

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Spécialité Électrotechnique Industrielle

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de
Master en électrotechnique Option électrotechnique Industrielle**

Etude de convertisseur DC/DC Industriel

Préparé par :

- ◆ MOULLA Mounir
- ◆ MEKKI Khaled

◆ **Encadré par : Mr K. GHEDAMSI**

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Dieu tout-puissant pour la volonté la santé et la patience qu'il nous a données au cours de ces longues années.

Nous tenons à remercier Mr GHEDAMSI Kaci d'avoir accepté de superviser nos recherches et nos conseils dans la condition de ce travail.

Nous remercions également tous les professeurs du Département électrotechnique.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux amis et aux collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre parcours d'étude.

Enfin, nous remercions nos familles pour leurs aides.

Ε.Μ. Ε.Ι.Ξ.Ο

Ε.Κ.Ξ Χ.Η.Λ

Sommaire

Introduction générale.....	1
<i>Chapitre I : Généralité sur les convertisseurs DC/DC industriels</i>	
I. INTRODUCTION.....	4
I.1 L'histoire d'invention.....	5
I.2 Les Type des convertisseurs DC/DC industrielles.....	5
I.2.1 Convertisseur Buck (abaisseur)	5
I.2.1.1 Principe de fonctionnement de convertisseur Buck.....	6
I.2.1.2 Le fonctionnement du convertisseur Buck	6
I.2.1.3 Domain d'application.....	7
I.2.1.4 Applications courantes des convertisseurs Buck	7
I.2.1.5 Avantages et Inconvénients des convertisseurs Buck.....	7
I.2.2 Convertisseur Boost (élevateur).....	8
I.2.2.1 Principe de fonctionnement des convertisseurs Boost.....	8
I.2.2.2 Cycle de fonctionnement	9
I.2.2.3 Domain d'application.....	9
I.2.2.4 Avantages et inconvénients des convertisseurs (Boost)	9
I.2.3 Convertisseur Buck-Boost	10
I.2.3.1 Principe de fonctionnement convertisseur Buck-Boost.....	10
I.2.3.2 Le Type de convertisseurs Buck-Boost	11
I.2.3.3 Domaine d'application.....	11
I.2.3.4 Avantages et Inconvénients des convertisseurs Buck-Boost.....	11
I.2.4 Convertisseur DC/DC Flyback	12
I.2.4.1 Principe de fonctionnement convertisseur Flyback	12
I.2.4.2 Domain d'application.....	13
I.2.4.3 Avantages et Inconvénients des convertisseurs Flyback	13
I.2.5 Convertisseur DC/DC Forward.....	13
I.2.5.1 Domain d'application.....	14
I.2.5.2 Avantages et Inconvénients des convertisseurs Forward	15
I.2.6 Les convertisseurs à commutation douce	15
I.2.6.1 Principe de fonctionnement	16
I.2.6.2 Domaine d'application de convertisseurs à commutation douce.....	17
I.2.6.3 Avantages et Inconvénients des convertisseurs à commutation douce	17
I.2.7 Convertisseur Double Pont Actif (Dual Active Bridge (DAB)).....	18
I.2.7.1 Principe de fonctionnement	18
I.2.7.2 Domaine d'application.....	18
I.2.7.3 Avantages et Inconvénients des convertisseurs DAB.....	19
Conclusion.....	20

Chapitre II: Convertisseur à double pont actif

II. INTRODUCTION.....	21
II.1 Convertisseur à double pont actif	21
II.1.1 Topologie	21
II.1.2 Les types de Convertisseur DAB	25
II.1.2.1 Convertisseur DAB à résonance série DC/DC	26
II.1.2.2 Convertisseur DAB à résonance série DC/DC à trois sources.....	27
II.1.3 Les différents modes de fonctionnement	27
II.1.4 Le principe de fonctionnement de DAB	27
Conclusion.....	30

Chapitre III: Modélisation et simulation

III. INTRODUCTION.....	31
III.1 Description du circuit.....	31
III.1.1 Modélisation de DAB	32
III.1.2 Modèle de simulation du DAB sous l'environnement MATLAB/Simulink	34
III.1.3 Résultats de simulation en boucle ouvert.....	37
III.1.4 Interprétation des résultats	39
III.1.5 Contrôle du double pont actif.....	42
III.1.5.1 Contrôler le modèle DAB avec régulateur PI.....	42
III.1.5.2 Modèle DAB avec régulation sous MATLAB/Simulink	43
III.1.6 nterprétation des résultats.....	48
Conclusion	48

Chapitre VI: Application de DAB sur batterie

IV. INTRODUCTION.....	49
IV.1 Les batteries	49
IV.1.1 Constitution d'une batterie.....	49
IV.1.2 Les types de chargeur.....	50
IV.1.3 Classification de chargeur.....	51
IV.2 Structures de chargeur DC/DC DAB.....	51
IV.3 Modélisation et simulation.....	52
IV.3.1 Modélisation de batterie.....	52
IV.3.2 Simulation de batterie	53
IV.3.3 Interprétation des résultats	55
IV.4 Adaptation de DAB sur une batterie.....	56
IV.4.1 Interprétation des résultats	57
Conclusion	59
Conclusion générale.....	60

Liste des Figures

Chapitre I Etat de l'art des convertisseurs DC/DC industriels

Figure I.1 : Schéma de base d'un convertisseur Buck	5
Figure I.2 : Schéma de base d'un convertisseur Boost	8
Figure I.3 : Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost	10
Figure I.4 : Schéma de base d'un convertisseur Flyback.....	12
Figure I.5 : Schéma de base d'un convertisseur Forward.....	14
Figure I.6 : Convertisseurs à commutation douce type ZVS	16
Figure I.7 : Convertisseurs double pont actif.....	18

Chapitre II : Convertisseur à double pont actif

Figure II.1: Topologie d'un convertisseur de double pont actif.....	22
Figure II.2 : Transformateur équivalent avec fuite et inductance mutuelle	23
Figure II.3 : Symboles de MOSFET et IGBT	24
Figure II.4 : Convertisseur DC-DC bidirectionnel basé sur un demi-point alimenté en tension et un pont complet alimenté en tension	26
Figure II. 5 : Convertisseur DC/DC à résonance série.....	26
Figure II. 6: Convertisseur DC/DC à trois sources avec une topologie DAB à résonance série .	27
Figure II. 7: Convertisseur DC/DC du double pont actif.....	28
Figure II. 8 : Signaux de commutation des interrupteurs.....	29

Chapitre III : Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB

Figure III.1 : Topologie d'un convertisseur DC/DC.....	32
Figure III.2 : Schéma du DAB sous MATLAB/Simulink	35
Figure III.3 :Tension aux bornes de la charge R.....	37
Figure III.4 : Allure des tensions V_{ab}, V_{cd} et le courant de l'inductance i_L en BO	37
Figure III.5 : Zoom de l'Allure des tensions V_{ab}, V_{cd} et le courant de l'inductance i_L dans le régime permanent en BO	38
Figure III.6 : Zoom de Tension aux bornes de l'inductance.....	38
Figure III.7 : Modèle du gyrateur moyen du DAB	42
Figure III.8 : Schéma de contrôle de DAB	43
Figure III.9 : Modèle DAB avec régulation sous MATLAB/Simulink en BF	44
Figure III.10 : Tension aux bornes de la charge	45
Figure III.11 : Allure des tensions V_{ab}, V_{cd} , et le courant de l'inductance i_L en BF	45
Figure III.12 : Zoom de l'allure des tensions V_{ab}, V_{cd} et le courant de l'inductance i_L en BF Pour la tension de sortie 24 V.....	46
Figure III.13 : Zoom de l'allure des tensions V_{ab}, V_{cd} et le courant de l'inductance i_L en BF Pour la tension de sortie 48 V.....	47
Figure III.14 : Zoom de l'allure des tensions V_{ab}, V_{cd} et le courant de l'inductance i_L en BF Pour la tension 12 V	47

Chapitre VI : Application de DAB sur batterie

Figure VI. 1:Constitution d'une batterie.....	50
Figure VI. 2:Chargeur DAB	52
Figure VI. 3: Modèle de chargeur de batterie sous MATLAB/Simulink.....	53
Figure VI. 4:Pourcentage de charge de batterie.....	54
Figure VI. 5:Tension de batterie.....	54
Figure VI. 6:Courante de batterie et de référence.....	55
Figure VI. 7:Présente le modèle chargeur à double pont actif sous MATLAB/Simulink.....	56
Figure VI. 8:Stockage de batterie avec chargeur DAB.....	58
Figure VI. 9:Courant de batterie avec chargeur DAB.....	57
Figure VI. 10:Tension de batterie avec chargeur de DAB.....	58

Liste des tableaux

Tableau 1:Paramètres de simulation de DAB.....	36
Tableau 2:Paramètre de batterie.....	53

Les Abréviations

THF: High Frequency Transformer.

DAB: Dual Actif Bridge.

LED: light emitting diode.

BBC: Buck-Boost converter.

ZVS: Zero Voltage Switching.

ZCS: Zero Current Switching.

LLC: Load Resonant converter.

LC : Inductance-condensateur.

PWM : Pulse Width Modulation.

PI : Proportionnelle Intégrale.

Liste des symboles et notation

V_p : La tension de sortie du pont primaire

V_s : La tension d'entrée du pont secondaire

i_1 : Le courant d'entrée

i_2 : Le courant de charge

i_D : Le courant de sortie

i_L : Le courant de la bobine L

i_{Ls} : Le courant de la bobine

i_{C2} : Le courant du condensateur C2

v_1 : La tension d'entrée DAB

v_2 : La tension de sortie DAB

C : La capacité du côté sortie

K_i : Gain intégral

K_p : Gain proportionnel

L : L'inductance de transformateur

P : La Puissance moyenne

R : La résistance

f : La fréquence

n : Rapport de transformateur

φ : Le déphasage

T_{ref} : Est la température ambiante nominale, en K.

T : est la température de la cellule ou interne, en K.

T_a :Est la température ambiante, en K.

$\frac{E}{T}$: est le coefficient de température de tension réversible, en V/K.

α: Est la constante de vitesse de la résistance pour la polarisation.

β : Est la constante de taux d'Arrhenius pour la résistance interne.

$\frac{\Delta Q}{\Delta T}$: Est le coefficient de température de capacité maximale, en Ah/K.

C : Est la pente nominale de la courbe de décharge, en V/Ah.

Introduction générale

Introduction générale

Un chargeur de batterie est un équipement conçu pour recharger des batteries en leur fournissant un courant électrique adapté à leurs spécifications. Ce processus est vital pour maintenir la performance et prolonger la durée de vie des batteries utilisées dans une multitude d'applications industrielles, telles que les véhicules électriques, les systèmes de secours d'urgence, et les équipements de télécommunications.

Au fil des décennies, les chargeurs de batteries ont connu une évolution significative, passant de simples dispositifs de recharge à des systèmes sophistiqués intégrant des technologies avancées. L'utilisation de transformateurs à haute fréquence représente l'une de ces avancées notables. Ces transformateurs permettent une efficacité énergétique accrue, réduisant les pertes de chaleur et optimisant la conversion d'énergie lors du processus de charge; en outre, il permet une isolation galvanique. Cette technologie est particulièrement cruciale dans le contexte moderne où la durabilité et l'efficacité énergétique sont des priorités majeures.

Les transformateurs à haute fréquence (THF) utilisés dans les chargeurs industriels sont caractérisés par leur capacité à fonctionner à des fréquences beaucoup plus élevées que les transformateurs traditionnels. Cette caractéristique permet non seulement de réduire la taille et le poids des chargeurs, mais aussi d'améliorer leur rendement global. En minimisant les pertes d'énergie et en augmentant l'efficacité de la conversion, ces transformateurs contribuent de manière significative à la durabilité des systèmes de recharge industriels.

Les convertisseurs DC/DC, en particulier, sont des composants essentiels des chargeurs de batteries modernes. Ils permettent de convertir la tension de la source d'alimentation à une tension appropriée pour la charge de la batterie. Parmi les différentes topologies de convertisseurs DC/DC, le double pont actif (DAB), utilisant un THF, est particulièrement intéressant pour les applications de recharge de batteries en raison de ses nombreuses caractéristiques avantageuses. Le DAB permet un transfert bidirectionnel de puissance, une isolation galvanique, une haute efficacité et une capacité à fonctionner dans une large gamme de tensions d'entrée et de sortie.

Ce mémoire se propose d'explorer l'étude et la modélisation d'un convertisseur DC/DC industriel double pont actif (DAB) pour la charge de batteries. Nous examinerons les avantages et les défis associés à l'utilisation du DAB en tant que chargeur de batteries, en mettant l'accent sur

son rôle clé dans les systèmes de stockage d'énergie modernes. La problématique centrale de cette étude porte sur l'évaluation de l'efficacité et de la performance des convertisseurs DAB avec isolation galvanique en tant que chargeurs de batteries, ainsi que sur les améliorations potentielles pour optimiser leur fonctionnement.

Le convertisseur DAB sera défini et ses principes de fonctionnement seront détaillés, en mettant en lumière les équations de circuit, les techniques de modélisation moyenne, et le développement d'un contrôleur proportionnel-intégral (PI) pour une gestion optimale de la charge. Les résultats de simulation seront analysés pour évaluer les performances du système et proposer des améliorations futures. Optimale de la charge. Les résultats de simulation seront analysés pour évaluer les performances du système et proposer des améliorations futures.

À travers cette étude, nous espérons contribuer à l'optimisation des systèmes de recharge de batteries, en fournissant une solution technique robuste et efficace basée sur le convertisseur DAB.

La première phase de notre recherche a porté sur les généralités des convertisseurs DC/DC industriels, après dans le deuxième chapitre on a focalisé sur le principe de fonctionnement détaillée du convertisseur DAB avec ces différents types, Offre des avantages significatifs, notamment en termes de réduction des pertes et d'amélioration de l'efficacité énergétique grâce à l'isolation galvanique.

Le troisième chapitre nous avons impliqué la modélisation et la simulation à l'aide de développement des systèmes d'équations et de modèles moyens, représentant le comportement du convertisseur. La structure DAB, avec ses niveaux de conversion bidirectionnels (DC-AC et AC-DC), L'intégration d'un régulateur proportionnel-intégral (PI) a été une étape cruciale, permettant de stabiliser et de contrôler précisément le convertisseur. Les simulations en régime permanent ont validé la capacité du régulateur PI à maintenir des performances optimales, ajustant le courant et la tension de sortie. Cette phase a démontré que le convertisseur DAB peut fonctionner de manière stable et efficace sous des conditions variées.

Dans le dernier chapitre, pour vérifier les performances pratiques du système, une batterie de 24 volts a été intégrée à la simulation. Les résultats ont montré que le chargeur de batterie basé sur le convertisseur DAB est capable de charger efficacement et en toute sécurité, sans risque de surcharge ni de surchauffe. Ces résultats confirment que le convertisseur DAB est une solution fiable pour des applications nécessitant une gestion rigoureuse de la charge de batterie.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale et les perspectives ouvertes par cette étude.

Chapitre I : Généralité sur les convertisseurs DC/DC industriels

I. Introduction

Un convertisseur DC/DC industriel est un dispositif électronique conçu pour convertir une tension continue (DC) d'une valeur à une autre, dans un contexte industriel. Les convertisseurs DC-DC constituent une partie importante dans la chaîne de conversion. Ils sont utilisés largement dans les connexions à des batteries d'accumulateurs, des systèmes photovoltaïques, des éoliennes, des systèmes hybrides et dans les applications automobiles [1].

L'un des principaux avantages des convertisseurs DC/DC industriels est leur capacité à fournir une tension stable et précise, même dans des conditions de charge variable ou de fluctuations de tension d'entrée. Cela les rend indispensables dans les systèmes critiques où la fiabilité et la performance sont essentielles, tels que les équipements médicaux, les systèmes de télécommunication, les systèmes de contrôle industriels, les équipements de défense et bien d'autres.

Ces convertisseurs sont disponibles dans une variété de configurations, y compris les convertisseurs abaisseurs (Buck), éleveurs (Boost), éleveurs-abaisseurs (Buck-Boost) ...etc. ainsi que des topologies plus avancées telles que les convertisseurs à résonance ou à commutation douce.

Les convertisseurs DC/DC industriels sont conçus pour répondre à des exigences strictes en matière de durabilité, de performance et de sécurité. Ils sont souvent soumis à des tests rigoureux pour garantir leur fonctionnement fiable dans des environnements industriels difficiles, caractérisés par des températures extrêmes, des vibrations, des chocs et des interférences électromagnétiques.

En raison de leur importance critique dans de nombreuses applications industrielles, les convertisseurs DC/DC font l'objet d'une évolution constante pour améliorer leur efficacité énergétique, leur compacité, leur fiabilité et leur capacité à répondre aux exigences spécifiques des différents secteurs industriels.

I.1 L'histoire d'invention

Les convertisseurs DC/DC, également appelés convertisseurs à découpage, remontent aux années 1950 et 1960, avec des développements significatifs tout au long du 20^e siècle. Voici un aperçu de l'évolution de ces dispositifs.

L'invention des convertisseurs DC/DC avec des contributions importantes de pionniers tels qu'Oskar Beck et d'autres chercheurs. Ces dispositifs, qui utilisent la commutation à haute fréquence pour réguler la tension de sortie de manière efficace et stable, sont devenus essentiels dans de nombreuses applications industrielles telles que les télécommunications, l'informatique et les véhicules électriques. Depuis leur invention, les convertisseurs DC/DC ont connu une évolution

continue visant à améliorer leur efficacité énergétique, leur compacité et leur fiabilité pour répondre aux exigences des applications modernes.

I.2 Les Type des convertisseurs DC/DC industrielles

I.2.1 Convertisseur Buck (abaisseur)

Un convertisseur Buck, également connu sous le nom d'hacheur série, fonctionne comme une alimentation à découpage conçue pour transformer une tension continue en une autre tension continue à amplitude réduite [2].

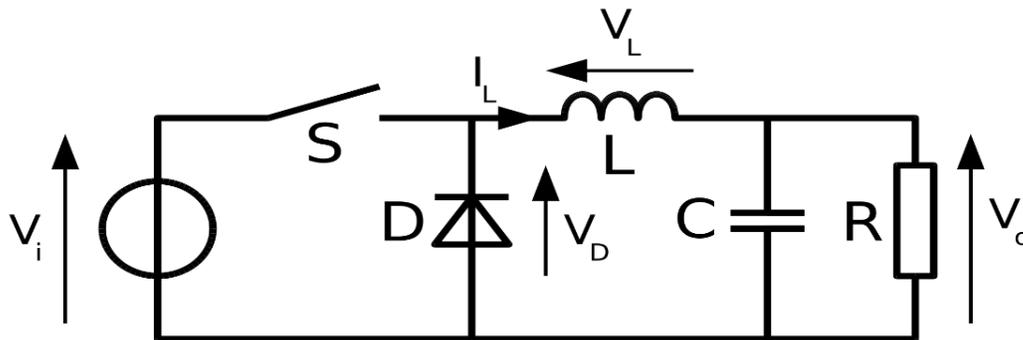


Figure I.1 : Schéma de base d'un convertisseur Buck

I.2.1.1 Principe de fonctionnement de convertisseur Buck

Interrupteur : Il s'agit généralement d'un transistor MOSFET ou d'un transistor bipolaire qui est utilisé pour commuter la tension d'entrée.

Inductance de sortie : Elle est utilisée pour stocker l'énergie électrique et lisser le courant de sortie.

Diode de roue libre : Elle est connectée en parallèle à l'inductance de sortie et permet au courant de circuler lorsque l'interrupteur est éteint.

Condensateur de sortie : Il est utilisé pour lisser la tension de sortie et réduire les variations indésirables.

I.2.1.2 Le fonctionnement du convertisseur Buck

État de commutation ON (fermé) : Lorsque l'interrupteur est en position fermée, le courant circule à travers l'inductance de sortie et l'interrupteur, et l'énergie est stockée dans l'inductance.

État de commutation OFF (ouvert) : Lorsque l'interrupteur est en position ouverte, le courant cesse de circuler dans l'inductance de sortie. La diode de roue libre permet au courant de continuer à circuler en fournissant un chemin de retour pour le courant. L'énergie stockée dans l'inductance est transférée à la charge via la diode de roue libre.

Répétition des étapes de commutation : Le cycle de commutation entre les états ON et OFF se répète de manière périodique. La durée de l'état ON et de l'état OFF est contrôlée par un circuit de commande qui ajuste la tension de sortie en conséquence.

En ajustant le rapport cyclique (rapport entre la durée de commutation ON et la durée totale du cycle), la tension de sortie du convertisseur Buck peut être régulée. Plus le rapport cyclique est élevé, plus la tension de sortie est élevée, et vice versa.

I.2.1.3 Domain d'application

Le convertisseur Buck est largement utilisé dans de nombreuses applications, notamment dans les alimentations à découpage, les régulateurs de tension, les convertisseurs solaires et les systèmes de charge de batteries. Il offre une efficacité élevée et une régulation précise de la tension de sortie.

I.2.1.4 Applications courantes des convertisseurs Buck

- **Alimentation d'appareils électroniques:** Les ordinateurs portables, les smartphones, les tablettes et divers appareils électroniques nécessitent souvent des tensions d'alimentation inférieures à celle fournie par le secteur.

- **Systèmes de contrôle industriels:** Dans les environnements industriels, les convertisseurs Buck sont utilisés pour alimenter des capteurs, des actionneurs, des contrôleurs logiques et d'autres équipements, garantissant une tension d'alimentation stable et précise.

- **Conversion d'énergie solaire:** Les panneaux solaires produisent une tension continue variable. Les convertisseurs Buck sont utilisés pour réguler et abaisser cette tension pour l'adapter aux batteries ou au réseau électrique.

- **Alimentation de batteries:** Les convertisseurs Buck peuvent charger des batteries en abaissant la tension d'une source d'alimentation à la tension de charge optimale de la batterie.

- **Alimentation LED:** Les LED nécessitent une tension d'alimentation spécifique et constante pour fonctionner correctement. Les convertisseurs Buck fournissent cette tension régulée et protègent les LED des surtensions.

I.2.1.5 Avantages et Inconvénients des convertisseurs Buck

Avantages

- Efficacité énergétique élevée.
- Régulation de tension précise.
- Protection contre les surtensions.
- Compacité et légèreté.

Inconvénients

- Ondulations de tension de sortie.
- Complexité du circuit.
- Limites de courant et de puissance.

I.2.2 Convertisseur Boost (élevateur)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. [3]

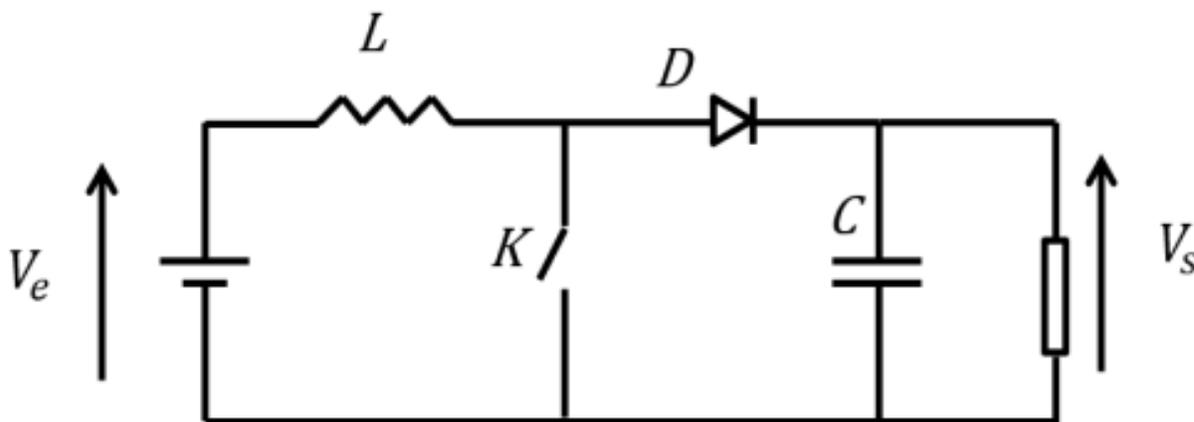


Figure I.2 : Schéma de base d'un convertisseur Boost

I.2.2.1 Principe de fonctionnement des convertisseurs Boost

Le fonctionnement de base repose sur deux éléments clés :

- **Un interrupteur électronique (généralement un transistor MOSFET):** Il contrôle le flux de courant dans le circuit.
- **Une inductance (bobine):** Elle stocke l'énergie pendant la phase de conduction et la restitue pendant la phase de coupure.
- **Une diode:** Elle empêche le courant de refluer vers la source d'alimentation pendant la phase de coupure.

I.2.2.2 Cycle de fonctionnement

- **Phase de conduction (interrupteur fermé)**

- L'interrupteur est fermé, permettant au courant de la source de circuler dans l'inductance.
- L'énergie s'accumule dans l'inductance sous forme de champ magnétique.
- La tension de sortie est égale à la tension d'entrée.

- **Phase de coupure (interrupteur ouvert)**

- L'interrupteur est ouvert, coupant le courant de la source.
- L'énergie stockée dans l'inductance est libérée graduellement à travers la diode et la charge.
- La tension de sortie augmente et se stabilise à une valeur supérieure à la tension d'entrée.

I.2.2.3 Domain d'application

Le convertisseur Boost est une topologie de convertisseur DC/DC utilisée pour élever une tension continue d'entrée à une tension de sortie supérieure. Il est largement utilisé dans les alimentations à découpage, les énergies renouvelables, l'automobile, l'éclairage à LED, ainsi que dans les applications industrielles et de télécommunications. Sa polyvalence réside dans sa capacité à fournir une tension stable et régulée, adaptée à une variété d'applications électriques et électroniques.

I.2.2.4 Avantages et inconvénients des convertisseurs (Boost)

Avantages

- Augmentation de la tension.
- Régulation de tension précise.
- Protection contre les sous-tensions.

Inconvénients

- Ondulations de tension de sortie
- Complexité du circuit.

I.2.3 Convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur Buck-Boost contient une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. [4]

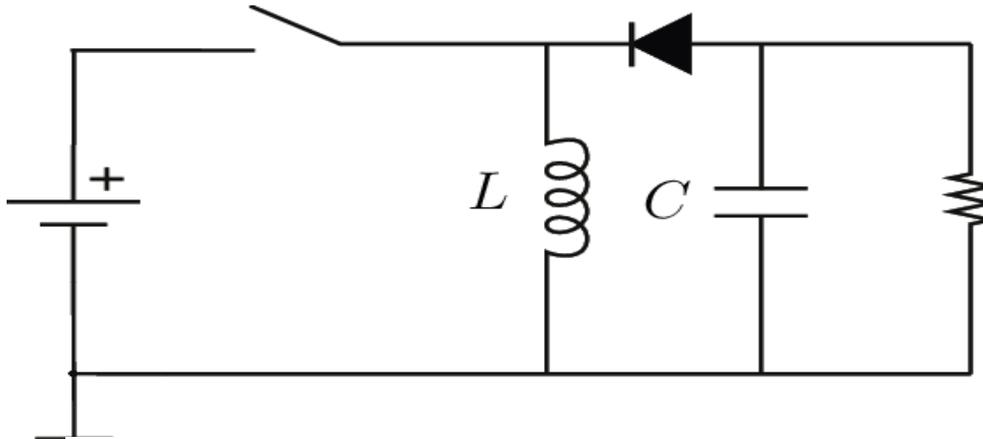


Figure I.3 : Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost

I.2.3.1 Principe de fonctionnement convertisseur Buck-Boost

- **Phase de conduction (interrupteur fermé)**

- L'interrupteur (généralement un transistor MOSFET) est fermé, permettant au courant de la source de circuler dans l'inductance.
- L'énergie s'accumule dans l'inductance sous forme de champ magnétique.
- La tension de sortie est égale à la tension d'entrée dans le cas d'un convertisseur Buck-Boost non-inversé.

- **Phase de coupure (interrupteur ouvert)**

- L'interrupteur est ouvert, coupant le courant de la source.
- L'énergie stockée dans l'inductance est libérée graduellement à travers la diode et la charge.
- La tension de sortie augmente ou diminue (selon la configuration du convertisseur) et se stabilise à une valeur différente de la tension d'entrée.

I.2.3.2 Le Type de convertisseurs Buck-Boost

- **Non-inversé:** Tension de sortie égale ou supérieure à la tension d'entrée.
- **Inversé:** Tension de sortie égale ou inférieure à la tension d'entrée.

I.2.3.3 Domaine d'application

L'utilisation du convertisseur Buck-Boost (BBC) est généralement reconnue pour sa capacité à améliorer et à diminuer la tension d'entrée dans une plage définie, tout en utilisant une quantité minimale de composants. Ce convertisseur est largement utilisé dans divers domaines industriels, tels que les alimentations à découpage, les systèmes d'éclairage

Les systèmes de gestion de l'énergie, les télécommunications et les véhicules électriques. L'adaptabilité de ce convertisseur en fait une option privilégiée pour la régulation de la tension dans un large éventail d'applications électroniques et électriques. [5]

I.2.3.4 Avantages et Inconvénients des convertisseurs Buck-Boost [6]

Avantages

- Flexibilité de la tension de sortie.
- Régulation de tension précise.
- Protection contre les surtensions et sous-tensions.

Inconvénients

- Complexité du circuit
- Ondulations de tension de sortie
- Limites de courant et de puissance

I.2.4 Convertisseur DC/DC Flyback

C'est un type de convertisseur de tension qui utilise un transformateur pour stocker et transférer l'énergie entre l'entrée et la sortie. Il fonctionne selon deux phases principales

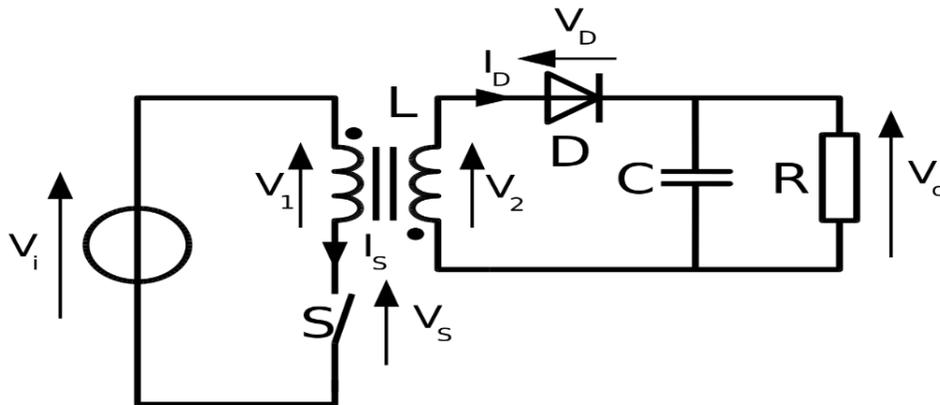


Figure I.4 : Schéma de base d'un convertisseur Flyback

I.2.4.1 Principe de fonctionnement convertisseur Flyback

• **Phase de commutation:** Lorsque le transistor est en conduction, le courant circule dans le primaire du transformateur, créant un champ magnétique. Ce champ magnétique induit une tension dans le secondaire. En même temps, la tension est stockée dans le transformateur.

• **Phase de décharge:** Lorsque le transistor est coupé, la tension stockée dans le transformateur s'effondre, induisant une tension inverse dans le primaire et une tension élevée dans le secondaire. Cette énergie stockée est ensuite délivrée à la charge via une diode de redressement.

I.2.4.2 Domain d'application

Les convertisseurs Flyback sont couramment utilisés dans une large gamme d'applications, notamment :

- Alimentations électriques pour appareils électroniques grand public (TV, ordinateurs, etc.)
- Alimentations pour circuits imprimés
- Convertisseurs de tension pour LED
- Chargeurs de batterie

I.2.4.3 Avantages et Inconvénients des convertisseurs Flyback

Avantages

- Simple et économique.
- Isolation galvanique.
- Polyvalent.
- Rendement élevé.

Inconvénients

- Ondulation de sortie.
- Tension de sortie non régulée
- Taille du transformateur.

I.2.5 Convertisseur DC/DC Forward

Un convertisseur DC/DC Forward est un type de convertisseur de tension qui utilise un transformateur couplé à une inductance et un interrupteur électronique pour contrôler le flux de courant (généralement un transistor) pour transférer l'énergie de l'entrée vers la sortie. Il fonctionne selon deux phases principales :

Phase de conduction: Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant circule dans le primaire du transformateur, créant un champ magnétique. Ce champ magnétique induit une tension dans le secondaire. En même temps, l'énergie est stockée dans le transformateur.

Phase de coupure : Lorsque l'interrupteur est ouvert, le courant stocké dans le transformateur s'effondre, induisant une tension élevée dans le secondaire. Cette énergie stockée est ensuite délivrée à la charge via une diode de redressement.

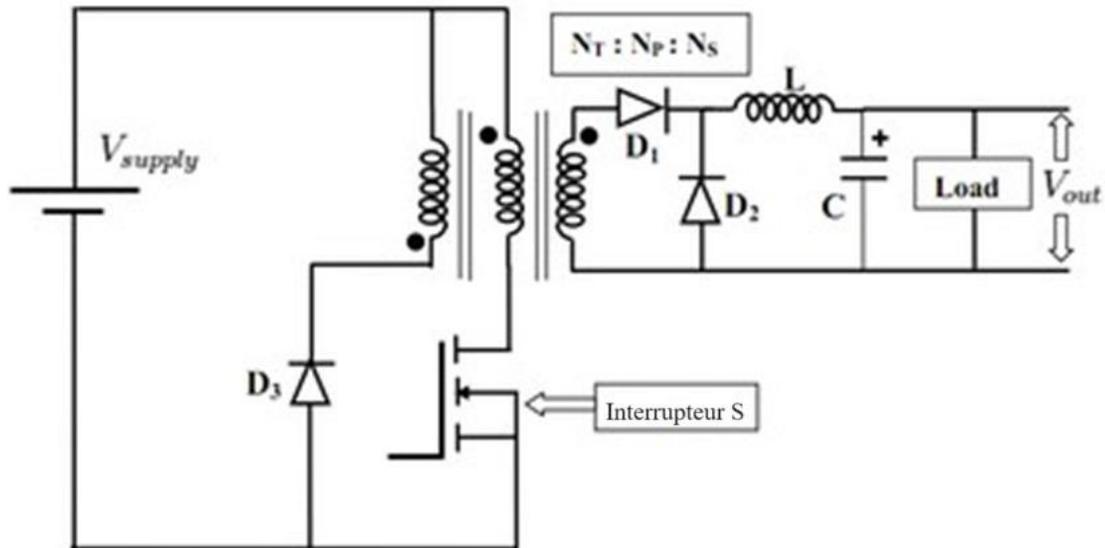


Figure I.5 : Schéma de base d'un convertisseur Forward

I.2.5.1 Domain d'application

Les convertisseurs Forward sont couramment utilisés dans une large gamme d'applications, notamment :

- Alimentations électriques pour appareils électroniques grand public (TV, ordinateurs, etc.)
- Alimentations pour circuits imprimés
- Convertisseurs de tension pour LED
- Chargeurs de batterie

I.2.5.2 Avantages et Inconvénients des convertisseurs Forward

Avantages

- Simple et économique.
- Tension de sortie plus élevée.
- Rendement élevé.
- Contrôle de la tension de sortie.

Inconvénients

- Ondulation de sortie.
- Taille du transformateur.

I.2.6 Les convertisseurs à commutation douce

Également connus sous le nom de convertisseurs résonnants, sont un type de convertisseur DC/DC qui utilisent des techniques de commutation spéciales pour minimiser les pertes de commutation et les contraintes de tension et de courant dans les composants. [6]

Exemples de convertisseurs à commutation douce

- **Convertisseur ZVS (Zero Voltage Switching)**

Utilise une résonance en tension pour amortir la tension aux bornes de l'interrupteur à zéro pendant la commutation.

- **Convertisseur ZCS (Zero Current Switching)**

Utilise une résonance en courant pour amortir le courant traversant l'interrupteur à zéro pendant la commutation.

- **Convertisseur LLC (Load Resonant LLC)**

Combine les résonances en tension et en courant pour obtenir une commutation douce et efficace.

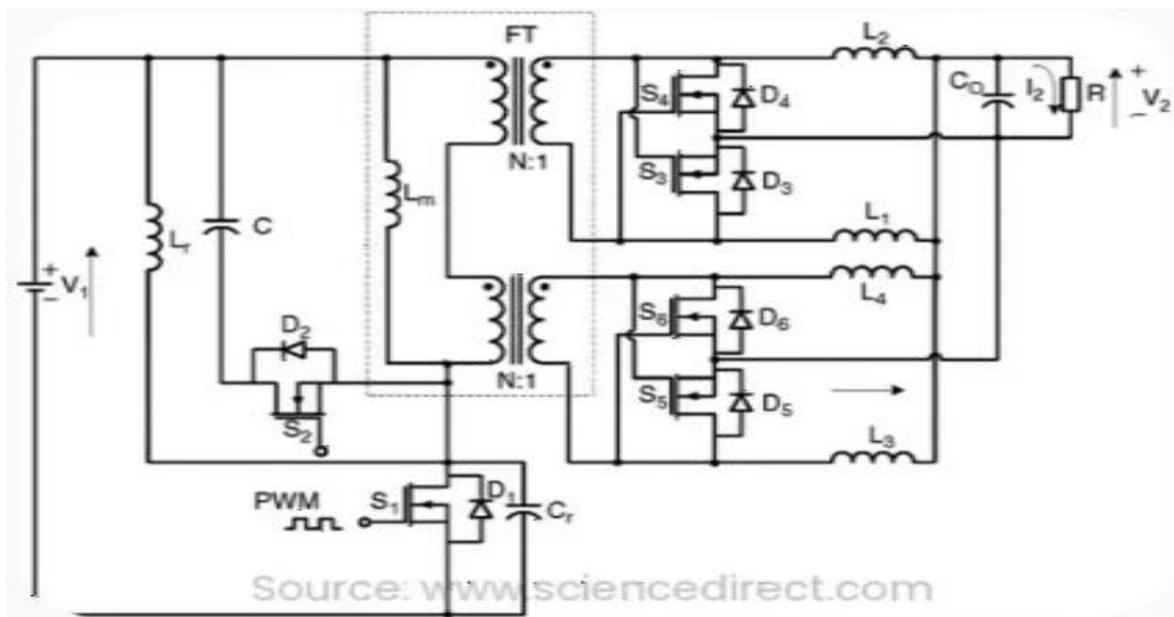


Figure I.6 : Convertisseurs à commutation douce type ZVS

I.2.6.1 Principe de fonctionnement

Ces convertisseurs à commutation douce exploitent des circuits résonnants pour amortir les transitions de commutation.

Cela permet de réduire considérablement les pertes de commutation, qui sont une source majeure d'inefficacité et de génération de chaleur dans les convertisseurs à commutation dure.

Les convertisseurs à commutation douce utilisent généralement deux types de circuits résonnants :

- **Résonance en tension:** Utilise un circuit LC (inductance-condensateur) pour amortir la tension aux bornes de l'interrupteur.
- **Résonance en courant:** Utilise un circuit LC pour amortir le courant traversant l'interrupteur.

I.2.6.2 Domaine d'application de convertisseurs à commutation douce

- Alimentations électriques pour véhicules électriques et hybrides.
- Alimentations pour serveurs et centres de données.
- Alimentations pour équipements médicaux.
- Convertisseurs d'énergie solaire et éolienne.

I.2.6.3 Avantages et Inconvénients des convertisseurs à commutation douce

Avantages

Les convertisseurs à commutation douce présentent plusieurs avantages par rapport aux convertisseurs à commutation dure, notamment :

- Meilleur rendement
- Moins de contraintes
- Moins d'interférences électromagnétiques.
- Fonctionnement à haute fréquence.

Inconvénients

Malgré leurs avantages, les convertisseurs à commutation douce présentent certains inconvénients, notamment :

- Complexité accrue.
- Coût plus élevé.
- Encombrement plus important.

I.2.7 Convertisseur Double Pont Actif (Dual Active Bridge (DAB))

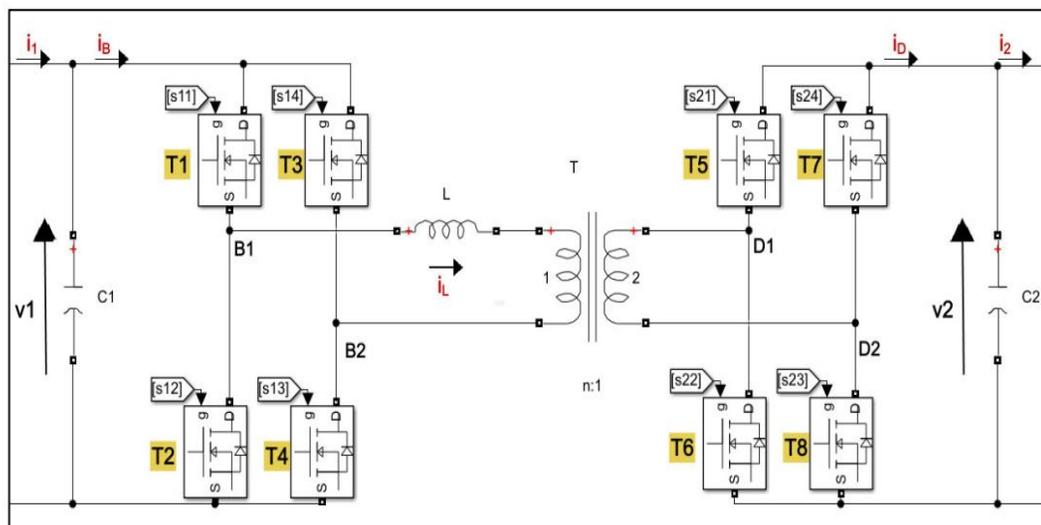


Figure I.7 : Convertisseurs double pont actif

Le Dual-Active-Bridge (DAB) représente une configuration bidirectionnelle isolée composée de deux ponts entièrement opérationnels, d'une inductance située sur la ligne alternative associée à un transformateur garantissant l'isolation galvanique et d'un réglage des niveaux de tension d'entrée/sortie [7].

I.2.7.1 Principe de fonctionnement

- Le DAB est constitué de deux ponts en H complets, reliés par un transformateur haute fréquence.
- Chaque pont en H est composé de plusieurs interrupteurs électroniques (transistors) permettant de contrôler le flux de courant.
- En variant le signal de commande des interrupteurs, on peut ajuster la tension et le courant sur le transformateur, contrôlant ainsi le transfert d'énergie entre l'entrée et la sortie.

I.2.7.2 Domaine d'application

- Rechargement de véhicules électriques.
- Systèmes d'alimentation à courant continu (DC).
- Transmission d'énergie sans fil.

I.2.7.3 Avantages et Inconvénients des convertisseurs DAB [7]

Avantages

- Transfert bidirectionnel.
- Isolation galvanique.
- Contrôle flexible.
- Haute densité de puissance.

Inconvénients

- Complexité accrue.
- Pertes de conduction.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude générale sur les convertisseurs DC/DC industriels. Ces structures sont essentielles dans des nombreux systèmes électroniques et électriques, offrant une variété de fonctions critiques dans une multitude d'applications. Leur importance est notable dans divers domaines tels que les véhicules électriques, les systèmes de distribution d'énergie renouvelable, les dispositifs médicaux, et bien d'autres. Leur capacité à fournir des tensions spécifiques pour différents équipements les rend indispensables grâce à plusieurs caractéristiques : Efficacité énergétique, Flexibilité et adaptabilité, Isolation électrique.

Chapitre II : Convertisseur à double pont actif

II. Introduction

Il existe des convertisseurs de plus forte puissance employant deux étages de conversion. C'est le cas des convertisseurs qui emploient des ponts complets des deux côtés du transformateur d'isolation ou bien des convertisseurs avec un pont complet d'un côté du transformateur et un seul interrupteur de l'autre côté du transformateur d'isolation. De surcroît, les interrupteurs peuvent être commandés selon le sens de transfert de puissance ou également pour un réglage optimal des formes d'ondes, comme c'est le cas de plusieurs travaux sur le DAB [8].

Le convertisseur à double pont actif est une solution couramment employée dans des nombreuses applications industrielles et domestiques. Il souligne un domaine de l'électronique de puissance qui joue un rôle essentiel dans la conversion d'énergie électrique d'une forme à une autre pour répondre aux exigences particulières des charges électriques (moteurs, pompes, machines-outils, etc.).

Dans ce chapitre, une analyse approfondie des structures des convertisseurs DC/DC est évoquée. À partir de cela, le convertisseur à double pont actif est la configuration des convertisseurs la plus appropriée pour l'utilisation de chargeurs de batterie.

II.1 Convertisseur à double pont actif

Le DAB (Dual-Active-Bridge) est une architecture isolée bidirectionnelle composée de deux ponts complets actifs (onduleur, redresseur), d'une inductance sur la ligne alternative en série avec un transformateur assurant quant à lui l'isolation galvanique et l'adaptation des tensions d'entrée/sortie.

II.1.1 Topologie

Le double pont actif (DAB) est un convertisseur qui est employé dans les transformateurs à état solide, des applications telles que le transport, la charge des batteries et l'énergie renouvelable. Comme le montre la figure II.1, un convertisseur DAB est composé de deux pont et d'un transformateur à haute fréquence (THF), Cette architecture permet l'isolement des entrées et des sorties tout en parallèlement au volume. Un DAB peut être utilisé comme un Buck ou un boost et peut transmettre de la puissance dans les deux directions. Une caractéristique bidirectionnelle peut être créée dans un DAB traditionnel en utilisant une diode antiparallèle avec un dispositif de commutation (MOSFET ou IGBT). Ce dispositif permet au

courant de circuler dans les directions avant et arrière en utilisant des mécanismes de commutations contrôlées. En raison de sa capacité bidirectionnelle, il réduit la taille du système, et améliore les performances et l'efficacité globale parce qu'il entraîne la nécessité de deux convertisseurs distincts pour le flux de puissance avant et arrière. [9]

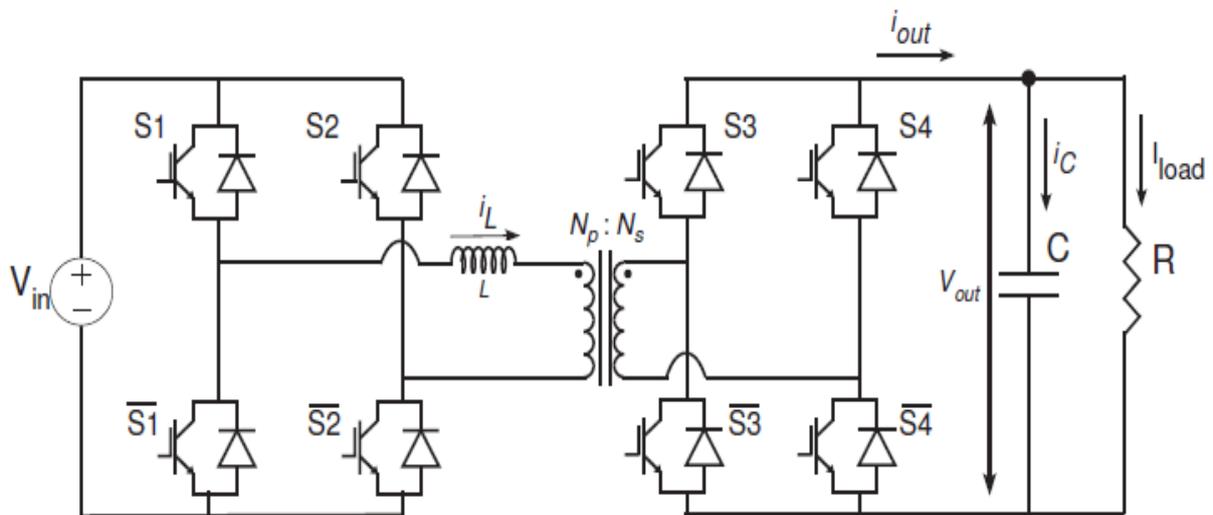


Figure II.1: Topologie d'un convertisseur de double pont actif

La structure d'un convertisseur DC-DC à double pont actif comprend généralement les éléments suivants :

- **Onduleur DC / AC**

Le convertisseur DC/AC, également connu sous le nom d'onduleur. Il s'agit d'un dispositif électronique qui permet, par exemple, de produire un courant alternatif à partir d'un courant continu, dans le but principal d'améliorer la production, de détecter les pertes et les perturbations qui peuvent survenir lors du processus. Les onduleurs reposent sur une structure en pont en H composée d'interrupteurs électroniques tels que des MOSFET ou des IGBT.

- **Redresseur AC/DC**

Le convertisseur AC/DC également connu sous le nom redresseur, Il s'agit d'un dispositif électronique qui permet, par exemple, de produire un courant continu à partir d'un courant alternatif. Les redresseurs reposent sur une structure en pont en H composée d'interrupteurs électroniques tels que des MOSFET ou des IGBT.

- **Transformateur haute fréquence**

Le transformateur à haute fréquence est une pièce d'équipement essentielle dans les convertisseurs DAB et est la méthode conventionnelle pour réaliser l'isolation renforcée. Le transformateur devrait y parvenir tout en transférant la puissance aussi efficacement et instantanément que possible. La raison pour laquelle le transformateur THF est considéré comme supérieur à un transformateur à basse fréquence dans les convertisseurs de puissance est que, pour n'importe quelle puissance donnée, plus les fréquences sont élevées, plus les composants du transformateur et les filtres peuvent être petits, ce qui réduit considérablement la taille globale des transformateurs. [10]

- **Transfert d'énergie**

Les transformateurs transmettent de l'énergie par induction électromagnétique et se composent d'un noyau magnétique ainsi que de deux enroulements indépendants (primaire et secondaire). Un transformateur idéal ne devrait pas stocker d'énergie, et l'énergie est transférée instantanément d'un côté à l'autre. En pratique, l'énergie est stockée dans deux domaines; l'induction de fuite (L_K) qui est l'énergie stockée aux régions non magnétiques du transformateur, et l'inductance mutuelle (L_M) qui représente l'énergie stockée du noyau magnétique. Les transformateurs se composent de deux enroulements étroitement couplés où presque tout le flux produit par un enrouleur se lie à l'autre.

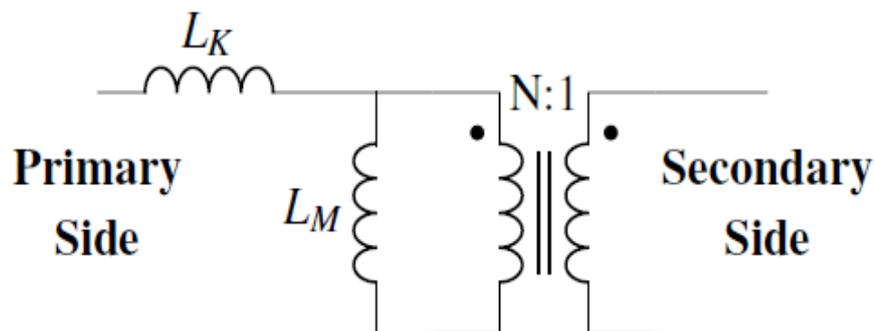


Figure II.2 : Transformateur équivalent avec fuite et inductance mutuelle

- **Transistors de puissance**

Les transistors de puissance fonctionnent comme des interrupteurs électriques et sont les éléments constitutifs de toute électronique. Ils sont constitués d'un matériau semi-conducteur, ce qui leur permet d'être soit conducteurs, soit isolants, selon un signal externe. Pour la plupart des convertisseurs de puissance nécessitant des fréquences élevées, le choix des transistors de puissance se porte soit sur les MOSFET, soit sur les IGBT en raison de leurs capacités de commutation rapides. Les MOSFET peuvent s'allumer et s'éteindre le plus rapidement et sont donc utilisés dans les applications avec les fréquences les plus élevées. Les IGBT ont de meilleures caractéristiques à l'état passant car ils peuvent utiliser la modulation de Conductivité, ce qui réduit les pertes à l'état passant, et ont donc une meilleure efficacité globale.

Dans une seule phase, le pont à double active, les ponts primaire et secondaire sont contrôlés simultanément. Tous les commutateurs fonctionnent à un taux de service de 50%. Les commutateurs diagonaux s'allument et s'éteignent ensemble de sorte que la sortie de chaque pont est une vague carrée. La séquence de commutation du convertisseur est détaillée dans cette section.

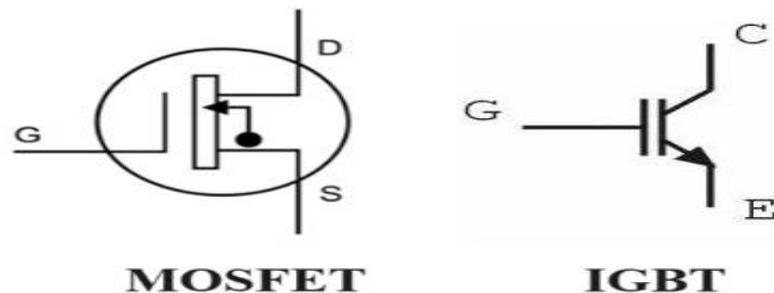


Figure II.3 : Symboles de MOSFET et IGBT

- **Diode a roue libre**

Comme dans d'autres convertisseurs commutés, des diodes de roue libre sont nécessaires pour fournir un chemin de conduction aux courants induits dans les inductances lorsque les transistors sont éteints. Assurant ainsi une bidirectionnalité du courant.

- **Inductances**

L'inductance de fuite du transformateur peut théoriquement suffire au fonctionnement du convertisseur. Néanmoins, il est difficile de maîtriser la valeur de cette inductance de fuite lors du dimensionnement et la réalisation du transformateur. C'est pourquoi, dans la plupart des cas, le transformateur est conçu « à fuites minimales » et une inductance externe est ajoutée en série. Cette inductance peut être localisée, selon le besoin et les contraintes du cahier des charges, au primaire ou au secondaire du transformateur.

- **Condensateurs**

Les condensateurs sont utilisés pour stocker l'énergie électrique et lisser les tensions. Ils sont généralement présents dans la configuration du DAB pour fournir une tension continue de sortie stable.

- **Le filtre à condensateur**

Joue un rôle important dans la régulation des tensions et le lissage des courants et la stabilisation de la tension de sortie.

II.1.2 Les types de Convertisseur DAB

Le convertisseur DC/DC à double pont actif est un convertisseur DC/DC bidirectionnel qui repose exclusivement sur des ponts alimentés en tension, avec trois dérivations, comme le montrent les figures II.4, II.5 et II.6 : [11]

Il existe également quelques dérivés des ponts actifs doubles, comme la combinaison d'un pont complet alimenté en tension et d'un demi-pont alimenté en tension, comme illustré dans la figure II.4, ou la combinaison de deux demi-ponts alimentés en tension, comme illustré dans la figure II.5. Chaque composé d'interrupteurs de puissance (transistors ou thyristors) et de diodes de roue libre.

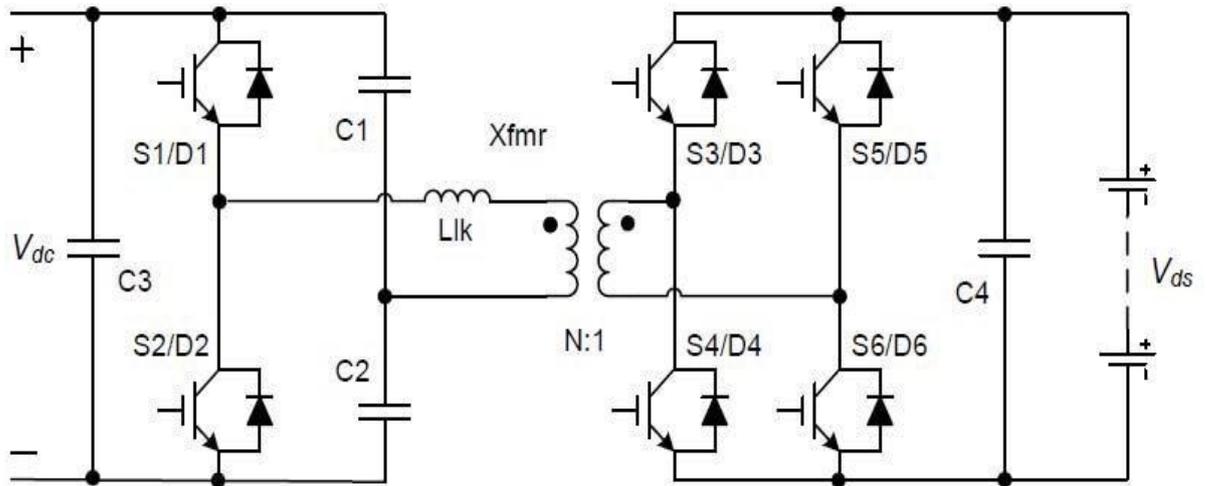


Figure II.4 : Convertisseur DC-DC bidirectionnel basé sur un demi-pont alimenté en tension et un pont complet alimenté en tension

Cette topologie peut être utilisée dans les systèmes de stockage d'énergie et les entraînements de moteurs. La gestion des doubles ponts actifs est extrêmement souple. Par exemple, un pont peut être contrôlé par déphasage tandis que l'autre n'est pas contrôlé (seules les diodes antiparallèles sont conductrices), ou bien les deux ponts émettent une forme d'onde de tension carrée et la phase entre les deux formes d'onde de tension carrée peut être réglée.

II.1.2.1 Convertisseur DAB à résonance série DC/DC

La figure II.5 illustre le convertisseur DC/DC de type DAB à résonance série. Les filtres passe-bas du deuxième ordre sont utilisés pour connecter la source DC d'entrée V_p et la sortie V_s au convertisseur afin de réduire les harmoniques de courant HF.

La modulation des tensions permettra de contrôler le flux de puissance entre les deux sources de tension v_1 et v_2 [12].

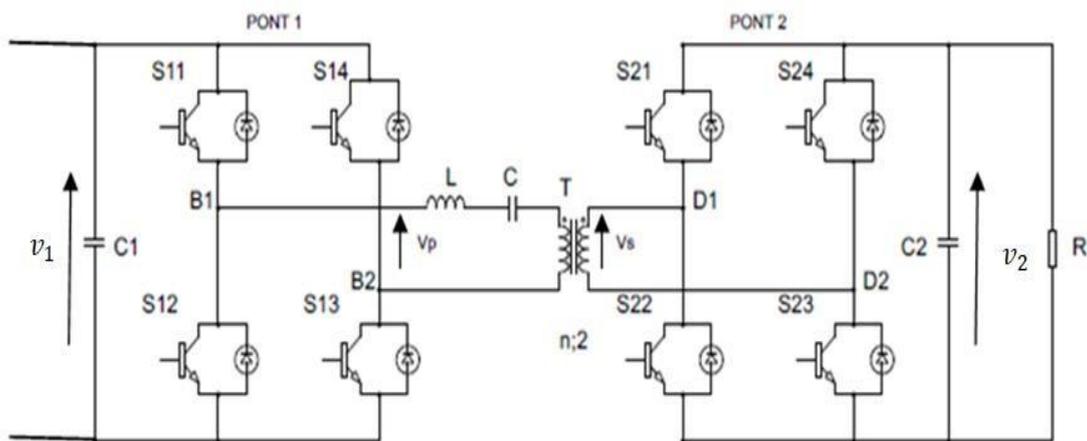


Figure II. 5 : Convertisseur DC/DC à résonance série.

II.1.2.2 Convertisseur DAB à résonance série DC/DC à trois sources

La structure du convertisseur DC/DC à trois ponts avec une topologie DAB à résonance série est représentée sur la figure II.6. [12]

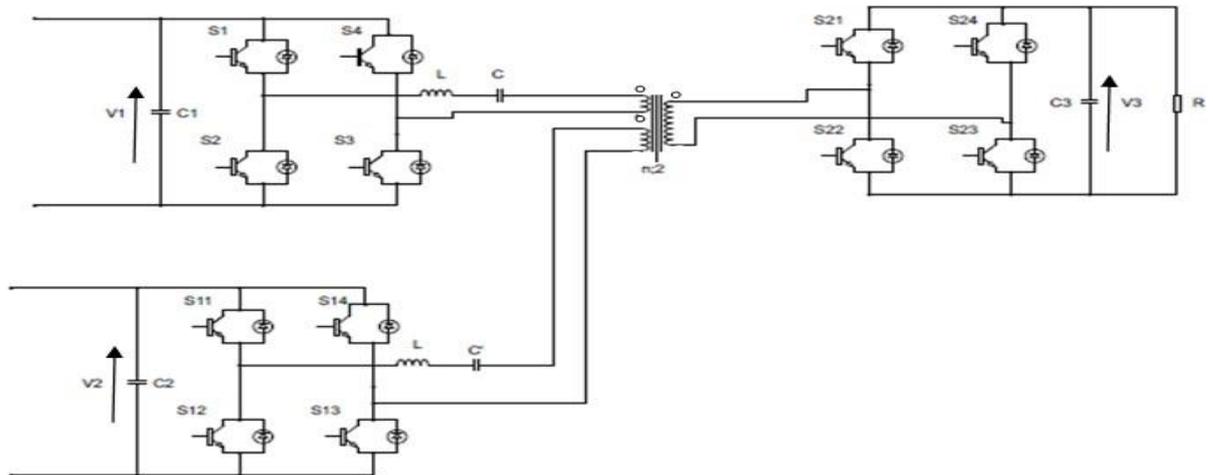


Figure II. 6: Convertisseur DC/DC à trois sources avec une topologie DAB à résonance série [10]

Il est constitué de trois ponts actifs, de deux circuits à résonance série et d'un transformateur HF à trois enroulements. Le convertisseur est relié à toutes les sources DC à l'aide de filtres passe-bas de deuxième ordre [12].

II.1.3 Les différents modes de fonctionnement

Le DAB peut fonctionner selon différents modes de fonctionnement, chacun avec ses propres caractéristiques et ses propres applications. Les modes de fonctionnement les plus courants sont :

- Mode Buck-Boost.
- Mode Buck.
- Mode Boost.

II.1.4 Le principe de fonctionnement de DAB

On relie les bornes AC de ces ponts entre elles grâce à un transformateur à haute fréquence, ce qui permet de faire circuler l'énergie dans les deux directions, comme illustré dans la Figure II.8. Il est possible de réguler chaque pont pour produire une tension carrée à haute fréquence aux bornes du transformateur. En tirant parti de l'inductance de fuite du transformateur, il est possible de déphaser de manière adéquate les deux ondes de tension carrée

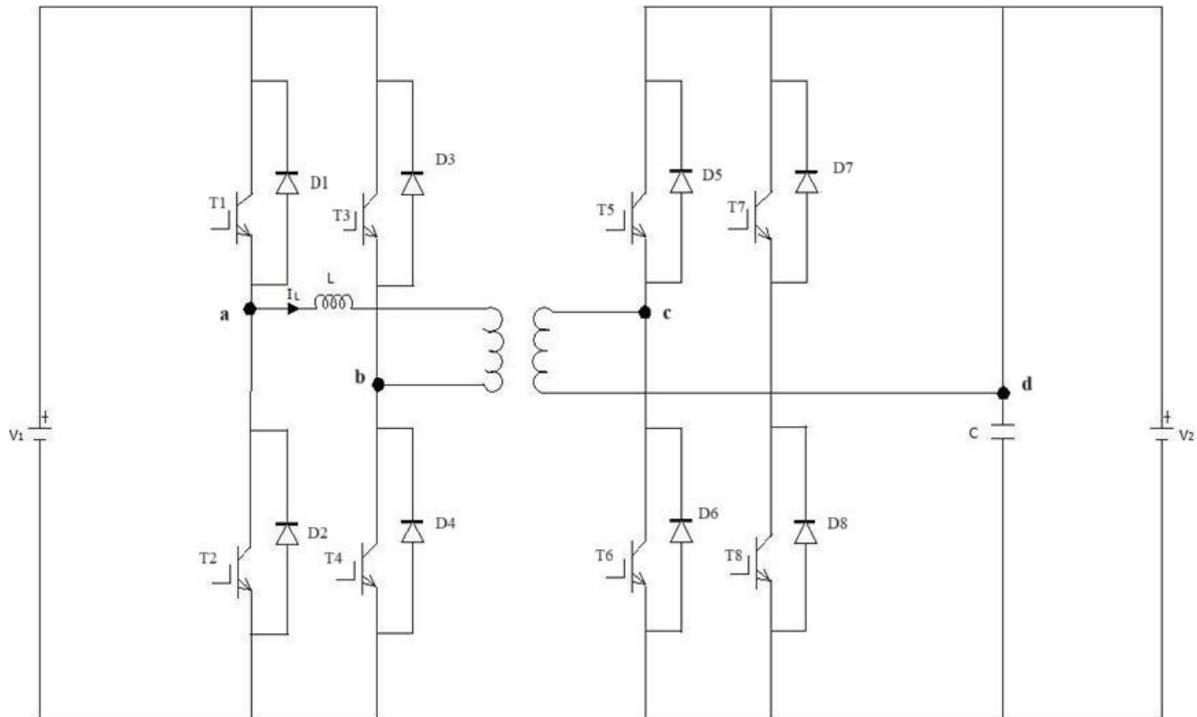


Figure II. 7: Convertisseur DC/DC du double pont actif

afin de les contrôler. En utilisant la capacité de fuite du transformateur, les deux ondes de tension carrée afin de contrôler l'énergie qui passe d'un côté à l'autre du convertisseur. On peut donc effectuer un transfert de puissance en deux directions. Tous les interrupteurs peuvent être utilisés dans des zones de commutation douce dans une large gamme de rapports entre les tensions d'entrée/sortie et la puissance transférée, ce qui permet d'améliorer l'efficacité énergétique de la structure de conversion. [13]

Pour le fonctionnement en mode classique, la puissance transférée à tension de sortie du convertisseur donnée est contrôlée par le réglage du déphasage φ des commandes de l'onduleur par rapport à celles du redresseur.

Un exemple des formes d'ondes de tension et du courant aux bornes du transformateur est présenté sur la Figure II.8.

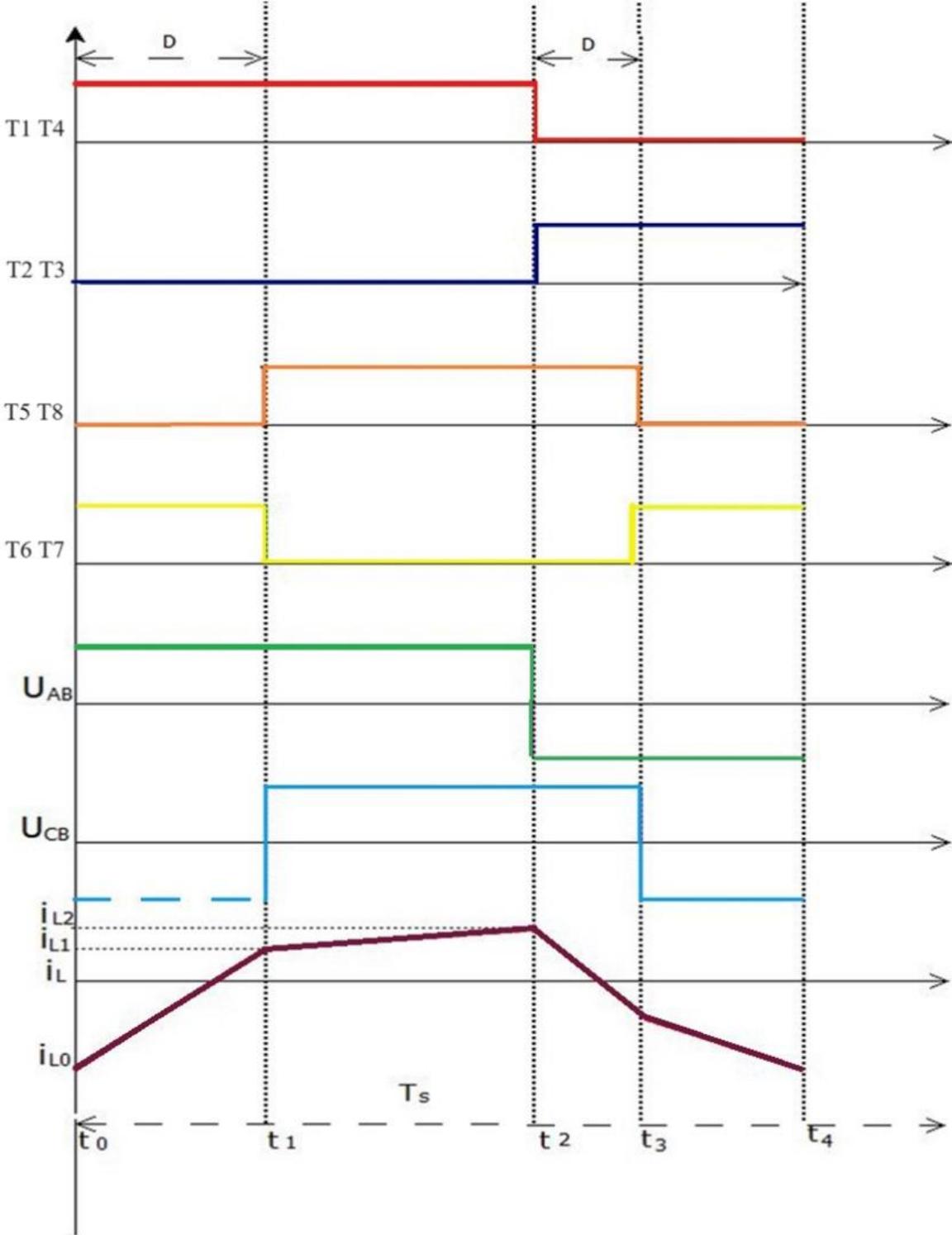


Figure II. 8 : Signaux de commutation des interrupteurs

Conclusion

Au cours du deuxième chapitre, nous avons commencé par les convertisseurs DC/DC. Nous avons présenté ces différents types pour modéliser un système de DAB, et nous avons suivi plusieurs étapes pour parvenir à cette modélisation. Une fois que nous avons obtenu le modèle d'état du DAB, nous avons procédé à l'insertion de régulateur PI pour contrôler le système.

Chapitre III : Modélisation et simulation d'un convertisseur DAB.

III. Introduction

La modélisation d'un convertisseur double pont actif est l'objet de ce chapitre. Il est crucial de la comprendre afin de saisir son comportement et son fonctionnement. D'abord, nous abordons la description du circuit, puis nous nous concentrons sur l'établissement du système d'équation du DAB et l'élaboration de son modèle moyen. La prochaine étape consistera à vérifier ce convertisseur.

Une fois que l'analyse théorique est terminée, on procède à la simulation en utilisant le logiciel adéquat, MATLAB/Simulink.

III.1 Description du circuit

La figure III.1 montre la topologie d'un convertisseur DC/DC double pont actif (DAB), où : [14]

- v_1 et v_2 sont respectivement la tension d'entrée constante donnée et les tensions de sortie mesurables;
- V_p est la tension de sortie du pont primaire (pont 1);
- V_S est la tension d'entrée sur le pont secondaire (pont 2);
- C_2 est la capacité du côté sortie;
- i_1, i_D, i_{C_2} et i_2 sont respectivement le courant d'entrée de sortie, le courant du condensateur, C_2 et le courant de charge;
- R est la résistance de charge;
- L est l'inductance de transformateur ;
- i_L est le courant de la bobine L .

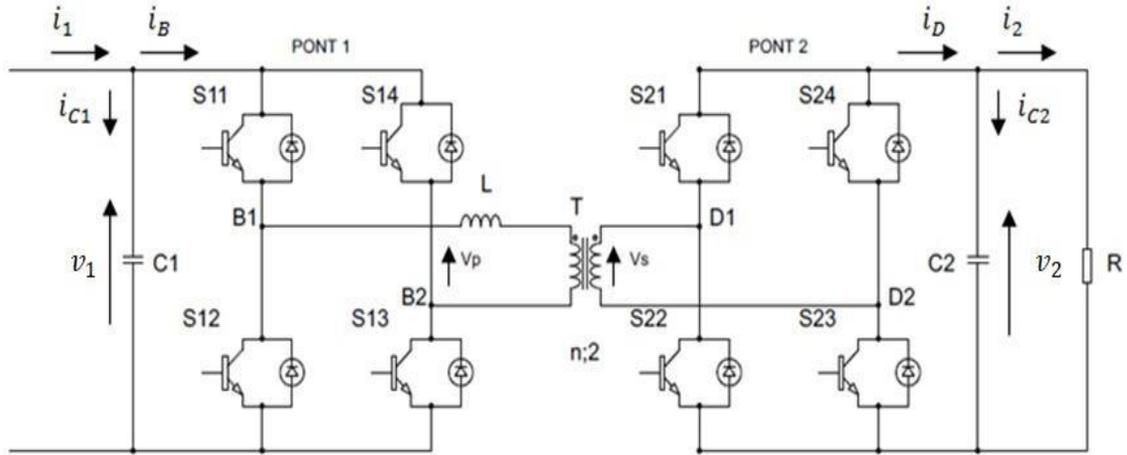


Figure III.1 : Topologie d'un convertisseur DC/DC

On notera que la commutation des interrupteurs par S_i avec ($i=11, 12, 13, 14, 21, 22, 23$ et 24).

- Si S11-S13 est fermé S12-S14 ouvert.
- Si S12-S14 est fermé S11-S13 ouvert.
- Si S21-S23 est fermé S22-S24 ouvert.
- Si S22-S24 est fermé S21-S23 ouvert.

III.1.1 Modélisation de DAB

En utilisant des équations pour représenter le système, nous pouvons déduire la fonction de transfert adéquate entre l'obtention du courant de sortie et le rapport de déphasage du DAB. Ces caractéristiques s'avèrent bénéfiques pour définir des contrôleurs adaptés aux opérations de charge et de décharge de batterie.

On peut observer le convertisseur DAB à double pont actif dans la Fig. III.1. Selon le type de charge qui est affecté à la sortie DAB, il y a deux modes de fonctionnement : soit en tant que charge résistive, soit en tant que source de tension.

On prend le temps d'analyser le modèle de circuit afin d'obtenir le modèle d'état du DAB. Les commutateurs détectent les fonctions de commutation des deux ponts sur une période de commutation du DAB les suivants.

$$\begin{cases} S_{11} = S_{13} = 1 - S_{14} \\ S_{12} = S_{14} = 1 - S_{11} \\ S_{21} = S_{23} = 1 - S_{24} \\ S_{22} = S_{24} = 1 - S_{23} \end{cases} \quad [\text{III.1}]$$

À partir de l'équation (II.1), les tensions d'entrée v_{B1B2} et de sortie v_{D1D2} aussi que les courants d'entrée i_B et de sortie i_D du DAB (Par la négligeassions des caractéristiques de commutation des transistors (chute de tension et temps mort)), s'expriment par :

$$v_{B1B2} = \begin{cases} v_1 si & S_{11} = 1 \\ -v_1 si & S_{11} = 0 \end{cases} \quad [\text{III.2}]$$

$$\begin{aligned} v_{B1B2} &= (S_{11}S_{13} - S_{14}S_{12})v_1 = [S_{11}(1 - S_{14}) - S_{14}(1 - S_{11})]v_1 = \\ &v_1 (S_{11} - S_{14}) = v_1 (S_{11}(1 - S_{11})) \end{aligned} \quad [\text{III.3}]$$

Car $S_{14} = S_{12} = 1 - S_{11}$

D'où

$$v_{B1B2} = v_1 (2S_{11} - 1) \quad [\text{III.4}]$$

De même pour v_{D1D2} , i_B et i_D on obtient :

$$v_{D1D2} = \begin{cases} v_2 si & S_{21} = 1 \\ -v_2 si & S_{21} = 0 \end{cases} \quad [\text{III.5}]$$

$$v_{D1D2} = v_2 (2S_{21} - 1)$$

$$i_B = \begin{cases} i_L si & S_{11} = 1 \\ -i_L si & S_{21} = 0 \end{cases}$$

$$i_B = i_L(2S_{11} - 1) \quad [\text{III.6}]$$

$$i_B = i_L(2S_{11} - 1)$$

$$i_D = \begin{cases} n \cdot i_L \text{ si } S_{21} = 1 \\ -n \cdot i_L \text{ si } S_{21} = 0 \end{cases} \quad [\text{III.7}]$$

$$i_D = n \cdot i_L(2S_{21} - 1)$$

Le courant dans l'inductance L et la tension aux bornes de la capacité C , représentent les variables d'état du DAB tel que :

$$\begin{cases} v_{B1B2} - L \frac{di_L}{dt} - n \cdot v_{D1D2} = 0 \rightarrow L \frac{di_L}{dt} = v_{B1B2} - n \cdot v_{D1D2} \\ i_D - i_{C2} - i_2 = 0 \rightarrow C \frac{dv_2}{dt} = i_D - i_2 \\ L \frac{di_L}{dt} = v_{B1B2} - n \cdot v_{D1D2} = v_1(2S_{11} - 1) - v_2(2S_{21} - 1) \\ C_2 \frac{dv_2}{dt} = i_D - i_2 = n \cdot i_L(2S_{21} - 1) - i_2 \end{cases} \quad [\text{III.8}]$$

Le modèle d'état du système DAB est donné par l'équation (II.9) :

$$L \frac{di_L}{dt} = [v_1(2S_{11} - 1) - v_2(2S_{21} - 1)]$$

[III.9]

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{C_2} [n \cdot i_L(2S_{21} - 1) - i_2]$$

III.1.2 Modèle de simulation du DAB sous l'environnement MATLAB/Simulink

Une fois que nous avons obtenu le modèle d'état du système, nous pouvons déduire le modèle moyen du DAB en utilisant l'expression de la puissance moyenne du transformateur. Afin de faciliter les calculs, une simulation a été réalisée qui a produit des courbes qui illustrent les tensions et les courants du circuit correspondant.

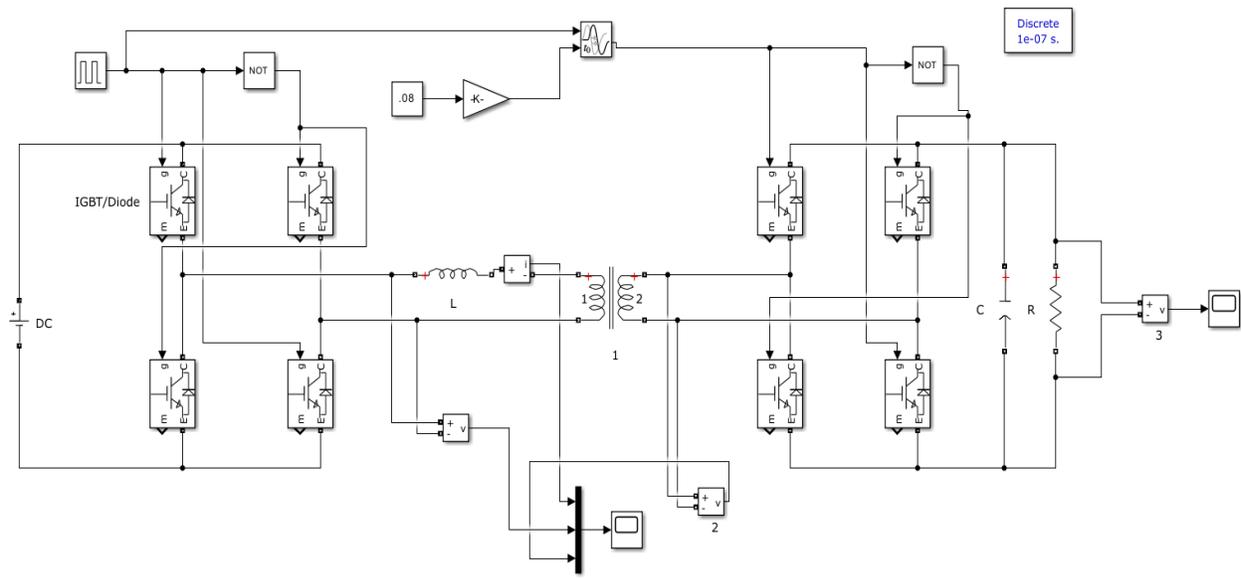


Figure III.2 : Schéma du DAB sous MATLAB/Simulink

Les paramètres de simulation de DAB utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Paramètres de simulation de DAB

Paramètres	Symb	Spécification	Unité
Puissance	S	250	MVA
Tension du bus côté d'entrée	Ve	100	V
Tension du bus côté de sortie	Vs	50	V
Rapport de transformateur	n	1/2	-
Impédance primaire du transformateur	Zp	0	Ω
Impédance secondaire du transformateur	Zs	0	Ω
Résistance de magnétisation du transformateur	Rm	1.0805	M Ω
Inductance de magnétisation du transformateur	Lm	2866	H
Inductance côté transformateur	L	0.0102	mH
Capacité du bus côté de sortie	Cs	660	μ F
Charge résistive côté de sortie	Rs	1	Ω
Pulsation de commutation du DAB	Ws	$2\pi \cdot 50 \cdot 10^3$	rad/s

III.1.3 Résultats de simulation en boucle ouvert

Les figures Figure III.3, Figure III. 4, Figure III. 5 et Figure III. 6 représente respectivement la tension et le courant en boucle ouvert :

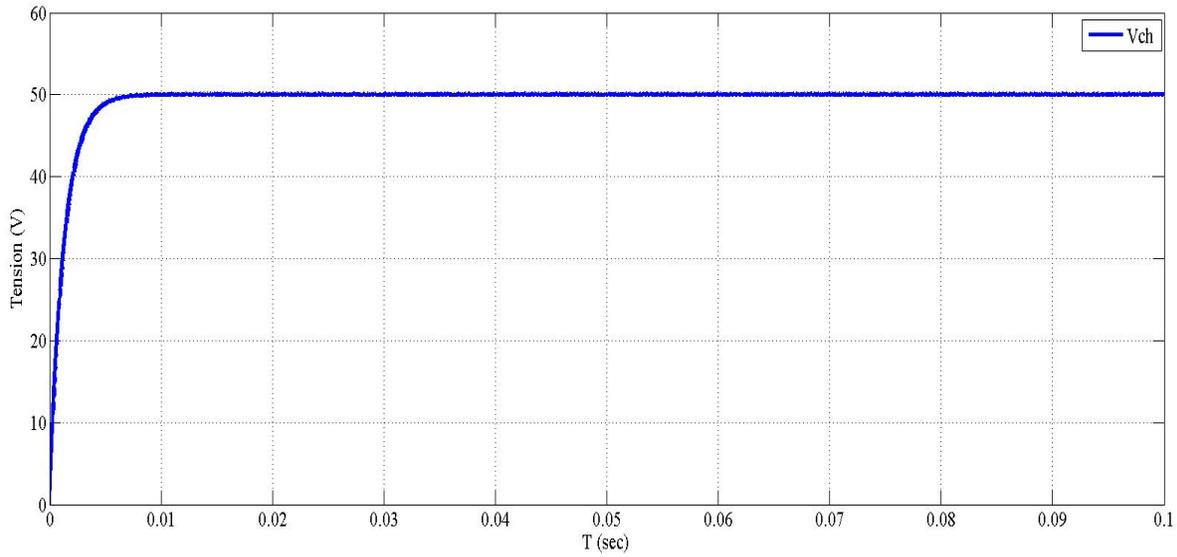


Figure III.3 : Tension aux bornes de la charge R

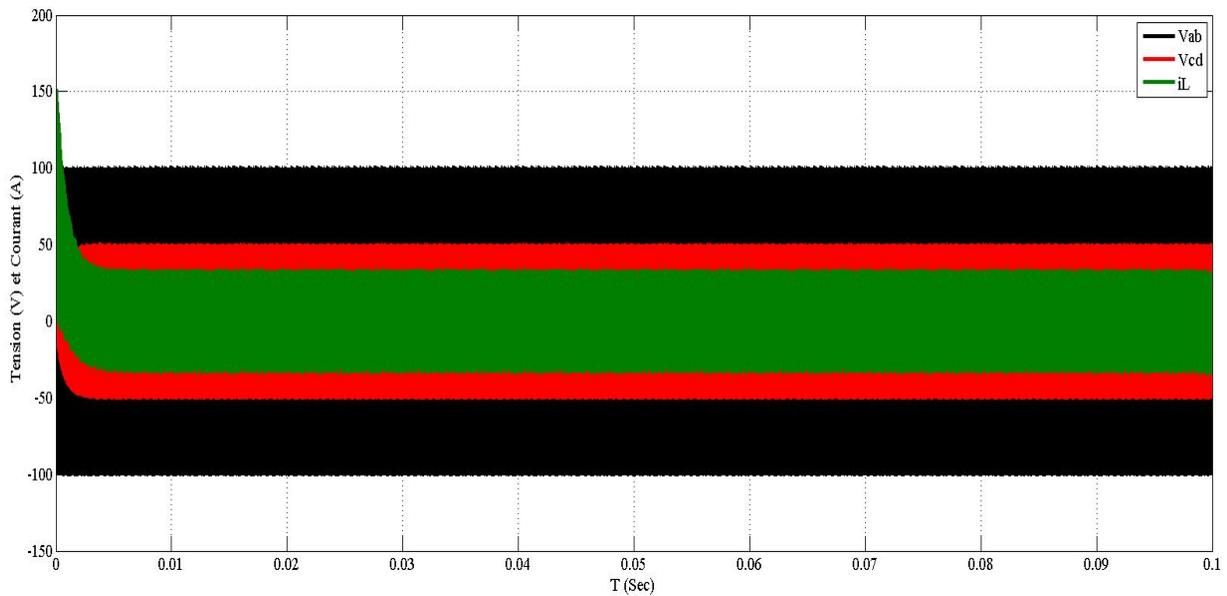


Figure III.4 : Allure des tensions V_{ab} , V_{cd} et le courant de l'inductance i_L en BO

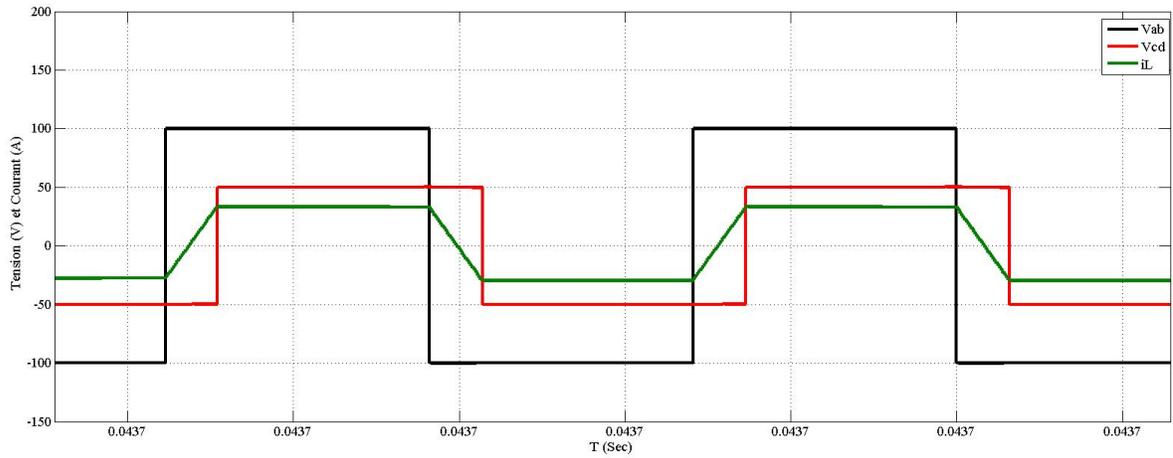


Figure III.5 : Zoom de l'Allure des tensions Vab, Vcd et le courant de l'inductance iL dans le régime permanent en BO

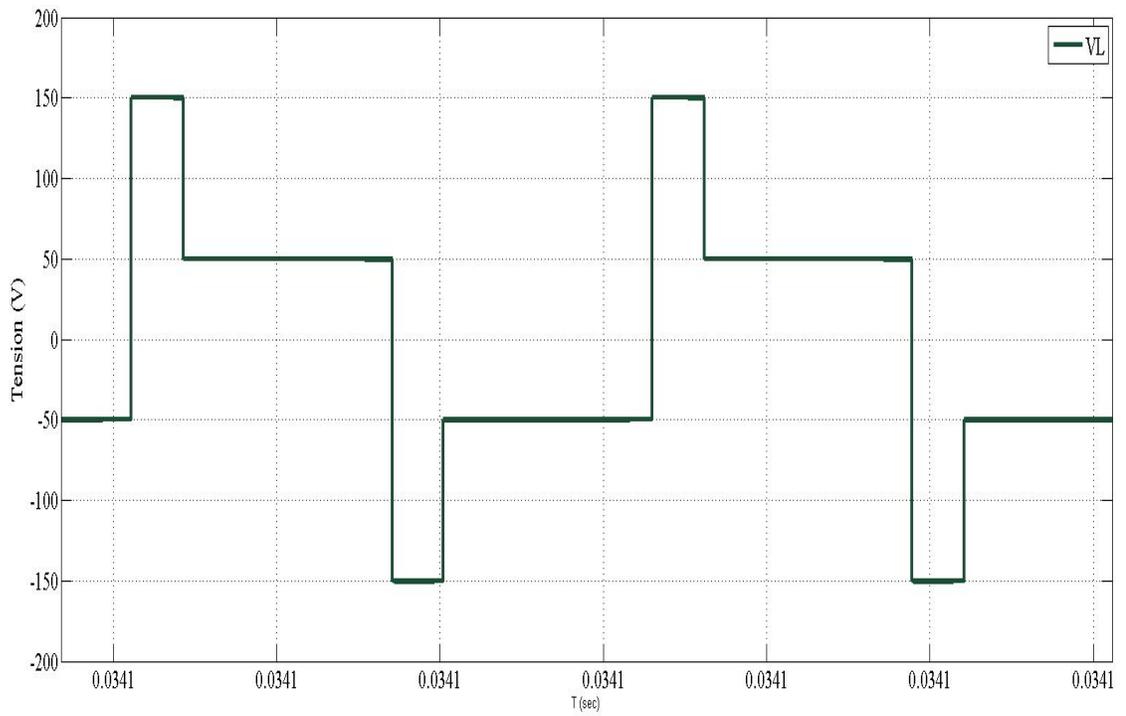


Figure III.6 : Zoom de Tension aux bornes de l'inductance

III.1.4 Interprétation des résultats

La figure III.5 montre que la tension aux bornes v_{D1D2} est en retard par rapport à v_{B1B2} par un déphasage φ .

Nous avons représenté graphiquement les courbes en régime permanent, les tensions v_{B1B2} , v_{D1D2} et le courant de l'inductance i_L se répètent tous le demi-cycle avec des signes inversés.

Une seule demi-période d'étude du DAB est suffisante. Par application de la définition de la puissance moyenne à l'entrée du transformateur en fonction de la tension d'entrée de transformateur v_1 et le courant i_L dans l'inductance L (Figure III.1). L'équation P est:

$$P = \langle v_1 \cdot i_L \rangle \pi = v_1 \cdot \langle i_L \rangle \pi \quad [\text{III.10}]$$

On a:

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int [v_{B1B2}(t) - n \cdot v_{D1D2}(t)] dt \quad [\text{III.11}]$$

On effectue un changement de variable du domaine temporel au domaine angulaire, soit

$t = \frac{\theta}{\omega_s}$, Avec θ est le déphasage entre le pont 1 et le pont 2 on obtient :

On a:

$$\begin{cases} \theta = \omega_s t, d\theta = \omega_s dt \\ v_{B1B2}(t) = v_{B1B2}(\theta) \\ v_{D1D2}(t) = v_{D1D2}(\theta) \\ dt = \frac{d\theta}{\omega_s} \end{cases} \quad [\text{III.12}]$$

À partir de là, l'expression du courant exprimé dans (III.11) devient alors :

$$i_L(\theta) = \frac{1}{Lw_S} \int [v_{B1B2}(\theta) - n \cdot v_{D1D2}(\theta)] d\theta \quad [\text{III.13}]$$

D'après la figure III.1 on a :

Expression des tensions et du courant aux bornes de l'inductance pour une demi-période de fonctionnement :

• **Intervalle** $0 \leq \theta \leq \varphi$:

$$\begin{cases} v_{B1B2} = v_1 \\ v_{D1D2} = -v_2 \end{cases} \quad [\text{II.14}]$$

$$i_L(\theta) = \frac{v_1 + nv_2}{Lw_S} \cdot \theta - \hat{i}_L$$

• **Intervalle** $\varphi \leq \theta \leq \pi$:

$$\begin{cases} v_{B1B2} = v_1 \\ v_{D1D2} = v_2 \end{cases} \quad [\text{III.15}]$$

$$i_L(\varphi) = \frac{v_1 + nv_2}{Lw_S} \cdot (\theta - \pi) + \hat{i}_L$$

À partir des expressions du courant, on peut évaluer la condition initiale du courant \hat{i}_L ainsi que déterminer l'expression du courant moyen pour une demi-période

$\langle i_L \rangle_\pi$:

$$\begin{cases} i_L(\varphi) = \frac{v_1 + nv_2}{Lw_S} \cdot \varphi - \hat{i}_L \\ i_L(\varphi) = \frac{v_1 + nv_2}{Lw_S} \cdot (\varphi - \pi) + \hat{i}_L \end{cases} \quad [\text{III.16}]$$

$$\hat{i}_L = \frac{1}{2Lw_S} [\pi v_1 + (2\varphi - \pi)nv_2] \quad [\text{III.17}]$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^\varphi \left[\frac{v_1 + nv_2}{LW_s} \cdot \theta - \hat{i}_L \right] d\theta + \int_\varphi^\pi \left[\frac{v_1 - nv_2}{LW_s} \cdot (\theta - \pi) + \hat{i}_L \right] d\theta \right\} \\
 &= \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{v_1 + nv_2}{LW_s} \cdot \frac{\varphi^2}{2} + \frac{v_1 - nv_2}{LW_s} \cdot \left[-\frac{(\varphi - \pi)^2}{2} \right] + (\pi - 2\varphi) \cdot \hat{i}_L \right\} \\
 &= \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{v_1 + nv_2}{LW_s} \cdot \frac{\varphi^2}{2} + \frac{v_1 - nv_2}{LW_s} \cdot \left[-\frac{(\varphi - \pi)^2}{2} \right] + (\pi - 2\varphi) \cdot \hat{i}_L \right\} \\
 &= \frac{v_1\pi(2\varphi - \pi) + nv_2 \cdot (2\varphi^2 - 2\varphi\pi + \pi^2) + (\pi - 2\varphi)[v_1\pi + (2\varphi - \pi)nv_2]}{2\pi LW_s} \\
 &= \frac{nv_2}{2\pi LW_s} = [2\varphi^2 - 2\varphi\pi + \pi^2 - (2\varphi - \pi)^2] = \frac{nv_2}{LW_s} \varphi \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right)
 \end{aligned}$$

[III.18]

$$\langle i_L \rangle_\pi = \frac{nv_2}{LW_s} \varphi \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right)$$

Finalement, en remplaçant $\langle i_L \rangle_\pi$, l'expression de la puissance est simplifiée :

$$P = \frac{v_1 nv_2}{LW_s} \varphi \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right) \quad \text{[III.19]}$$

Le modèle du DAB étudié est considéré comme un gyrateur moyen selon (Krishnamurthy, 2008).

En utilisant ce modèle, la tension v_1 contrôle le courant i_D tandis que la tension v_2 contrôlé par et le courant i_B ce qui résulte en un système couplé de point de vue tension et courant exprimé par :

$$\begin{cases} i_D = \frac{P}{v_2} = \frac{nv_1}{LW_s} \varphi \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi}\right) \\ i_B = \frac{P}{v_1} = \frac{nv_2}{LW_s} \varphi \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi}\right) \end{cases} \quad [\text{III.20}]$$

Ce qui nous donne :

$$C2 \frac{dv_2}{dt} = i_D - i_2 = \frac{nv_1}{LW_s} \varphi \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi}\right) i_2 \quad [\text{III.21}]$$

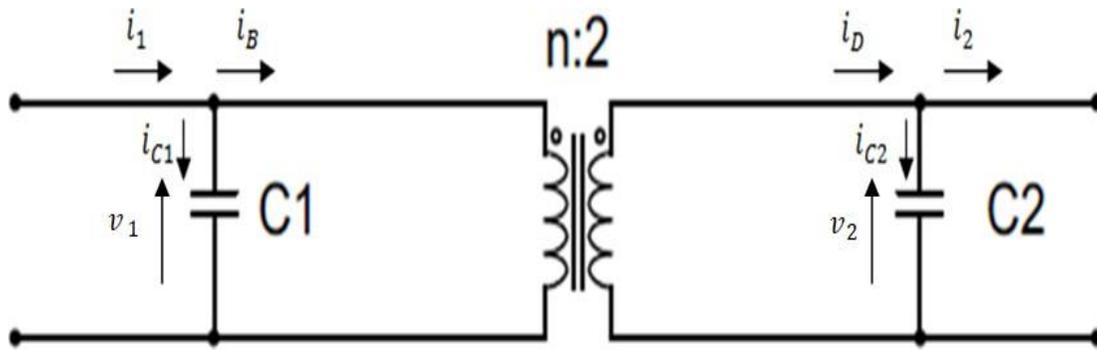


Figure III.7 : Modèle du gyrateur moyen du DAB

III.1.5 Contrôle du double pont actif

III.1.5.1 Contrôler le modèle DAB avec régulateur PI

En modulant l'amplitude du courant de l'inductance série, le DAB permet de contrôler la puissance transférée. En réglant le déphasage entre les ondes carrées appliquées de part et d'autre du transformateur en série, on modifie l'inductance. Le déphasage entre les deux ondes carrées augmente l'ampleur de cette inductance. Le régulateur employé est de type intégral proportionnel.

[15]

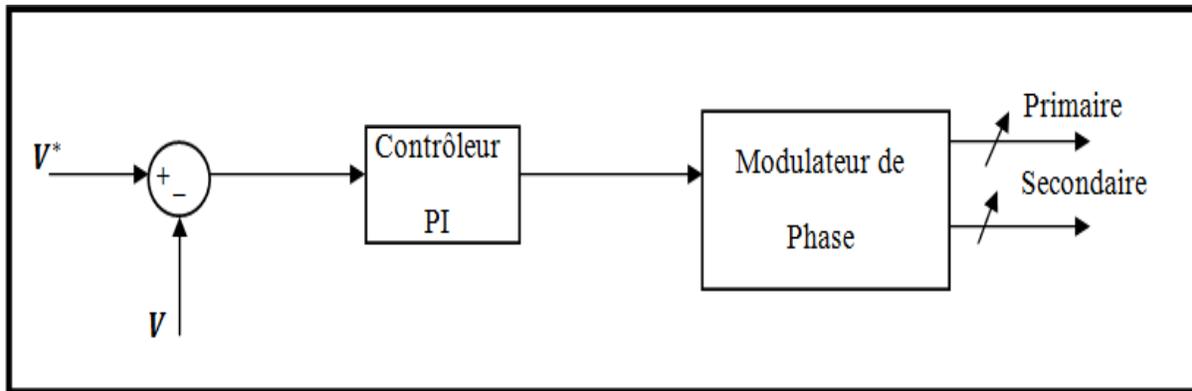


Figure III.8 : Schéma de contrôle de DAB

III.1.5.2 Modèle DAB avec régulation sous MATLAB/Simulink

Le schéma de convertisseur DAB ci-dessous a été conçu à l'aide de la bibliothèque Matlab/Simulink. Cela nous a donné la possibilité d'obtenir les allures des différentes tensions et courant de charge en prenant en compte les paramètres des régulateurs PI que on a choisi par tentative ($K_p = 0.25$ et $K_i = 0.0000850$), et en insérant une tension de référence aux instants suivants :

- A l'instant $t = 0$ à $t = 0.2$ nous avons incéré une tension de valeur $V = 24\text{v}$; $V = 48\text{v}$; $V = 12\text{v}$

La simulation de la « Figure III.9 » permet d'obtenir les résultats suivants :

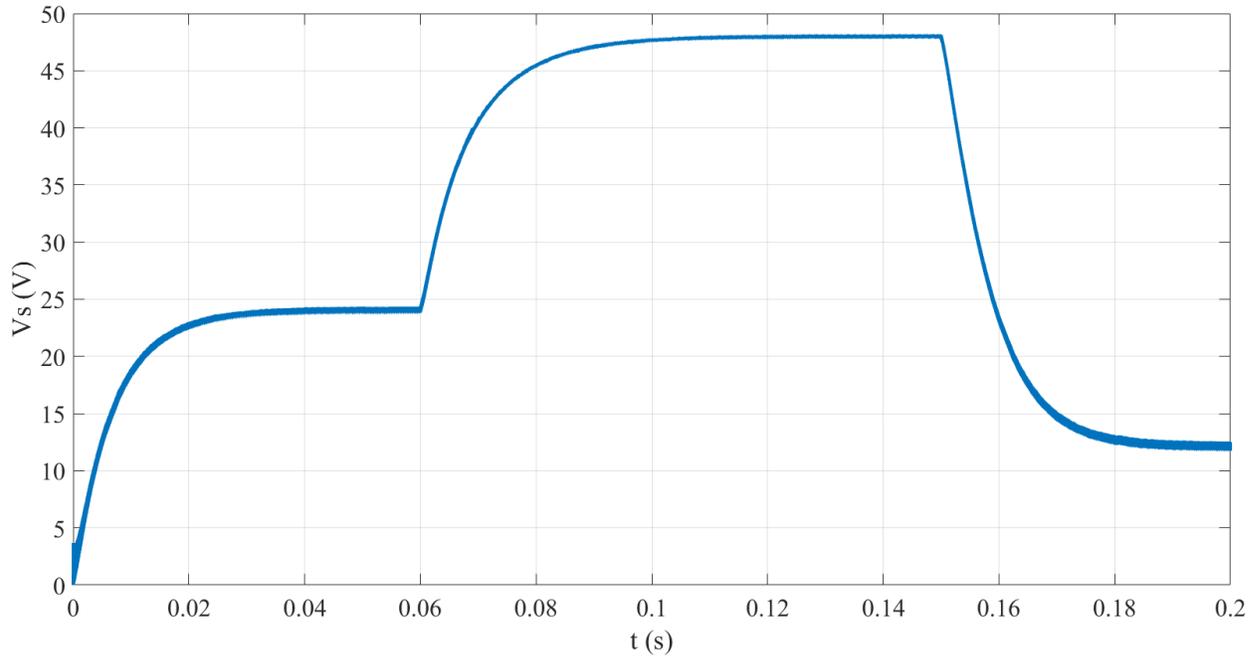


Figure III.10 : Tension aux bornes de la charge

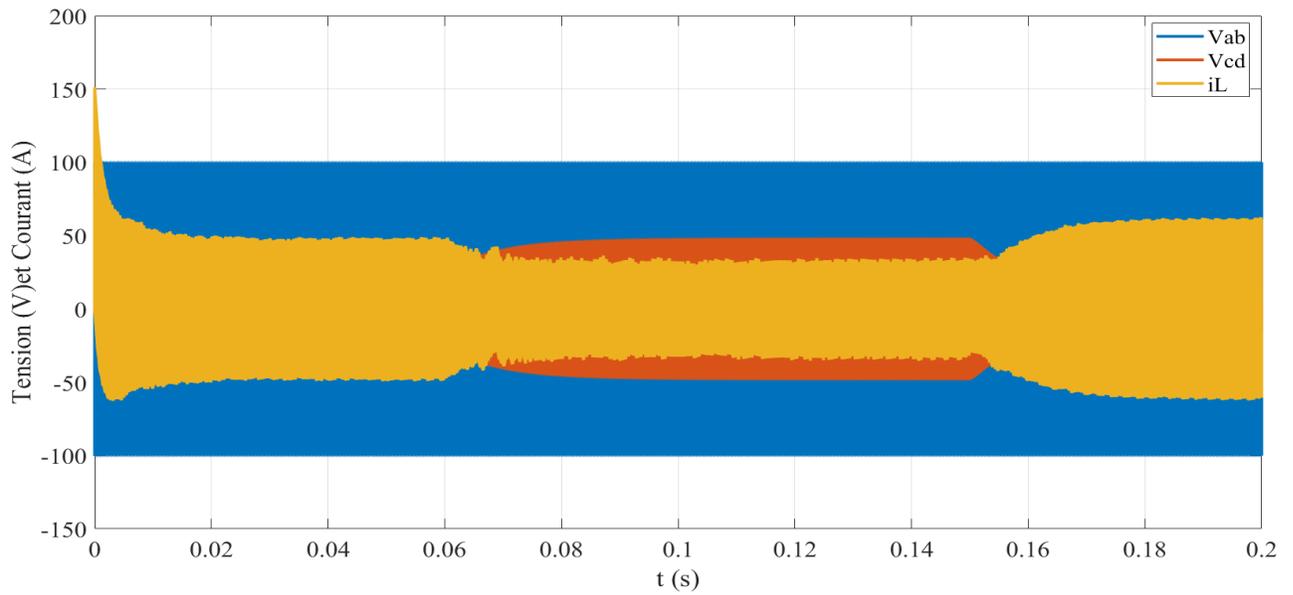


Figure III.11 : Allure des tensions V_{ab} , V_{cd} , et le courant de l'inductance i_L en BF

Les Figures III .12, 13, 14, illustre les formes d'onde des tensions V_{ab}, V_{cd} ainsi que du courant de l'inductance i_L , pendant le régime permanent du convertisseur en boucle fermée sur les différents intervalles de temps compris entre 0.051345 et 0.0197945 pour chaque sortie (24 V, 48 V et 12 V) en ordre.

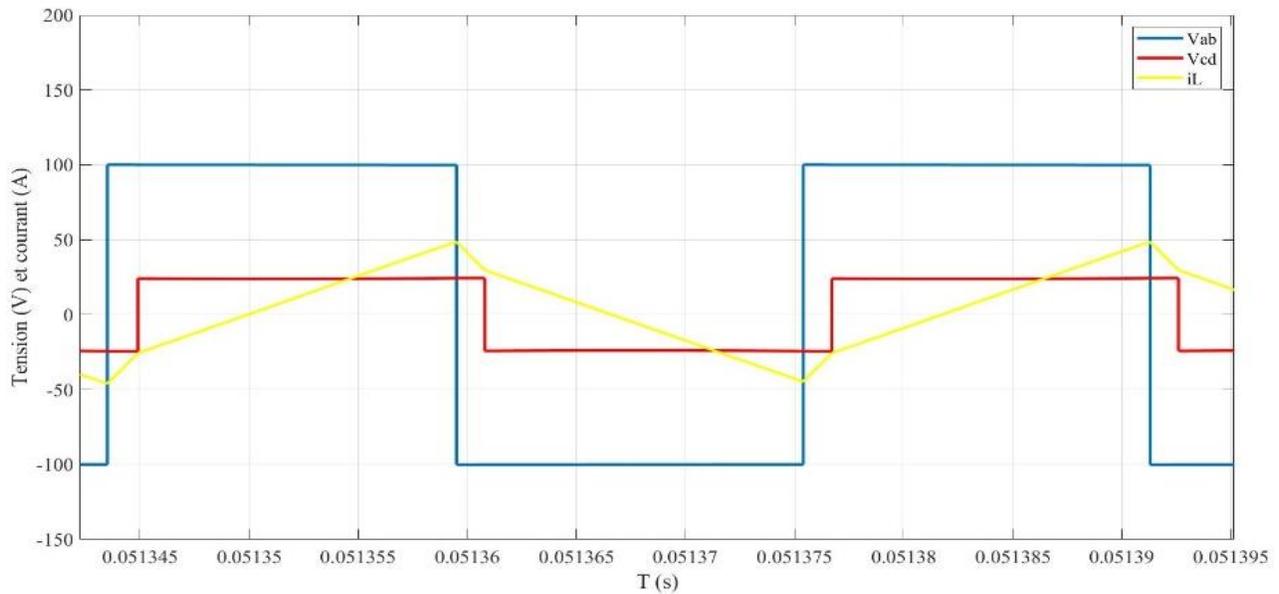


Figure III.12 : Zoom de l'allure des tensions V_{ab}, V_{cd} et le courant de l'inductance i_L en BF Pour la tension de sortie 24 V

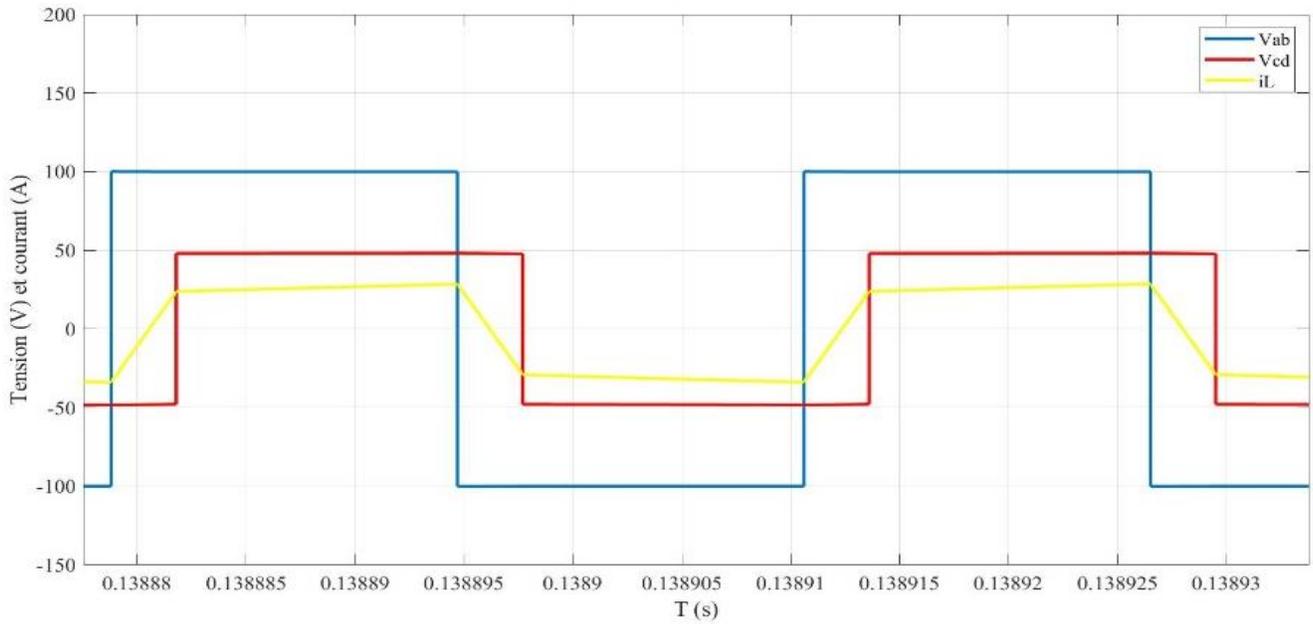


Figure III.13 : Zoom de l'allure des tensions V_{ab} , V_{cd} et le courant de l'inductance i_L en BF Pour la tension de sortie 48 V

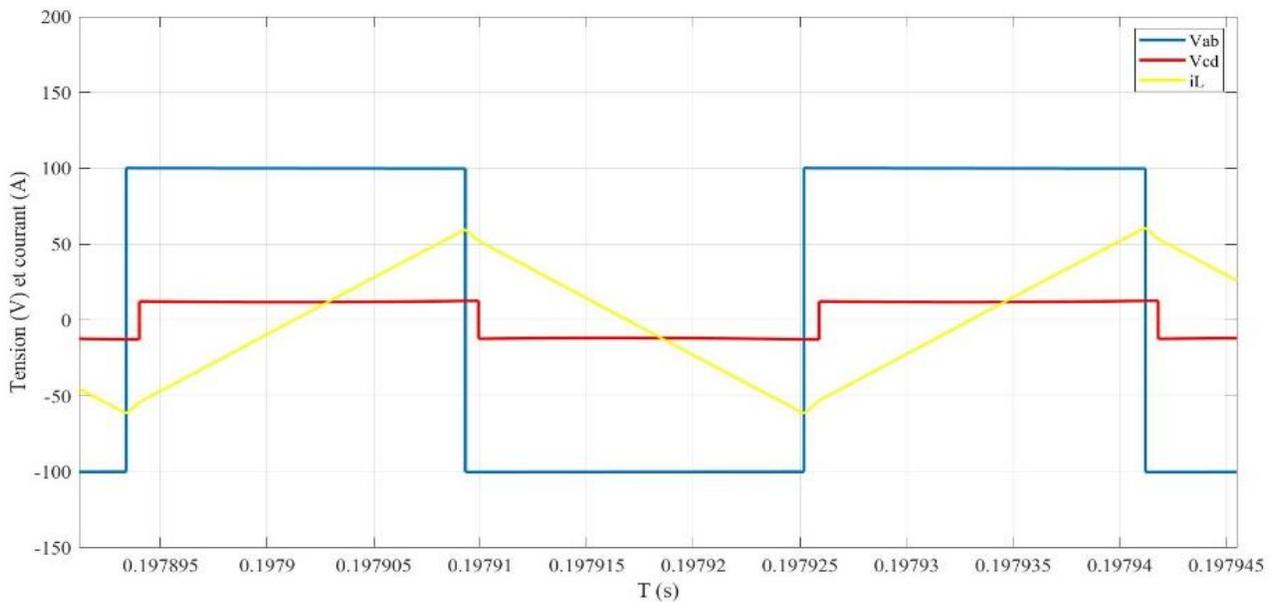


Figure III.14 : Zoom de l'allure des tensions V_{ab} , V_{cd} et le courant de l'inductance i_L en BF Pour la tension 12 V

III.1.6 Interprétation des résultats

On réalise le test de contrôle optimisé en boucle fermée avec une tension d'entrée de 100 V et une fréquence de commutation de $10000 \cdot \pi$ Hz, en appliquant une variation de tension de sortie de 48V ,24V ,12 V. Selon les résultats de la simulation, il est observé que le contrôle de DAB augmente à mesure que le déphasage entre les deux tensions V_{ab} et V_{cd} augmente, ce qui entraîne également une augmentation de l'amplitude de courant. Autrement dit, à mesure que le déphasage augmente, l'amplitude du courant augmentera.

Conclusion

Dans le troisième chapitre, nous avons désigné un système de DAB, en suivant les différentes étapes pour réaliser cette modélisation.

Après avoir obtenu le modèle d'état, nous avons introduit un régulateur PI adéquat pour superviser le système, puis nous avons réalisé la simulation avec MATLAB /SIMULINK.

Chapitre VI : Application de DAB sur batterie

IV. Introduction

Dans ce chapitre on a proposé d'examiner l'application de DAB dans la recharge des batteries. Nous allons modéliser et simuler un système de recharge en intégrant un régulateur proportionnel-intégral (PI) pour assurer une gestion optimale du courant et de la tension. Les résultats des simulations démontreront l'efficacité du DAB à charger une batterie de manière sûre et efficace, sans risques de surcharge ou de surchauffe, validant ainsi son potentiel comme solution fiable pour les systèmes de stockage d'énergie.

IV.1 Les batteries

Une batterie est une apparence qui stocke de l'énergie chimique sous forme de piles. Une batterie se charge lorsque l'énergie électrique est transformée en énergie chimique. Elle transforme de l'énergie chimique en énergie électrique lorsqu'elle se décharge. Les cycles de charge et de décharge réversibles font partie intégrante des caractéristiques d'une batterie. L'énergie supplémentaire produite par les panneaux solaires et les éoliennes ; Cette réserve d'énergie chimique est transformée en énergie électrique pour faire fonctionner des différents appareils. [16]

IV.1.1 Constitution d'une batterie

Une batterie est constituée d'un bac étanche contenant une alternance de plaques positives et négatives. Ce sont le plus souvent des éléments métalliques qui sont le siège de réactions d'oxydo-réduction (échanges d'électrons). Les mouvements d'électrons sont inversés lors de la charge et de la décharge. Entre les plaques, un électrolyte constitué d'ions assure la continuité des mouvements de charges via une membrane.

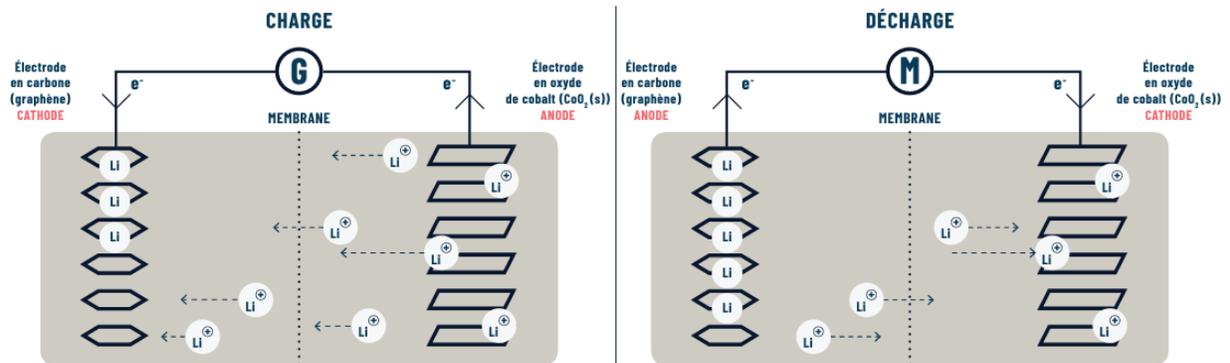


Figure VI.1 : Constitution d'une batterie

Un chargeur de batterie est un dispositif électronique destiné à contrôler et à fournir un courant électrique contrôlé à une batterie afin de le recharger de manière efficace. Il est crucial pour préserver la capacité de stockage d'énergie des batteries en régulant leur niveau de charge après l'utilisation. Les chargeurs de piles sont employés dans divers domaines, tels que les voitures, les appareils électroniques portables, les systèmes de secours, les batteries solaires et industrielles.

IV.1.2 Les types de chargeur

On peut distinguer plusieurs catégories principales de chargeurs en fonction de leur méthode de charge et de leur application particulière. Voici les catégories principales de chargeurs :

- **Chargeur à courant constant** : est fourni par les chargeurs à courant constant pendant la charge.
- **Chargeurs à tension constante** : Maintenez une tension stable une fois que la batterie est chargée.
- **Chargeurs à tension et courant variables** : Ils peuvent ajuster à la fois le courant et la tension en fonction des exigences de la batterie.
- **Les chargeurs intelligents** : surveillent et adaptent automatiquement les paramètres de charge afin d'améliorer la durée de vie de la batterie
- **Chargeurs solaires** : Exploitez les rayons du soleil afin de recharger les batteries.

- **Chargeurs rapides (fast chargers)** : offrent une charge rapide en continuant le courant de charge tout en préservant la sécurité de la batterie.

- **Un chargeur lent (standard)** : est conçu pour recharger les batteries à un rythme plus lent et avec un courant de charge réduit.

IV.1.3 Classification de chargeur

- **Chargeurs bidirectionnels**

On peut distinguer deux catégories de chargeurs bidirectionnels : les chargeurs non isolés, qui sont moins recommandés en raison de leur poids et de leur coût élevé, et les chargeurs isolés qui offrent une grande densité de puissance et un contrôle rapide. Lorsque l'objectif est non seulement de charger une batterie à partir du réseau électrique, mais aussi d'injecter l'énergie stockée dans la batterie dans le réseau lorsque cela est nécessaire, comme dans les systèmes de stockage d'énergie à grande échelle, il est essentiel d'utiliser des chargeurs bidirectionnels. [16]

- **Chargeurs unidirectionnels**

Dans un système unidirectionnel, le transfert d'énergie s'effectue du réseau à la batterie. Cette approche présente plusieurs avantages : elle réduit les besoins en termes de configuration matérielle, simplifie les problèmes d'interconnexion et contribue à minimiser la dégradation de la batterie. Les chargeurs unidirectionnels sont conçus pour charger les batteries à partir du réseau électrique, mais ils ne peuvent pas injecter d'énergie dans le réseau. [16]

IV.2 Structures de chargeur DC/DC DAB

Conversion DC/DC : le courant continu obtenu à l'issue de la première conversion est modifié pour correspondre au profil de charge de la batterie. Une alimentation à découpage permet par exemple d'adapter la puissance en entrée de la batterie. Cette conversion introduit généralement une isolation galvanique de sécurité. Le rôle convertisseur DC/DC est responsable de charger la batterie selon une technique de charge spécifique.

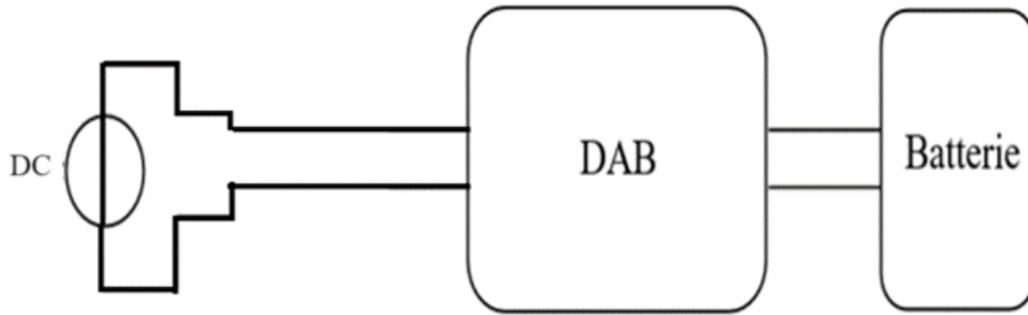


Figure VI.2 : Chargeur DAB

IV.3 Modélisation et simulation

IV.3.1 Modélisation de batterie

Pour le type de batterie au lithium-ion, On utilise ces équations.

Modèle de décharge ($i^* > 0$) :

$$f_1(it, i^*, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} \cdot (i^* + it) + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it$$

[IV.1]

$$V_{batt}(T) = f_1(it, i^*, T, T_a) - R(T) \cdot i$$

Modèle de charge ($i^* < 0$) :

$$f_1(it, i^*, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{it + 0.1 \cdot Q(T_a)} \cdot (i^* - K(T)) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} \cdot it +$$

$$A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it$$

[IV.2]

$$V_{batt}(T) = f_1(it, i^*, T, T_a) - R(T) \cdot i$$

[IV.3]

Avec

$$E_0(T) = E_{0|T_{ref}} + \frac{\partial E}{\partial T} (T - T_{ref}) \quad [IV.4]$$

$$K(T) = K|_{T_{ref}} \cdot \exp\left(\alpha \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad [IV.5]$$

$$Q(T_a) = Q|_{T_a} + \frac{\Delta Q}{\Delta T} \cdot (T_a - T_{ref}) \quad [IV.6]$$

$$R(T) = R|_{T_{ref}} \cdot \exp\left(\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad [IV.7]$$

IV.3.2 Simulation de batterie

La figure ci-dessus présente le modèle de chargeur de batterie sous MATLAB/Simulink :

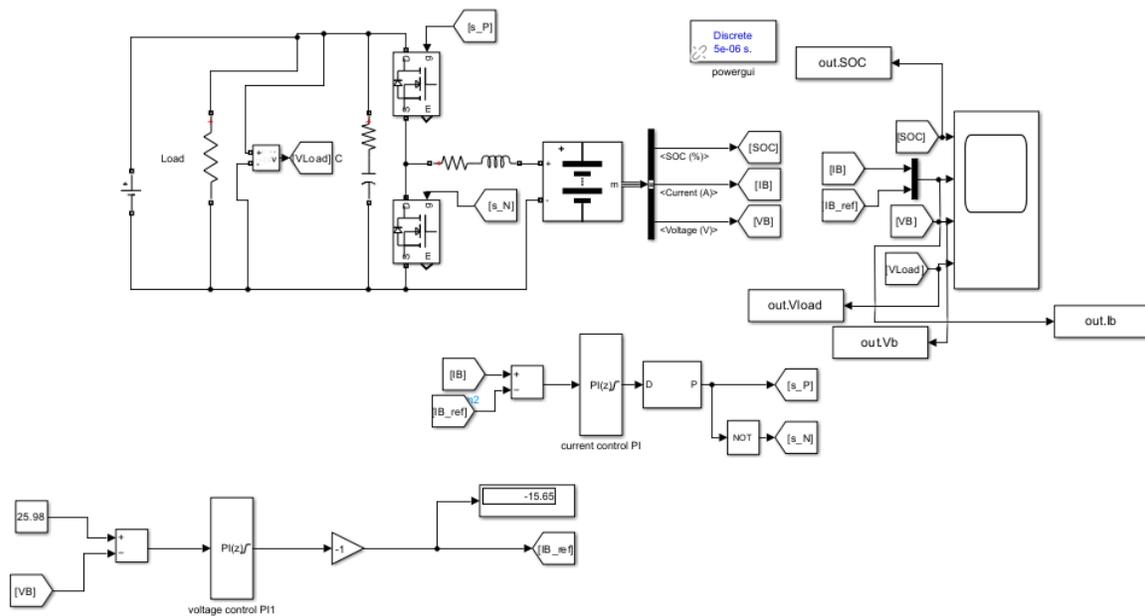


Figure VI.3 : Modèle de chargeur de batterie sous MATLAB/Simulink

Tableau 2 : Paramètre de batterie

Tension nominale	24	V
Capacité de la batterie	50	Ah
Etat initial de la batterie	45	%

Les figures suivantes présentes les résultats de la simulation :

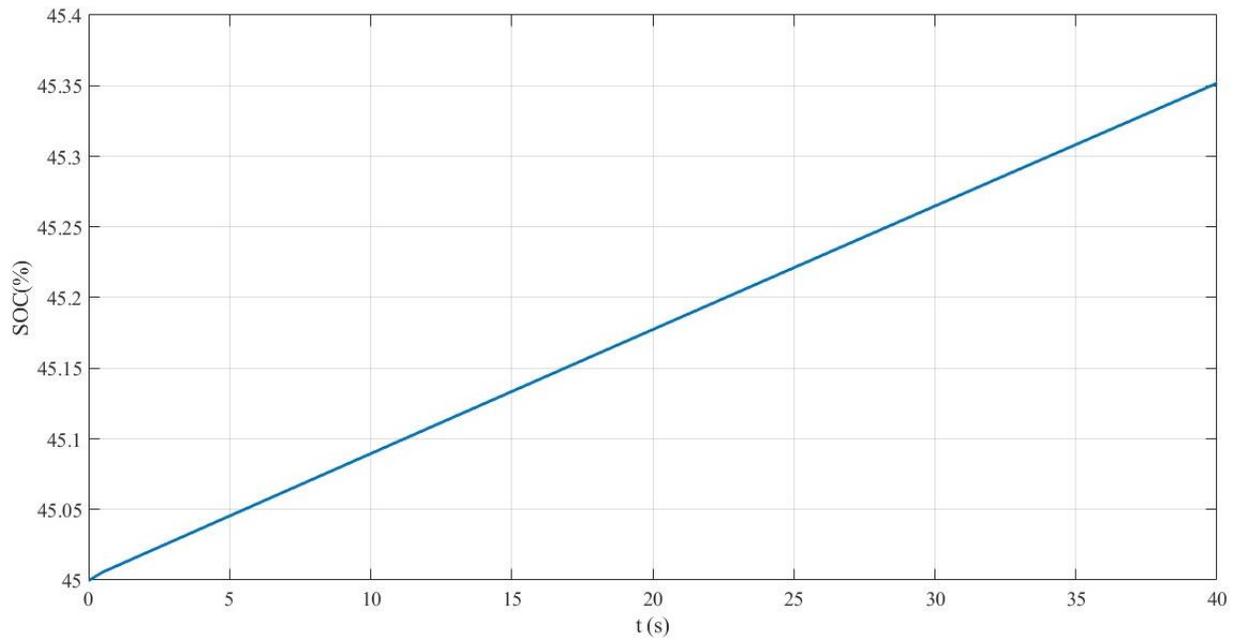


Figure VI.4 : Pourcentage de charge de batterie

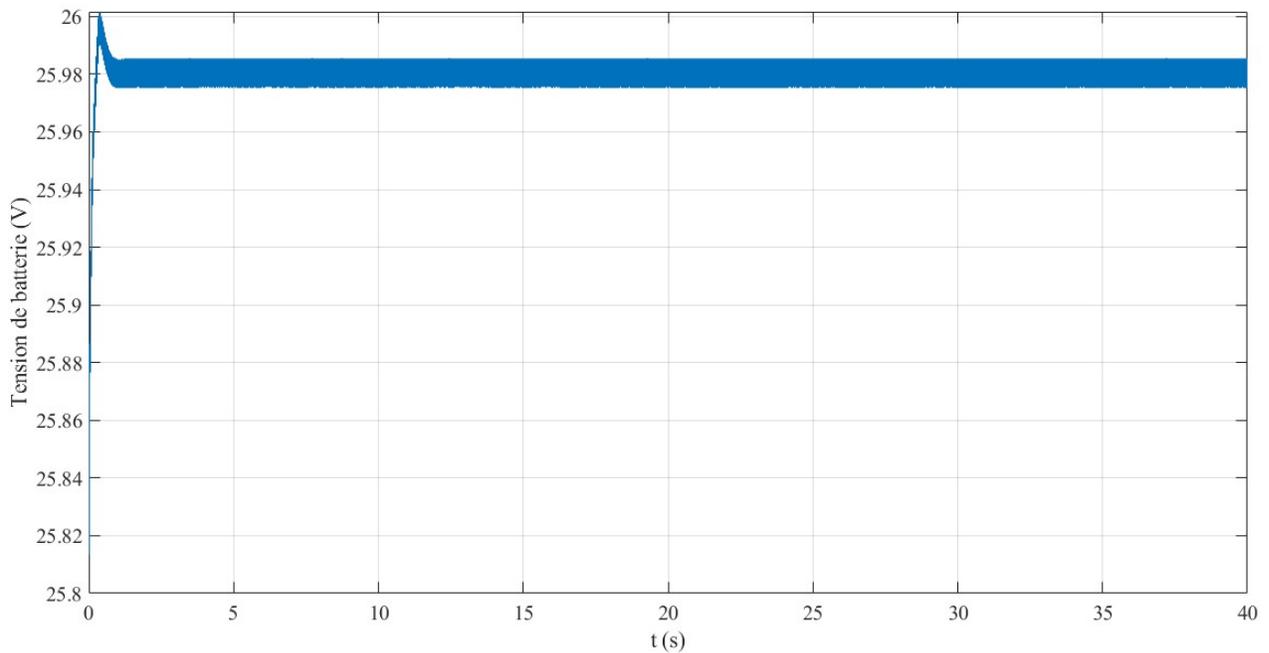


Figure VI.5 : Tension de batterie

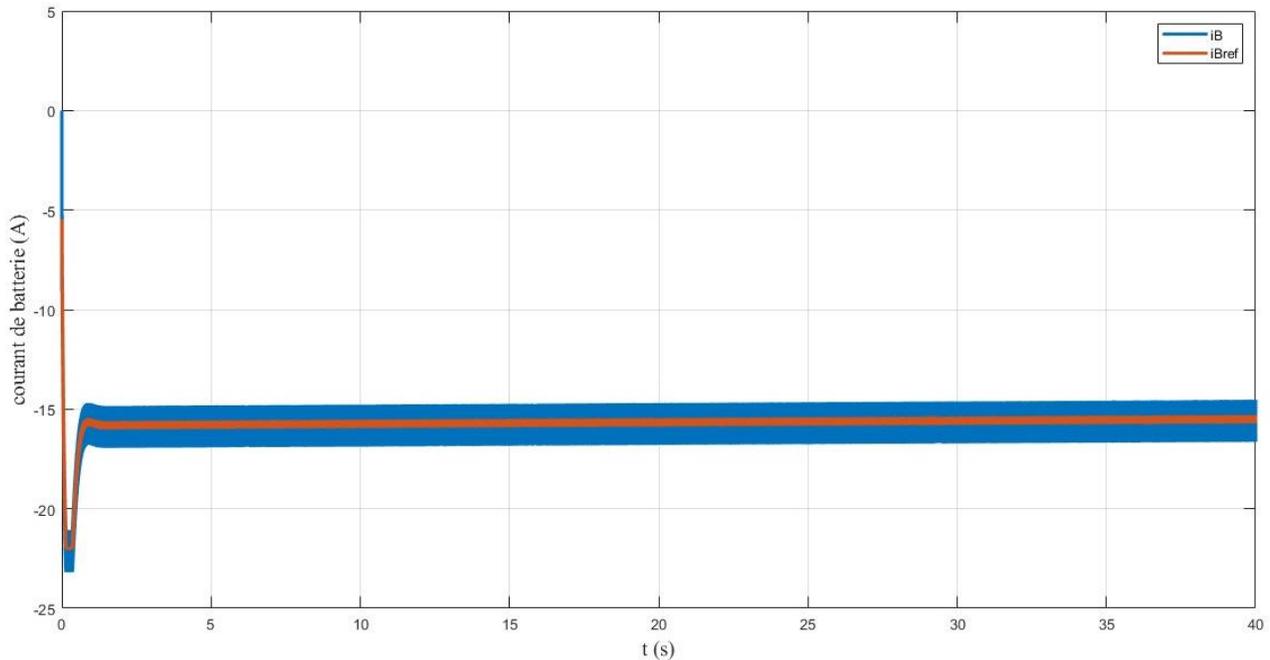


Figure VI.6 : Courante de batterie et de référence

IV.3.3 Interprétation des résultats

Voici ce que nous avons appris à partir des résultats obtenus :

- Cela a duré environ 40 secondes.

Nous avons utilisé un Buck-boost pour charger la batterie, et on a constaté que la charge progressait lentement, la tension restait constante et le courant était négatif. Qui signifie que le courant il est dirigé du convertisseur vers la batterie

IV.4 Adaptation de DAB sur une batterie

La figure ci-dessus présente le modèle chargeur à double pont actif sous MATLAB/Simulink :

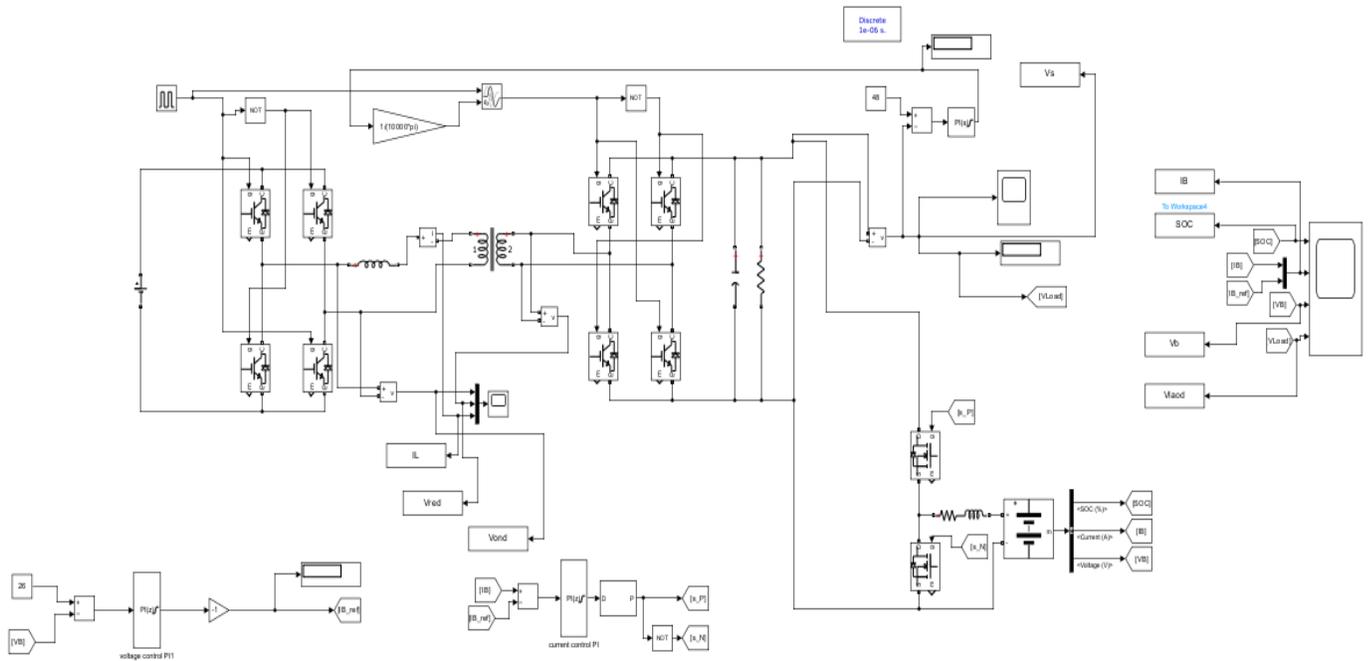


Figure VI.7 : Présente le modèle chargeur à double pont actif sous MATLAB/Simulink

IV.4.1 Interprétation des résultats

La Figure IV.8 représente les résultats de simulation aux bornes de la batterie tel que l'état de charge (SOC%), la tension et le courant.

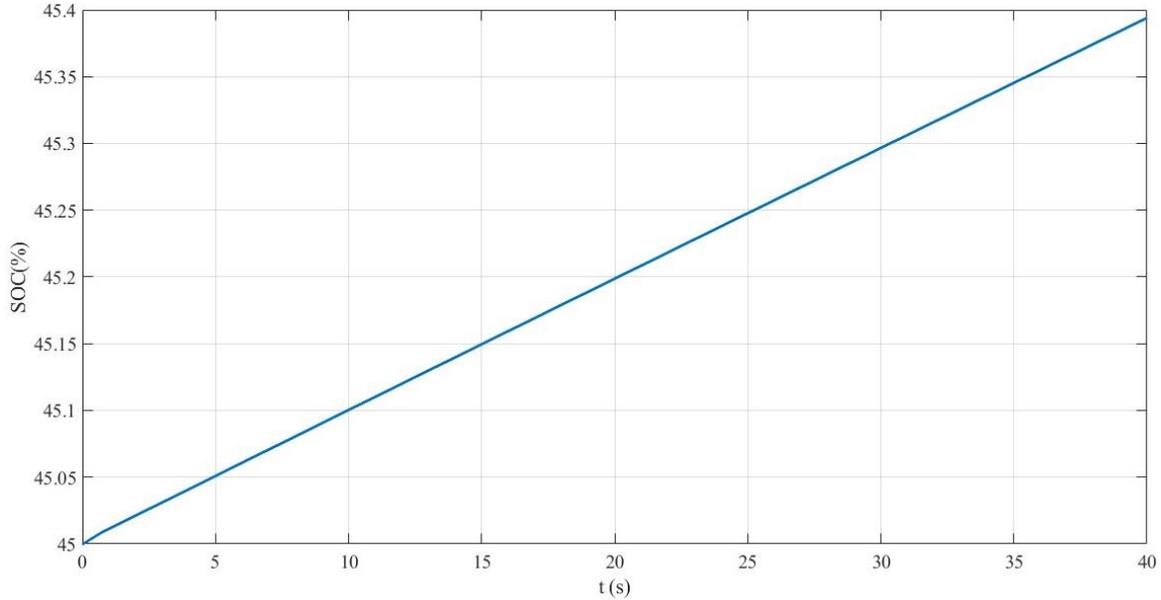


Figure VI.8 : Stockage de batterie avec chargeur DAB

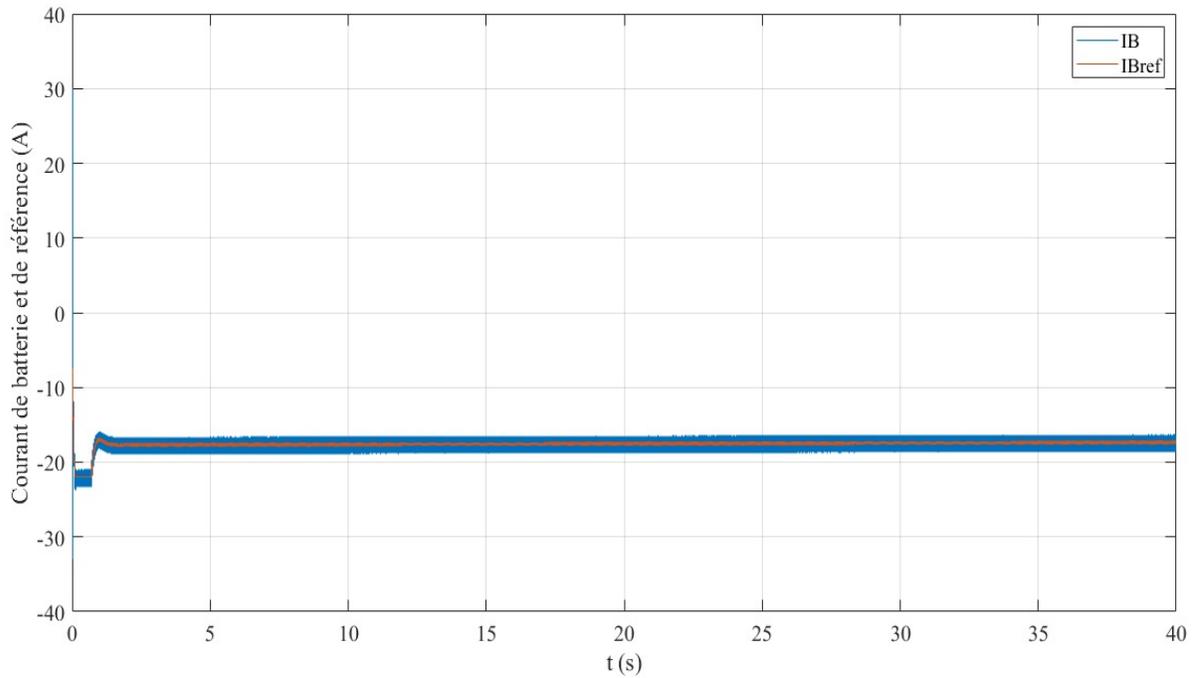


Figure VI.9 : Courant de batterie avec chargeur DAB

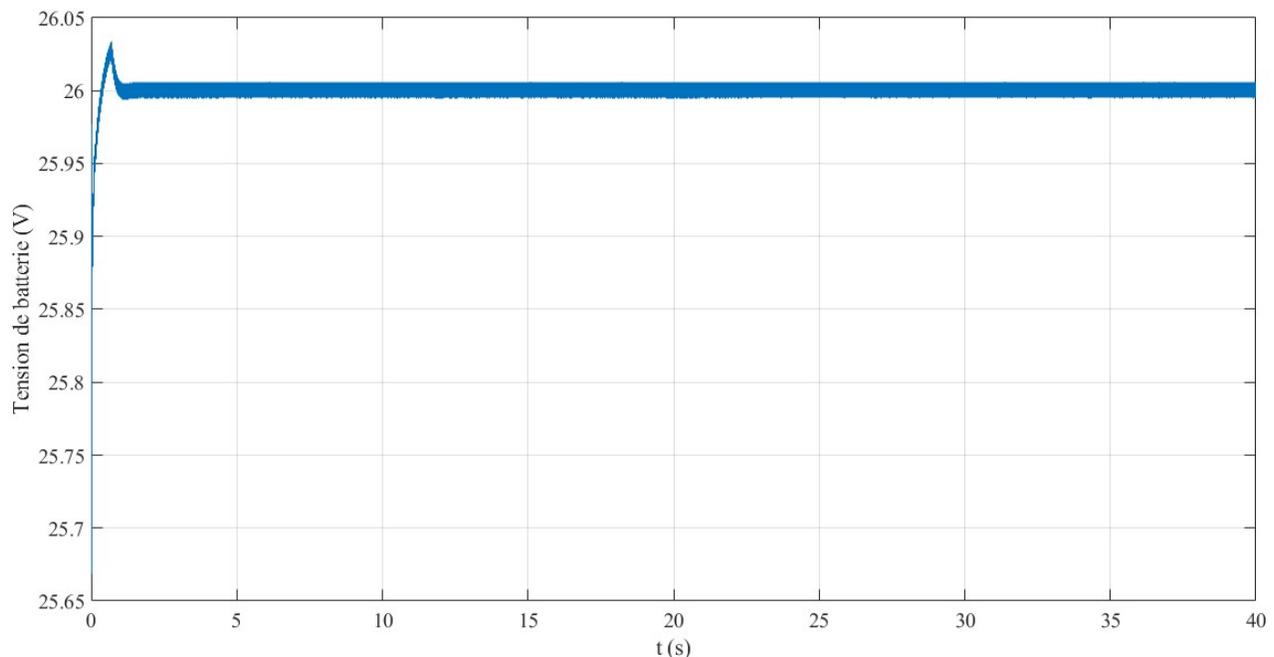


Figure VI.10 : Tension de batterie avec chargeur de DAB

Voici ce que nous avons appris à partir des résultats obtenus :

- Cela a duré environ 40 secondes.
- On a estimé que la batterie elle va charger dans les environs de 40 min.
- Une fois que la batterie est entièrement chargée, le courant est coupé.
- La tension de la batterie a atteint la valeur désirée de 24 volts souhaitée.
- Le symbole négatif signifie que le courant est dirigé du convertisseur vers la batterie.

Ces données représentent un processus de recharge de batterie. Dans un premier temps, la batterie était à 45 %, puis elle a rempli jusqu'à 46 %, Au cours de cette période de charge, le convertisseur a fourni le courant nécessaire la batterie. (D'où le caractère négatif).

Une fois que le chargé de la batterie terminée, le courant il s'arrêter de circuler et la tension de la batterie atteinte la valeur désirée de 24 volts, Cela signifie que la batterie est chargée avec succès et elle est prête à être utilisée.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons adapté le convertisseur DAB sur un chargeur de batterie bidirectionnel avec une isolation galvanique.

L'intégration d'un double chargeur de batterie avec un pont en H et un représente une avancée significative dans la technologie de charge de batterie. Cette approche optimise non seulement l'efficacité énergétique, mais assure également une isolation galvanique et une gestion précise de la charge et de la tension, essentielle pour prolonger la durée de vie de la batterie. Les résultats obtenus montrent clairement que cette configuration peut être une solution efficace pour répondre au besoin croissant de stockage d'énergie durable et fiable dans divers secteurs industriels et résidentiels.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail est voué aux chargeurs de batteries industriels, alimentés par des convertisseurs DC/DC avancés tels que le double pont actif (DAB) avec isolation galvanique à haute fréquence, représentent une avancée significative dans la gestion efficace de l'énergie. Il a mis en lumière l'importance croissante de ces technologies dans divers secteurs industriels, où la durabilité et l'efficacité énergétique sont des préoccupations majeures.

L'évolution des chargeurs de batteries, passant de simples dispositifs de recharge à des systèmes intégrant des technologies avancées comme les transformateurs à haute fréquence, montre un engagement constant vers des solutions plus efficaces et respectueuses de l'environnement. Les transformateurs à haute fréquence permettent non seulement de réduire les pertes d'énergie et d'optimiser la conversion d'énergie, mais ils ouvrent également la voie à des applications plus compactes et légères, répondant aux exigences modernes de compacité et de performance.

La modélisation et la simulation ont démontré que le convertisseur DAB, équipé d'un contrôleur PI, offre une stabilité et une précision remarquables dans la gestion de la charge de batterie, assurant ainsi une recharge optimale et sécurisée. Ces résultats soutiennent l'efficacité pratique du DAB dans des conditions variées, soulignant son potentiel à être une solution robuste pour les systèmes de stockage d'énergie.

Pour l'avenir, des recherches supplémentaires pourraient se concentrer sur l'optimisation continue des performances du DAB, ainsi que sur son intégration dans des applications industrielles spécifiques pour maximiser ses avantages. L'innovation continue dans ce domaine est essentielle pour répondre aux besoins croissants en énergie propre et durable, propulsant ainsi l'industrie vers un avenir plus efficace et écologique.

En conclusion, ce travail apporte une contribution significative à la compréhension et à l'amélioration des chargeurs de batteries industriels, visant à renforcer leur rôle crucial dans la transition énergétique mondiale vers des solutions plus durables et efficaces

Les références

- [1]: M.H. Rashid, Power Electronics Handbook, Academic Press, 2001,
- [2]: M. Biswal, Master of Technology (Research), control techniques for dc-dc buck converter with improved performance, National Institute of Technology, India Rourkela, 2011.
- [4]: http://www.electrosup.com/convertisseur_boost.php consulter 24 mai 2024
- [5]: H Qiaor, Y Zhang, Y Yao and L Wei. «Analysis of buck-boost converters for fuel cell electric vehicles». Article IEEE, 1-4244-0759-1/06, 2006.
- [6]: Olivier Martos. Étude d'un convertisseur DC/DC isolé de forte puissance, destiné à l'alimentation de bord de navires civils et militaires. Electronique. University de Montpellier, France 2022.
- [7]: Lukic, S.M., Huang, Alex « Review of high power isolated bi-directional DC-DC converters for PHEV/EV DC charging infrastructure ». Article USA 2011,
- [8]: Brandelero, Julio. « Conception et réalisation d'un convertisseur multicellulaire DC/ DC isolé pour application aéronautique » Thèse doctorate de l'universite de Toulouse, France 2015.
- [9]: Haris Ataulloh, Taosif Iqbal, Ihsan Ullah Khalil, Ihsan Ullah Khalil, Vojtech Blazek, Lukas Prokop, Nasim Ullah « Analysis of the Dual Active Bridge-Based DC-DC Converter Topologies, High-Frequency Transformer, and Control Techniques», Article journal Department of Electrical Engineering, College of Electrical and Mechanical Engineering (CEME), NUST, Islamabad 44000, Pakistan,2 ENET Centre, VSB—Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic 3 Department of Electrical Engineering, College of Engineering, Taif University, Saudi Arabia 2022.
- [10]: Thormodsæter Ramsdal « Bidirectional Dual Active Bridge Converter for Energy Storage Applications», Martin Master's Thesis University of Bergen Norvège, 2022
- [11]: Rahoual Sarah, Raab Katia, «Etude et conception de transformateur électronique de puissance haute fréquence, pour les applications haute tension forte puissance», Mémoire de Master Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2023

[12]: Rosas, Damian saly. « Etude et conception de convertisseurs réversibles multi-sources isolés pour l'interfaçage au réseau de sources d'énergies renouvelables et de moyens de stockage ». Thèse doctorat de l'université Grenoble alpes, France 2017.

[13]: Thanh Hai Phung. « Conception d'un 'équilibreur de charge de batterie `à base du réseau de micro convertisseurs». Université Grenoble Alpes, France, 2013.

[14]: Nguyen Ngoc, Sung Hyun Kim « Robust Tracking Control of Dual-Active-Bridge DC /DC Converters with Parameter Uncertainties and Input Saturation », University of Ulsan, Daehak-ro 93 Republic of Korea, 2022

[15]: Caron, Maxime. « Conception et mise au point d'un module de connexion réseau modulaire, bidirectionnel en courant et isolé », mémoire présenté à Montréal, Canada 2012.

[16]: Chauchat, Bertrand. « Chargeur de batteries intégré pour véhicule électrique » thèse doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble, France 1997.