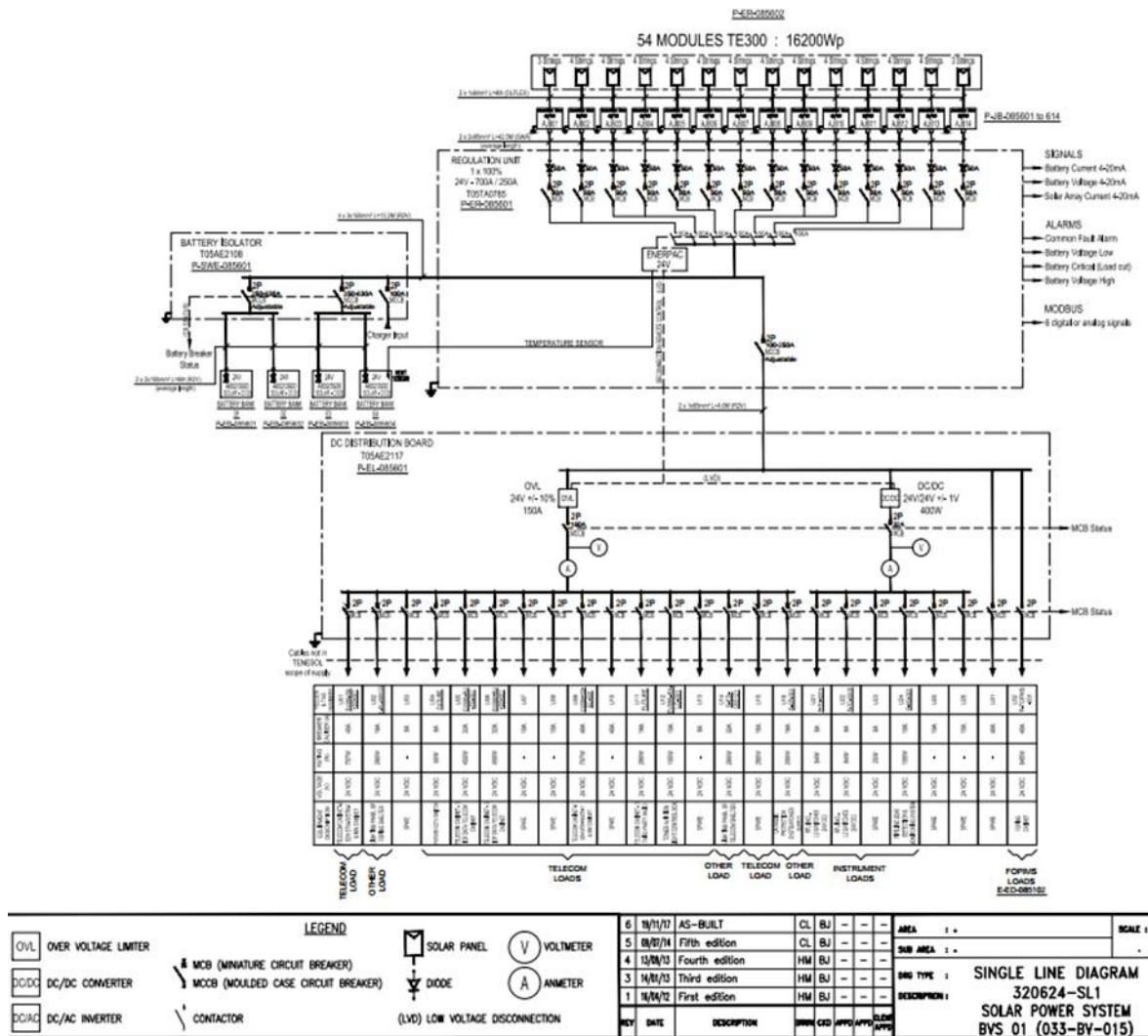


Figure 1-3 : Diagramme Unifilaire du Système de Production d'Énergie Solaire

Le schéma unifilaire du système de production d'énergie solaire pour In Salah Gas (ISG) comprend 54 panneaux solaires TE300 totalisant 16 200 WP, connectés en série-parallèle pour optimiser la production. L'unité de régulation ajuste la tension et le courant, offrant des protections contre les surtensions et surintensités. Un contrôleur gère trois ensembles de batteries, stockant l'énergie

excédentaire pour une utilisation ultérieure. Une carte de distribution CC distribue l'énergie stockée aux charges Télécom et Instruments avec des protections individuelles. Le système de surveillance utilise des capteurs et le protocole Modbus pour une surveillance à distance, signalant les états et défauts. Le système convertit l'énergie solaire en électricité CC, la régule, la stocke, et la distribue tout en surveillant les paramètres électriques. Il offre des avantages tels que l'utilisation d'énergie renouvelable, la réduction des coûts d'exploitation, l'autonomie et la fiabilité, ainsi qu'une faible maintenance.

3-2-Le rôle de convertisseur DC-DC

Dans l'installation de In Salah Gas (ISG), le convertisseur statique DC-DC (DCDC) joue un rôle crucial en ajustant la tension variable générée par les panneaux solaires à une tension stable et appropriée (48V à 24V) pour le système de stockage et les charges connectées. Il optimise la performance en ajustant continuellement la tension et le courant de sortie pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire. De plus, il protège le système contre les surtensions et les sous-tensions, assurant ainsi la sécurité des batteries et des équipements sensibles. Certains convertisseurs DC-DC offrent également une isolation galvanique entre l'entrée et la sortie, améliorant la sécurité en évitant les boucles de masse et les surtensions. Le schéma montre le convertisseur DC-DC connecté entre les panneaux solaires et le tableau de distribution DC, ainsi qu'aux charges télécom et autres charges de l'installation.

4- UPS Uninterruptible Power Supply (alimentation sans coupure et rupture)

Le système UPS assure une alimentation continue, stable et fiable aux charges critiques via des batteries, un chargeur, un onduleur et un convertisseur. Il protège contre les coupures de courant et les fluctuations de tension, garantissant la continuité des opérations pour les équipements essentiels. Les multiples niveaux de protection et les systèmes de surveillance assurent la sécurité et la fiabilité du système.

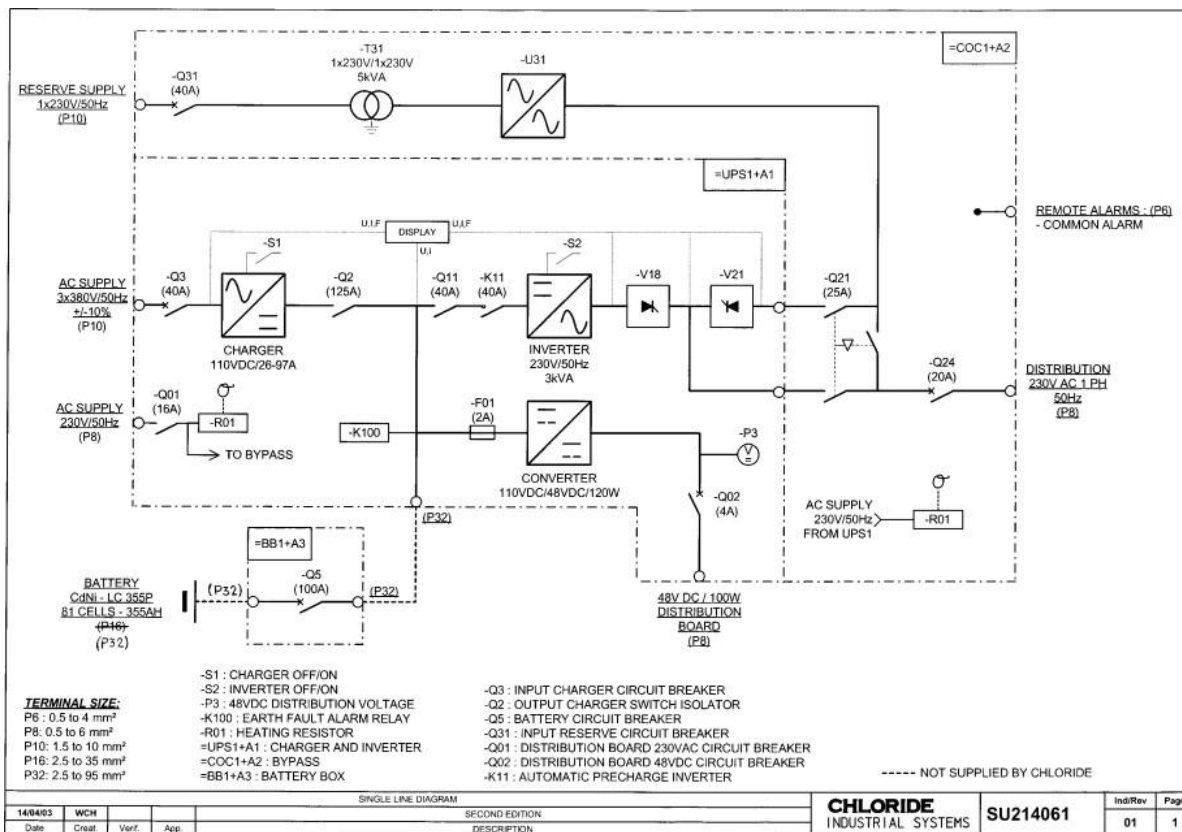


Figure 1-4 : schéma unifilaire d'un système d'alimentation sans interruption (UPS) au niveau d'ISG IN SALAH GAS

4-1 Principe de fonctionnement

Le système UPS est conçu pour assurer une alimentation continue et stable aux charges critiques à travers plusieurs composants clés. Initialement alimenté par une ou plusieurs sources d'alimentation principale, le chargeur convertit le courant alternatif (AC) en courant continu (DC) pour recharger les batteries qui stockent l'énergie. En cas de coupure de courant, le système détecte instantanément la panne et active les batteries pour fournir du courant continu aux charges via l'onduleur, qui convertit le DC en AC. Le convertisseur ajuste la tension DC pour répondre aux besoins spécifiques des charges connectées. Lorsque l'alimentation principale est rétablie, le chargeur recharge les batteries tandis que l'onduleur continue de fournir une alimentation ininterrompue aux charges, assurant une reprise automatique sans interruption. Le système intègre des alarmes et indicateurs pour signaler les défauts, facilitant une intervention rapide, et il est équipé de disjoncteurs et fusibles pour protéger contre les surcharges et les courts-circuits, assurant ainsi la sécurité et la fiabilité du système UPS.

4-2 Le rôle des convertisseurs statiques DC-DC dans un UPS

Le convertisseur (hacheur) est essentiel dans le système UPS pour adapter la tension des batteries à celle nécessaire aux charges spécifiques. Il convertit efficacement la tension DC de 110V des batteries en 48V DC, assurant une alimentation stable et fiable aux équipements critiques. En cas de coupure de courant, il maintient cette conversion pour garantir une alimentation continue, protégeant ainsi les équipements contre les fluctuations de tension et assurant la continuité des opérations. Le convertisseur est équipé d'une protection par fusible (Référence F01) pour éviter les surcharges et les courts-circuits, assurant la fiabilité du système UPS.